T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KURU TİP TRANSFORMATÖRLERDE YALITIM MALZEMELERİ MESAFELERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

BERRA AYDOĞAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi FUAT KILIÇ**
Dr. Öğr. Üyesi MEHMET AYTAÇ ÇINAR
Dr. Öğr. Üyesi KUBİLAY EKER

BALIKESİR, TEMMUZ - 2023

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımca hazırlanan "**Kuru Tip Transformatörlerde Yalıtım Malzemeleri Mesafelerinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle ve Deneysel Olarak İncelenmesi**" başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Berra AYDOĞAN

ÖZET

KURU TİP TRANSFORMATÖRLERDE YALITIM MALZEMELERİ MESAFELERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
BERRA AYDOĞAN
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: FUAT KILIÇ)

BALIKESİR, TEMMUZ - 2023

Transformatörler, elektrik enerji sistemlerinde kullanılan en verimli elektrik makinalarıdır. Soğutma şekillerine ve kullanım alanlarına göre yağlı tip ve kuru tip transformatör çeşitleriyle kullanılmaktadır. Kuru tip transformatörler, günümüz koşulları için kullanışlı sayılabilecek, bakım gerektirmeyen, yanıcı olmayan, patlama riskinin olmaması gibi özellikleri sebebiyle çoğu alanda tercih sebebidir.

Transformatörler çalışma koşullarında arızaya sebebiyet vermeden, sürekli ve güvenli olarak çalışmaya uygun olmalıdır. Tüm bu koşullar sağlanırken müşteri talebini karşılayabilecek uygun maliyetler sunulabilmelidir. Kuru tip transformatör maliyeti, tasarım metotlarıyla doğrudan etkilenmektedir ve firmaların kendine has metotları da maliyeti ciddi oranda etkilemektedir. Yüksek kalite ile birlikte düşük maliyeti sağlamaya yönelik bu metotlar, ağırlıklı olarak transformatör dielektrik mesafeleri üzerine yapılmaktadır.

Bu çalışmada, transformatör maliyetini doğrudan etkileyen, transformatör tasarımındaki dielektrik mesafelerin optimum değerleri üzerine çalışmalar yürütülmüştür. Kuru tip transformatör faz-toprak arası mesafeyi temsilen deneyler yapılmış ve sonuçlar sonlu elemanlar yönteminin mantığıyla çalışan Ansys Maxwell programı ile değerlendirilmiştir. Deneylerle kuru tip transformatör faz-toprak arası mesafesinde ortam koşullarına göre delinme gerilimleri tespit edilmiş olup, çıkan sonuçlara göre grafikler oluşturulmuştur. Her bir ortam koşulu için grafiğin yorumundan yola çıkılarak dielektrik mesafeye göre delinme gerilimi tahmin edilebilmektedir. Bu durum transformatör tasarımında optimum dielektrik mesafe seçimine dolayısıyla optimum maliyete olanak sağlamaktadır.

ANAHTAR KELİMELER: kuru tip transformatörlerde dielektrik açıklıklar(boşluklar), delinme gerilimi, kısmi deşarj, optimum dielektrik açıklık, sonlu elemanlar yöntemi, Ansys Maxwell.

Bilim Kod / Kodları : 90514 Sayfa Sayısı : 92

ABSTRACT

INVESTIGATION OF INSULATION MATERIALS CLEARANCES IN DRY TYPE TRANSFORMERS WITH FINITE ELEMENT METHOD AND EXPERIMENTAL
MSC THESIS
BERRA AYDOĞAN
BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
(SUPERVISOR: ASSIST.PROF.DR.FUAT KILIÇ)

BALIKESİR, JULY - 2023

Transformers are the most efficient electrical machines used in electrical energy systems. It is used with oily type and dry type transformers according to cooling types and usage areas. Dry-type transformers are preferred in most areas due to their features such as maintenance-free, non-flammable, and no explosion risk useful for today's conditions.
Transformers must be suitable for continuous and safe operation without fault in operating conditions. While all these conditions are met, appropriate costs should be able to meet the customer demand. The cost of dry type transformer is directly affected by the design methods and the unique methods of the companies also affect the cost seriously. These methods, which aim to provide low cost with high quality, are mainly made on transformer dielectric clearances.
In this study, studies were carried out on the optimum values of dielectric clearance in transformer design which directly affect the transformer cost. Experiments were carried out representing the dry type transformer phase-ground clearance and the results were evaluated with the Ansys Maxwell program which works with the logic of the finite element method.
With the experiments, the breakdown voltages were determined according to the ambient conditions in the dry type transformer phase-earth clearance and graphs were created according to the results. Based on the interpretation of the graph for each ambient condition, the breakdown voltage can be estimated according to the dielectric clearance. This situation enables optimum dielectric clearance selection in transformer design and thus optimum cost.

KEYWORDS: dielectric clearances in dry type transformers, breakdown voltage, partial discharge, optimum dielectric clearance, finite element method, Ansys Maxwell.

Science Code / Codes : 90514 Page Number : 92

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **i**
ABSTRACT ..... **ii**
İÇİNDEKİLER ..... **iii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **v**
TABLO LİSTESİ ..... **vii**
SEMBOL LİSTESİ ..... **viii**
ÖNSÖZ ..... **x**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Literatür Araştırması 2
2. TRANSFORMATÖRLER **4**
2.1 Çalışma Prensibi 4
2.2 Soğutma Tipine Göre Transformatör Çeşitleri 5
2.2.1 Yağlı Tip Transformatör 5
2.2.2 Kuru Tip Transformatör 6
3. KURU TİP TRANSFORMATÖR **7**
3.1 Kuru Tip Transformatör Genel Bilgiler ve Yapısı 7
3.2 Kuru Tip Transformatör Tasarım Bilgileri 9
3.2.1 Transformatör Gücü ve Gerilimi 11
3.2.2 Akım Yoğunluğu 13
3.2.3 Volt/sipir Değeri 13
3.2.4 Doldurma Faktörü 14
3.2.5 Endüksiyon 15
3.2.6 Kısa Devre Gerilimi 16
3.2.7 Transformatör Kayıpları 16
3.2.7.1 Boşta Kayıplar 16
3.2.7.2 Yükte Kayıplar 17
3.2.8 Transformatörde Isınma 17
3.2.8.1 Doğal Konveksiyon(Taşınım) ile Isınma 18
3.2.8.2 Işıma(Radyasyon) ile Isınma 19
3.2.8.3 İletim(Kondüksiyon) ile Isınma 19
3.2.9 Transformatörde Yalıtım Sistemi 20
3.2.10 Transformatörde İzolasyon Seviyeleri 21
3.2.11 Transformatör Tasarımında Optimum Tasarımı Belirleme 22
4. KURU TİP TRANSFORMATÖRLERDE DİELEKTRİK MESAFELER **24**
4.1 Çekirdek ve Bobinler Arası Dikey Mesafeler 25
4.2 Çekirdek ve Bobinler Arası Yatay Mesafeler 26
4.3 Kuru Tip Transformatördeki Açıklıkların Tasarıma Etkisi 27
5. KURU TİP TRANSFORMATÖR TESTLERİ **28**
5.1 Rutin Testler 28
5.1.1 Gerilim Oranının Ölçülmesi ve Faz Yer Değiştirmesinin Kontrolü 29
5.1.2 Sargı Direncinin Ölçülmesi 29
5.1.3 Kısa Devre Empedansının ve Yük Kayıplarının Ölçülmesi 30

5.1.4 Boşta Kayıpların ve Akımın Ölçülmesi 31
5.1.5 Uygulanan Gerilim Deneyi 31
5.1.6 İndüklenen Gerilim Deneyi 33
5.1.7 Kısmi Deşarj Ölçülmesi 33
6. KATI YALITKANLAR 35
6.1 Elektriksel Özellikler 35
6.1.1 Dielektrik Sabiti 35
6.1.2 Dielektrik Polarizasyon 36
6.1.3 Elektriksel İletkenlik 36
6.1.4 Dielektrik Kayıp Faktörü 37
6.1.5 Elektriksel Dayanım 38
6.2 Isıl Özellikleri 39
6.3 Katı Yalıtkanlarda Delinme Süreçleri 40
6.3.1 Ani(Öz) Delinme 41
6.3.1.1 Elektronik Delinme 41
6.3.1.2 Kanal Oluşumu 41
6.3.2 Elektromekanik Delinme 41
6.3.3 Termal (Isıl) Delinme 43
6.3.4 Kimyasal ve Elektrokimyasal Bozulma 44
6.4 Katı Yalıtkanlarda Kısmi Deşarj 44
6.4.1 Korona Deşarjı 45
6.4.2 Yüzey Deşarjı (İz Oluşumu) 45
6.4.3 Ağaçlanma 46
6.4.4 Dahili Kısmi Deşarj (Erozyon) 47
6.5 Katı Yalıtım Malzemelerinin Dielektrik Dayanımının Tahmini 48
7. YÖNTEM VE ANALİZ 49
7.1 Deneysel Yöntem ve Analizi 49
7.1.1 Kuru Hava Ortamında Leplast Tek Takoz Deneyi 53
7.1.2 Kuru Hava Ortamında Leplast İki Takoz Deneyi 54
7.1.3 Kuru Hava Ortamında Leplast Üç Takoz Deneyi 56
7.1.4 Kuru Hava Ortamında Silindirik Tek Takoz Deneyi 57
7.1.5 Kuru Hava Ortamında Silindirik İki Takoz Deneyi 58
7.1.6 Kuru Hava Ortamında Silindirik Üç Takoz Deneyi 59
7.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Elektrik Alan Analizi 60
7.2.1 Kuru Hava Ortamında Leplast Tek Takoz Deneyi Maxwell Analizi 66
7.2.2 Kuru Hava Ortamında Leplast İki Takoz Deneyi Maxwell Analizi 69
7.2.3 Kuru Hava Ortamında Leplast Üç Takoz Deneyi Maxwell Analizi 72
7.2.4 Kuru Hava Ortamında Silindirik Tek Takoz Deneyi Maxwell Analizi 76
7.2.5 Kuru Hava Ortamında Silindirik İki Takoz Deneyi Maxwell Analizi 78
7.2.6 Kuru Hava Ortamında Silindirik Üç Takoz Deneyi Maxwell Analizi 81
7.3 Deney Sonuçlarına Göre Delinme Gerilimi Tahmini 84
7.3.1 Kuru Hava Ortamında Leplast Takoz Delinme Gerilimi Tahmini 85
7.3.2 Kuru Hava Ortamında Silindirik Takoz Delinme Gerilimi Tahmini 86
8. SONUÇLAR 88
9. KAYNAKLAR 89
ÖZGEÇMİŞ 92

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: 1 fazlı çekirdek tip transformatör yapısı ve çalışma prensibi. 4
Şekil 2.2: Genleşme depolu yağlı tip transformatör..... 5
Şekil 2.3: Hermetik yağlı tip transformatör. 6
Şekil 2.4: Kuru tip transformatör. 6
Şekil 3.1: Kuru tip transformatör önden genel görünüş..... 8
Şekil 3.2: Kuru tip transformatör üstten genel görünüş. 8
Şekil 3.3: Kuru tip transformatör yandan genel görünüş. 9
Şekil 3.4: Üçgen bağlantı modeli..... 12
Şekil 3.5: Yıldız bağlantı modeli 12
Şekil 3.6: Zig-zag bağlantı modeli..... 12
Şekil 3.7: Nüve kesiti ile kesit etrafına çizilebilecek minimum çember..... 14
Şekil 4.1: Kuru tip transformatör önden görünüm. 24
Şekil 4.2: Kuru tip transformatör önden kesiti..... 25
Şekil 4.3: Kuru tip transformatör üstten kesiti..... 26
Şekil 5.1: Uygulanan gerilim deneyi basit modeli..... 32
Şekil 5.2: Kısmi deşarj deneyi uygulama grafiği..... 34
Şekil 6.1: (a) Yalıtkan malzemenin parelel modellenmesi ve (b) yalıtkan üzerindeki akım mekanizmaları fazör gösterimi 37
Şekil 6.2: Delinme dayanımının zorlanma süresiyle değişimi..... 40
Şekil 6.3: Elektrik alan sıkıştırma etkisi (a) Elektrik alan uygulanmaz iken, (b) Elektrik alan altında iken..... 42
Şekil 6.4: Kısmi deşarj tipi modellemeleri (a) Korona deşarjı, (b) Yüzey deşarjı, (c) Dahili(iç) deşarj. 45
Şekil 6.5: Elektriksel ağaçlanma tipleri (a) dal tipi, (b) çalı tipi, (c) çam dalı tipi, (d) çalı çam dalı tipi 46
Şekil 6.6: Boşluğun dielektrik devresinin eşleniği..... 47
Şekil 7.1: Bobin alt kısımları ile klemp arası mesafe..... 50
Şekil 7.2: Deneyde kullanılan takoz örnekleri (a) Leplast takoz, (b) Silindirik takoz..... 50
Şekil 7.3: Deney düzeneği. 52
Şekil 7.4: Deney düzeneği basit modeli..... 53
Şekil 7.5: Tek leplast takoz ile yapılan deney düzeneği. 53
Şekil 7.6: Tek leplast takoz ile yapılan testin sonucu. 54
Şekil 7.7: İki leplast takoz ile yapılan deney düzeneği. 55
Şekil 7.8: İki leplast takoz ile yapılan testin sonucu. 55
Şekil 7.9: Üç leplast takoz ile yapılan deney düzeneği..... 56
Şekil 7.10: Üç leplast takoz ile yapılan testin sonucu..... 56
Şekil 7.11: Tek silindirik takoz ile yapılan deney düzeneği. 57
Şekil 7.12: Tek silindirik takoz ile yapılan testin sonucu. 58
Şekil 7.13: İki silindirik takoz ile yapılan deney düzeneği. 58
Şekil 7.14: Üç silindirik takoz ile yapılan deney düzeneği..... 59
Şekil 7.15: Üç silindirik takoz ile yapılan testin sonucu..... 59
Şekil 7.16: Problem çözümü seçimi..... 62
Şekil 7.17: Elektrotların ve katı yalıtkanın çizimi ve yerleşimi..... 62

Şekil 7.18: Malzeme tanımı ve dielektrik katsayı girdisi..... 63
Şekil 7.19: Elektrotlara gerilim değeri atama. 64
Şekil 7.20: Kapalı alan oluşturma. 64
Şekil 7.21: Kapalı alan içerisinde deney düzeneği simulasyon çizimi. 65
Şekil 7.22: Geometrinin sonlu elemanlara bölünmüş hali. 65
Şekil 7.23: Tek leplast takoz ile yapılan deneyin Maxwell programında çizimi. 66
Şekil 7.24: Tek leplast takoz ile yapılan deneyin elektrik alan analiz görseli. 67
Şekil 7.25: Elektrotların köşe noktalarındaki elektrik alan değişimi. 68
Şekil 7.26: Tek leplast takoz ile yapılan deneyin Maxwell analizinde takoz yüzeyine çizilen iki noktası arasındaki elektrik alan değişimi grafiği. 68
Şekil 7.27: Takozun gerilim verilen elektroda yakın olduğu dar alan. 69
Şekil 7.28: İki leplast takoz ile yapılan deneyin Maxwell programında çizimi..... 70
Şekil 7.29: İki leplast takoz ile yapılan deneyin elektrik alan analiz görseli. 70
Şekil 7.30: Elektrotların köşe noktalarındaki elektrik alan değişimi. 71
Şekil 7.31: İki leplast takoz ile yapılan deneyin Maxwell analizinde takoz üzerindeki elektrik alan değişimi grafiği. 71
Şekil 7.32: Takozun gerilim verilen elektroda yakın olduğu dar alan ve takozlar arası dar alan. 72
Şekil 7.33: Üç leplast takoz ile yapılan deneyin Maxwell programında çizimi..... 73
Şekil 7.34: Üç leplast takoz ile yapılan deneyin elektrik alan analiz görseli. 73
Şekil 7.35: Elektrotların köşe noktalarındaki elektrik alan değişimi. 74
Şekil 7.36: Üç leplast takoz ile yapılan deneyin Maxwell analizinde takoz üzerindeki elektrik alan değişimi grafiği. 75
Şekil 7.37: Takozun gerilim verilen elektroda yakın olduğu dar alan ve takozlar arası dar alanlar. 75
Şekil 7.38: Silindirik tek takoz ile yapılan deneyin Maxwell programında çizimi..... 76
Şekil 7.39: Silindirik tek takoz ile yapılan deneyin elektrik alan analiz görseli. 77
Şekil 7.40: Elektrotların köşe noktalarındaki ve yüzey kıvrımları arasında elektrik alan değişimi..... 77
Şekil 7.41: Silindirik tek takoz ile yapılan deneyin Maxwell analizinde takoz üzerindeki elektrik alan değişimi grafiği. 78
Şekil 7.42: Silindirik iki takoz ile yapılan deneyin Maxwell programında çizimi. 79
Şekil 7.43: Silindirik iki takoz ile yapılan deneyin elektrik alan analiz görseli..... 79
Şekil 7.44: Elektrotların köşe noktalarındaki ve yüzey kıvrımları arasında elektrik alan değişimi..... 80
Şekil 7.45: Silindirik iki takoz ile yapılan deneyin Maxwell analizinde takoz üzerindeki elektrik alan değişimi grafiği. 81
Şekil 7.46: Silindirik üç takoz ile yapılan deneyin Maxwell programında çizimi..... 81
Şekil 7.47: Silindirik üç takoz ile yapılan deneyin elektrik alan analiz görseli. 82
Şekil 7.48: Elektrotların köşe noktalarındaki ve yüzey kıvrımları arasında elektrik alan değişimi..... 83
Şekil 7.49: Silindirik üç takoz ile yapılan deneyin Maxwell analizinde takoz üzerindeki elektrik alan değişimi grafiği. 83
Şekil 7.64: Kuru hava ortamında leplast takoz deney sonuçlarına göre oluşturulan grafik ve denklemi. 86
Şekil 7.66: Kuru hava ortamında silindirik takoz deney sonuçlarına göre oluşturulan grafik ve denklemi..... 87

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1: Kuru tip transformatör teknik özellikler listesi 10
Tablo 3.2: Bağlantı şekline göre faz akımı denklemleri. 13
Tablo 3.3: Bağlantı şekline göre volt/sipir denklemleri. 14
Tablo 3.4: IEC 60076-11'e göre yalıtım sınıfları 20
Tablo 3.5: IEC 60076-11'e göre izolasyon seviyeleri 21
Tablo 3.6: Transformatörde optimum dizayn sınır koşulları. 23
Tablo 6.1: Katı yalıtkanların termal sınıflandırılması. 39
Tablo 7.1: Kuru havada farklı malzeme yükseklikleri ile yapılan deney düzenekleri. 51
Tablo 7.2: Kuru havada, nemli havada farklı malzeme yükseklikleri ile yapılan deney düzenekleri. 63
Tablo 7.3: Tüm deneylerin delinme gerilimi ve delinme anındaki elektrik alan şiddeti değerleri. 84
Tablo 7.4: Kuru hava ortamında leplast takoz deney sonuçları. 85
Tablo 7.5: Kuru hava ortamında silindirik takoz deney sonuçları 86

SEMBOL LİSTESİ

A : Kesit (mm^2)
A : Yüzey alanı (m^2)
A : Elektrot Yüzey Alanı (cm^2)
B : Akı Yoğunluğu (Tesla)
B_{max} : Maksimum Akı Yoğunluğu (Tesla)
Cp : Kusursuz Dielektrik Kısmın Kapasitesi (Farad)
Cs : Seri Bağlı Kapasite (Farad)
Cv : Boşluğun Kapasitesi (Farad)
D : Yalıtkan Kalınlığı (cm)
d : Elektrotlar Arası Uzaklık (mm)
d_1 : Boşluğun kalınlığı (mm)
d_2 : Dielektrik malzeme kalınlığı (mm)
E : Endüklenen Gerilim Değeri (Volt)
E : Elektrik alan (kV/mm)
E_b : Dielektrik dayanım (kV/mm) ya da (V/m)
ε : Yüzey Yayma Katsayısı
ε_0 : Vakum Ortamının Dielektrik Sabiti
ε_r : Dielektrik Sabiti
F : Frekans (Hz)
f : Faz Akımı ve Faz Gerilimi İndisi
F_{ij} : Görüş Faktörü
Ϭ : Stephan Boltzman Katsayısı ($5{,}67.10^{-8}$ W/m^2K^4)
h : Hat Akımı ve Hat Gerilimi İndisi
h : Dış Yüzey için Isı Transfer Katsayısı (W/m^2K)
I : Akım (A)
I_C : Kapasitif Akım (A)
If : Faz Akımı (A)
In : Nominal Akım (A)
Io : Boşta Akım (A)
I_R : Dirence Bağlı Akım (A)
J : Akım Yoğunluğu (A/mm^2)
J_{max} : Maksimum Akım Yoğunluğu (A/mm^2)
K : Malzemenin Isıl İletkenliği (Siemens/cm)
k : Havanın iletkenlik katsayısı (W/m. K)
k_α : Harici Kayıp Katsayısı
k_e : Girdap(Eddy) Akımı Kayıp Katsayısı
k_h : Histerezis Kayıp Katsayısı
N : Sarım Sayısı
N_{ag} : Alçak Gerilim Sarım Sayısı
P_{ac} : Alternatif Akım Kayıpları
$P_{boşta}$: Boşta Kayıp Değeri (kW)
P_c : Basınç Kuvveti (Newton)
P_{dc} : Doğru Akım Kayıpları
P_{eddy} : Eddy Kayıpları (kW)
$P_{external}$: Harici Kayıplar (kW)
$P_{histerezis}$: Histerezis Kayıpları (kW)

$\mathbf{P_{km}}$: Toplam kısa devre kayıpları (kW)
$\mathbf{P_o}$: Boşta Çalışma Kaybı (kW)
$\mathbf{P_{stray}}$: Stray Kayıpları
$\mathbf{P_{yükte}}$: Yükte Kayıp Değeri (kW)
$\mathbf{P_{toplam}}$: Toplam Kayıp Değeri (kW)
$\mathbf{q}$: İletim ile ısı transfer oranı (W/m^2)
q"conv : Isı Transfer Oranı m(W/m^2)
q"r : Radyasyon Isı Transferi Oranı m(W/m^2)
Qfe : Nüve Kesiti (cm^2)
$\mathbf{R_{AG}}$: Alçak gerilim sargısı direnci (Ω)
Ri : İzolasyon Direnci (Ω)
$\mathbf{R_{YG}}$: Yüksek gerilim sargısı direnci (Ω)
S : Güç (kVA)
SF : Doldurma Faktörü
T : Yüzey sıcaklığı (K)
T : Malzemenin Sıcaklığı (°C)
t : Isının dağıtıldığı süre (sn)
$\mathbf{T_{air}}$: Ortam Sıcaklığı (K)
tan δ : Dielektrik Kayıp Faktörü
$\mathbf{t_m}$: Ölçme sıcaklığı (°C)
Ts : Yüzey Lokal Sıcaklığı(K)
$\mathbf{T_1^4}$: İlk Yüzey Sıcaklığı
$\mathbf{T_2^4}$: İkinci Yüzey Sıcaklığı ya da Hava Sıcaklığı
U : Gerilim (kV)
$\mathbf{U_b}$: Elektriksel Dayanma Gerilimi (kV)
$\mathbf{U_k}$: Kısa Devre Gerilimi
$\mathbf{U_{k\,max}}$: Maksimum Kısa Devre Gerilimi
$\mathbf{U_{k\,min}}$: Minimum Kısa Devre Gerilimi
$\mathbf{U_{KM}}$: Kısa devre gerilimi
$\mathbf{U_{RM}}$: Kısa Devre Gerilimi Omik Bileşeni
$\mathbf{U_{XM}}$: Kısa Devre Gerilimi Endüktif Bileşeni
$\mathbf{U_r}$: Kısa devre geriliminin % olarak rezisitif bileşeni
$\mathbf{U_x}$: Kısa devre geriliminin % olarak reaktif bileşeni
$\mathbf{V_{ag}}$: Alçak Gerilim Sargı Gerilimi (Volt)
$\mathbf{V_f}$: Faz Gerilimi
$\mathbf{V_v}$: Boşluğun gerilimi (V)
$\mathbf{W_{ac}}$: Alternatif Akım ile Üretilen Isı (W/cm^3)
$\mathbf{w_{dc}}$: Doğru Akım ile Üretilen Isı (W/cm^3)
Y : Young Modülü
ρ : Malzemenin İletkenliği (Ω.cm)
$\mathbf{\rho_V}$: Özgül direnç (Hacimsel direnç) (Ω.cm)

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam süresi boyunca yaşamış olduğumuz pandemi süreci, ailemden birinin kaybı, geçirdiğim ciddi trafik kazası ve diğer tüm sorunlara rağmen, her zaman olumlu ve doğru yaklaşımlarla yol gösteren, destek olan insanların varlığı neticesinde tez çalışmamı tamamlamış bulunmaktayım.

Eğitim hayatım boyunca bana her zaman destek olan, yol gösteren, yürüdüğüm her yolda arkamda varlığını hissettiğim, tez süreci içerisinde kaybını yaşadığım babam Yusuf AYDOĞAN'a hayatım boyunca bana kattığı herşey için teşekkür etmek isterim. Bugünlere gelmemde en çok emeği geçen ve yüksek lisans yapmamı en çok isteyen kişidir. Tez çalışmamı, vefat eden babama ithaf etmekteyim.

Hayatım boyunca her zaman yanımda olan, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen annem ve kardeşlerime teşekkürü borç bilirim.

Tez çalışmam boyunca verdiği fikirlerle yol gösteren, her adımda yanımda ve destek olan Mehmet Baki DOĞRU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans sürecim boyunca yaşadığım tüm sorunlarda bana destek olan, tez sürecim boyunca beni motive eden, karşılaştığım problemleri doğru bir şekilde çözmeme yardımcı olan değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Fuat KILIÇ'a teşekkür ederim.

Tezin bir sürecinde çalışmakta olduğum, her türlü imkan ve olanakları sağlayan BEST A.Ş.'ye ve tez çalışmam için gereken deneyleri gerçekleştirmemde yardımcı olan çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Balıkesir, 2023 **Berra AYDOĞAN**

1. GİRİŞ

Transformatörler enerji sistemlerinde, elektrik enerjisinin minimum kayıplarla son tüketiciye iletilmesini sağlayan ana elemanlardan biridir. Herhangi bir arıza durumunda sistemin geçici olarak hizmetdışı olmasına dolayısıyla büyük maddi kayıplara sebebiyet vermektedir. Arıza sebepleri olarak elektriksel delinmeler, yıldırım, transformatör iç ve dış izolasyon yapısı, elektriksel bağlantılarda oluşabilecek problemler, aşırı yüklenme, nem, hattaki bozulmalar, yabancı nesnelerin sebep olduğu durumlar, uzun kullanım sebebiyle oluşan yıpranmışlık payı ve diğer sebepler gösterilebilmektedir. Bu sebeplerin büyük çoğunluğunu elektriksel problemler oluşturmaktadır [1].

Dielektrik mesafeler, transformatörün çalışma koşullarında arıza vermeksizin sürekli ve güvenli çalışmasına olanak sağlayan minimum mesafelerdir [2]. Dielektrik mesafelerin doğru seçilmesi, transformatör yüklü durumdayken oluşabilecek problemleri önemli ölçüde etkilemektedir. Fakat dielektrik mesafe güvenli çalışma amacıyla oluşturulduğundan yüksek değerlerde uygulanması transformatör maliyetlerini önemli ölçüde artırmaktadır. Optimum dielektrik mesafe ile güvenli, sürdürülebilir, verimli çalışma koşulları sağlamak mümkündür. Bu çalışmada, transformatör tasarımında uygulanması gereken optimum dielektrik mesafelerin tespiti yapılmaya çalışılmıştır.

Çalışmanın ilk kısmında kuru tip transformatörden ve tasarımından bahsedilmiştir.Tezin konusu olan dielektrik mesafeler açıklanmış olup görsel üzerinde betimlenmiştir. Mesafelerin yeterli olup olmadığının anlaşılması için Kuru Tip Transformatör'e uygulanan testler anlatılmıştır.

Bobin nüve arası mesafe dielektrik mesafelerin en önemlilerindendir. Mesafenin sabit kalması için bobinler ile demir aksam arasına takoz yerleştirilerek montaj yapılmaktadır [2]. Dolayısıyla arada kullanılan takoz fiziksel yapısı, bobin nüve arası optimum dielektrik mesafeyi oluşturan takoz yüksekliği önem arz etmektedir. Optimum dielektrik mesafenin tespiti için iki farklı takoz tipi kullanılmıştır. Çalışmada üç farklı adımda uygulanmıştır. Öncelikle dielektrik mesafeyi betimleyen basit bir deney düzeneği hazırlanarak farklı mesafelerde gerilim artırılarak dayanabileceği maksimum gerilim tespiti yapılmıştır. Aynı düzenek iki farklı takoz tipi için kuru ortam koşullarında denenmiştir. Araya izolasyon malzemesi kullanılarak mesafeye etkisi incelenmiştir. İkinci adımda ise Ansys Maxwell programı kullanılarak deney sonuçları kıyaslanmıştır. Son adımda deney sonuçları grafiğe aktarılarak ampirik bir formül oluşturulmuştur. Formül delinme gerilimi-mesafe arası

ilişkiyi anlatmaktadır. Tasarımda kullanılması gereken açıklık(mesafe) formülde yerine yazılarak delinme gerilimi tahmin edilebilmektedir.

1.1 Literatür Araştırması

Literatürde çalışma konusu ile ilgili yeterli veri bulunmamaktadır. Fakat çalışmada sürece katkı sağlayan kaynaklar detaylı olarak incelenmiştir.

Juan Manuel Villanueva Ramirez, tarafından yapılan çalışmada gerilim darbelerine maruz kalan transformatör yalıtım sisteminin optimize edilmesi için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda dielektrik mesafelerde durum 1 çalışması için %3,32'lik, durum 2 çalışması için %12,73'lük genel azalma sağlanmıştır [1].

Özcan Kalenderli ve Eyüp Taslak, tarafından yapılan çalışmada farklı gerilim yükselme hızlarında VDE ve disk elektrot sistemlerinde mineral yağın delinme gerilimine etkisi incelenmiştir. Delinme gerilimleri FEMM programında yorumlanmıştır. Çalışma sonucunda VDE elektrot sisteminde ölçülen delinme gerilimi değerlerinin disk elektrot sistemi delinme gerilimi değerlerinden yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, VDE elektrot sisteminin disk elektrot sistemine kıyasla delinme gerilimi yüksek olmasına rağmen elektrik alan şiddetinin daha düşük olduğu gözlenmiştir. Dolayısıyla, delinme geriliminin yüksek olmasının nedeninin elektrik alan şiddetinin daha düşük ve elektrot kenar etkisinin daha az olması ile açıklanmıştır [3].

Yasin Aslan, tarafından yapılan çalışmada VHD-35 pin tipi izolatörler için tahribat neticesinde oluşacak çatlaklarda toz, su, hava boşluğu ve çamur yerleşmesi durumunda kısmi deşarj incelemesi yapılmıştır ve FEMM programı kullanılarak elektrik alan değişimleri incelenmiştir. Yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda, hava ve tozun kısmi deşarja neden olmadığı ancak su(yağmur) ve çamurun kısmı deşarja neden olduğu gözlemlenmiştir [4].

A.Masood, M.U.Zuberi ve E.Husain, tarafından yapılan çalışmada sıvı nitrojen içinde katı yalıtkan dielektrik yalıtımı incelenmiştir. Dielektrik dayanımı için denklem çıkartılmış olup katı yalıtkan malzeme özellikleri denklemde girilerek dielektrik dayanımı hesaplanmıştır. Selülozik katı yalıtım malzemelerinin dielektrik dayanımlarından bağıntı oluşturularak eğriler çizilmiştir. Çalışma sonucuna göre katı yalıtkan elektrik dayanımlarının logaritmik denkleme dayalı olduğu, dielektrik dayanımın katı yalıtkan özelliklerine göre hesaplanabileceği anlaşılmaktadır [5].

Kemal Arıkan, tarafından yapılan çalışmada gaz ortamında üç farklı elektrot sistemi, üç farklı elekrot açıklığı, üç farklı gaz basıncı ve üç farklı iyonizasyon katsayısı ile seksenbir farklı delinme gerilimi hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile üç farklı elektrot sistemi ve üç farklı elektrot açıklığı için elektrik alan dağılımları incelenmiştir. Bulanık mantık ile altı farklı bulanık çıkarım sistemi tasarlanarak delinme gerilimi tahmin edilmeye çalışılmıştır. Çalışmanın sonucuna göre farklı elektrot sistemlerinde, farklı elektrot açıklıklarında hesaplanan delinme gerilimleri arası farklılıklar incelenmiştir [6].

R.Murillo, J.Smajic, J.Tepper, A.Nogues ve T.Steinmetz, tarafından yapılan çalışmada 72,5kV gerilim seviyesi için iki prototip üretilerek dielektrik performansı incelenmiştir. Dielektrik performansı, 3 boyutlu simülasyonlarda değerlendirilerek elektrik alanlar hesaplanmıştır. Dayanma gerilimini tahmin edebilmek için deşarj yaratabilecek mekanizmalar simülasyon arasına dahil edilerek değerlendirmeye alınmıştır. Çalışma sonucunda, dielektrik dayanma gerilimi için elektrik alan kullanılarak simülasyon üzerinden fikir edinilebileceği ve dielektrik gerilim tahmini yapılabileceği anlaşılmaktadır [7].

A.Masood, M.U.Zuberi, tarafından yapılan çalışmada katı yalıtkan malzemenin teknik özellikleri kullanılarak dielektrik dayanımının tahmini için denklem oluşturulmuştur. Oluşturulan denkleme göre katı yalıtkanların dielektrik dayanım tahminleri yapılarak ampirik ilişki kurulmuştur. Çalışma sonucunda dielektrik dayanım tahmni için oluşturulan denklemin %10'luk hatalarla sonuç verdiği gözlemlenmektedir. Elde edilen denklemin dielektrik dayanımı tahmini için kullanışlı olduğu düşünülmektedir [8].

Halil İbrahim Üçkol, tarafından yapılan çalışmada kablo başlıklarında kısmi deşarj testleri yapılmış, oluşan kusurlar 5 adet sınıfa ayrılarak analiz edilmiştir. Bu kusurlar, kablo başlığına metal bir objenin girmesi, kablo başlığı ekipmanlarından biri olan stres kontrol tüpünün eksenin kayması, kablo başlığı pabucunda veya toprak tarafında oluşan korona olayları, kablo yalıtkanında kesici aletlerden oluşan yanıklar ve yalıtkan kısmı çevreleyen yarı iletken tabakada oluşan sivri uçlar olarak sıralanabilmektedir. Arıza kaynakları üzerinden 120 adet kısmi boşalma örüntüsü oluşturulmaktadır, örüntüler daha sonra RGB görüntülere çevrilmektedir. Görüntüler algoritma için uygun girdilere çevrilerek, evrişimli sinir ağları yardımıyla analizler yapılmıştır. Çalışma sonucunda, sinir ağları algoritmasının kısmi deşarj kusurlarının sınıflandırılmasında verimli tanı aracı olduğunu göstermektedir. Aynı metodun diğer yüksek gerilim ekipmanları için de kullanılabileceği düşünülmektedir [9].

2. TRANSFORMATÖRLER

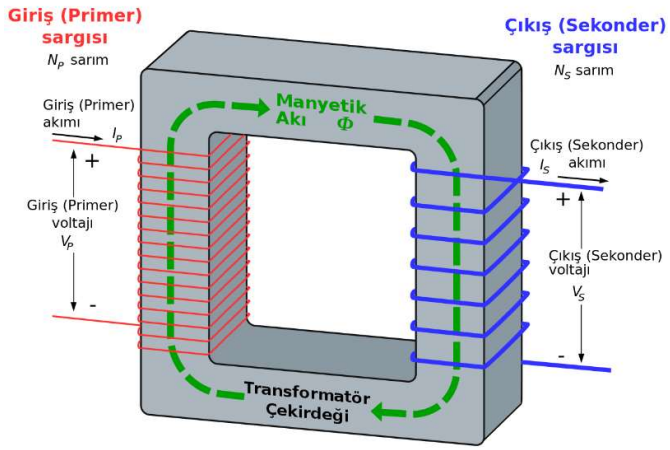
2.1 Çalışma Prensibi

Transformatörler, içlerinde hareket eden parçaları olmayan ‘’statik’’ elektromanyetik ürünlerdir. Hareketli parça olmaması, harekete ya da sürtünmeye giden kayıp olmadığı anlamına gelmektedir. Bu da transformatörü, motorlar ya da hareketli parçası olan diğer endüstriyel ürünlere göre yüksek verimli bir elektromanyetik alet yapmaktadır [10].

Transformatör, iki veya daha fazla elektrik devresini elektromanyetik indüksiyonla birbirine bağlamaktadır. Bir elektrik devresinden diğer elektrik devresine, enerjiyi elektromanyetik alan yardımı ile iletilir. Elektik enerjisinin belirli gücünde gerilim ve akım değerlerinde istenilen değişimi yapabilen makinalardır.

Bir transformatöre alternatif gerilim uygulandığında, primer sargılarından Şekil 2.1’ de gösterildiği gibi I_p alternatif akımı geçer. I_p akımı, nüvede zamana göre yönü ve şiddeti değişen bir manyetik alan meydana getirmektedir. Bu manyetik alan devresini, nüve üzerinden ve sekonder sargının bulunduğu bacak üzerinden geçerek tamamlamaktadır.

Değişken manyetik alan kuvvet çizgileri, sekonder sargı iletkenlerini keserek sekonder sargılarında bir EMK indüklenir. Böylece aralarında hiçbir elektriksel bağ olmadığı halde, primer sargıya uygulanan alternatif gerilim sekonder sargıda bir gerilim indüklemiş olmaktadır [10].



Şekil 2.1: 1 fazlı çekirdek tip transformatör yapısı ve çalışma prensibi [11].

Transformatörler çalışma şekillerine göre sınıflandırılmaktadır. Soğutma şekline göre yağlı tip transformatör ve kuru tip transformatör olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

2.2 Soğutma Tipine Göre Transformatör Çeşitleri

2.2.1 Yağlı Tip Transformatör

Sargıları tamamen yağın içinde bulunan transformatörlere yağlı tip transformatör denilmektedir. Soğutma işlemi yağ ile sağlanır. Yağlı tip trafolar, genleşme depolu ve hermetik olmak üzere iki çeşittir [12].

- Genleşme depolu transformatör: Transformatör çalışma durumunda, yağın sıcaklığı artarak zamanla ısınarak yağ genleşir. Yağın yoğunluğu azaldığı için yükselerek genleşme deposunda toplanır. Isınma sonucu genleşme durumu, genleşme deposu yardımıyla çözülmüş olur [13].

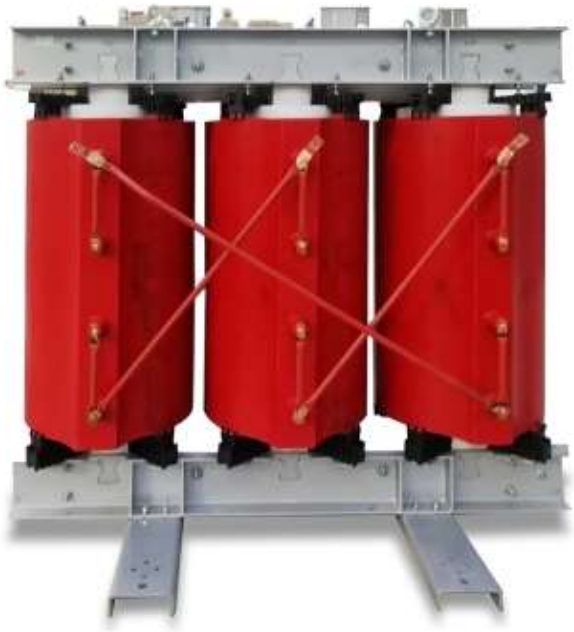
Şekil 2.2: Genleşme depolu yağlı tip transformatör [14].

- Hermetik Transformatör: Genleşme deposu bulunmayan, atmosfere kapalı sızdırmaz ve vakuma dayanıklı bir kazana sahip transformatördür. Yağın ısınması sonucu genleşme durumu, dalgalı biçimli kazan duvarlarının elastikiyeti ile giderilmektedir [13].

Şekil 2.3: Hermetik yağlı tip transformatör [15].

2.2.2 Kuru Tip Transformatör

Transformatör çalışma sırasında ısınan nüve ve sargıların soğutulması hava sirkülasyonu ile sağlanmaktadır. Bu çalışma tipindeki transformatör Kuru Tip Transformatör olarak adlandırılmaktadır [16].



Şekil 2.4: Kuru tip transformatör [17].

3. KURU TİP TRANSFORMATÖR

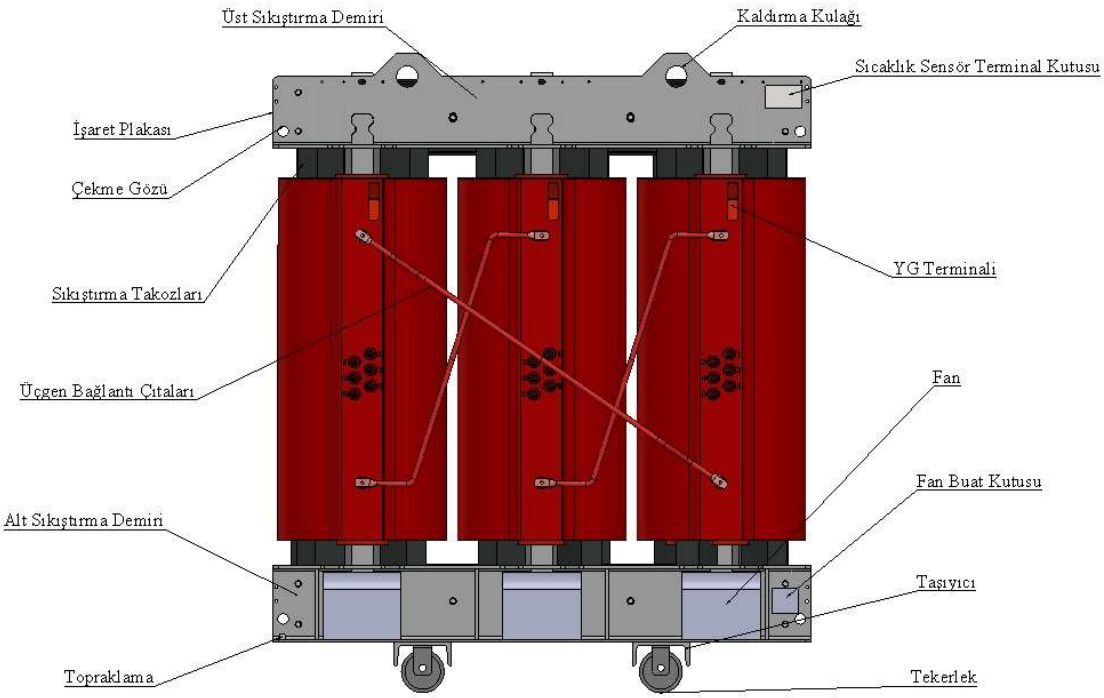
3.1 Kuru Tip Transformatör Genel Bilgiler ve Yapısı

Kuru tip transformatörler, bina içi ve bina dışı olarak hastaneler, havaalanları, okullar, alışveriş merkezleri, rüzgar santralleri, güneş santralleri, enerji üretim tesisleri, trafo merkezleri ve endüstrinin her alanında kullanım için uygun ortam koşulları sağlanarak kullanılmaktadır. Yağ bulundurmaması sebebiyle bakım gerektirmeyen, zor tutuşan ve kendi kendine sönebilen transformatör çeşididir. Yanıcı malzeme oranı düşük izolasyon malzemeleri kullanılmaktadır. Bu sebeple yangın riski oluşturabilecek alanlarda özellikle tercih edilen transformatör çeşididir. Tüketici merkezlerine yakın yerleştirilebildiği için kablo maliyetleri, iletim kayıpları ve tesis maliyetleri düşüktür [16].

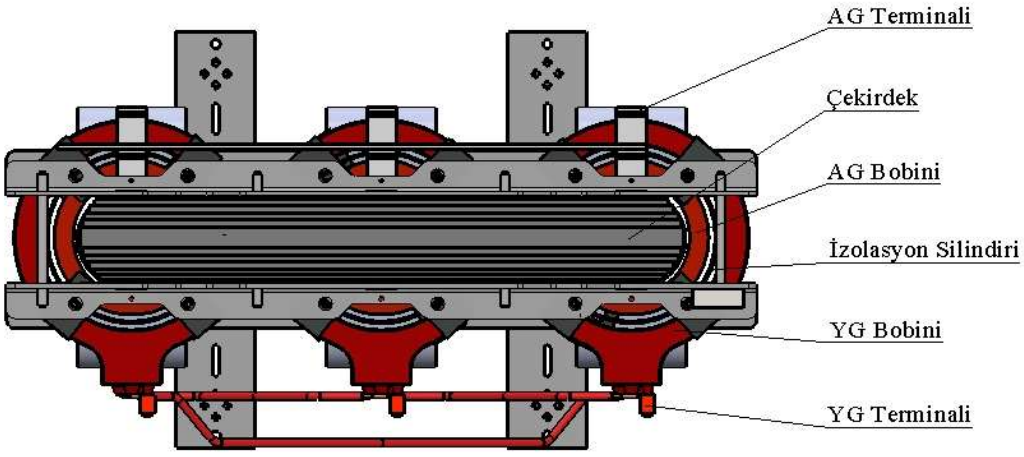
Yağlı tip transformatör ile kıyaslandığında, yangına karşı koruma çok daha iyidir. Aşırı yüklenme durumunda, kısa süreli ve yüksek miktarda yüklenmeye uygun olmaktadır. Yağlı tip transformatörde ise uzun süreli ve düşük miktarda yüklenme durumundan söz edilebilmektedir. Yağlı tip transformatöre göre bakım gerektirmemesi, işletme koşullarında uzun vadede maliyet açısından önem arz etmektedir. Yağlı tip transformatörde düşük boşta kayıp, yüksek yükte kayıp olarak tasarlanırken, kuru tip transformatörde yüksek boşta kayıp, düşük yükte kayıp değerlerinde tasarım yapılmaktadır. Yağlı tip transformatör yapısında aksesuar çeşitliliği bulunmaktadır. Oluşabilecek herhangi bir arıza durumunda sistemin uzun süre aksamadan çalışabilmesi gerekmektedir. Bu sebeple aksesuarlardan bazılarının yedeği transformatör ile birlikte gönderilmektedir. Kuru tip transformatör yapısında ise aksesuar kullanımı az olduğu için yedek aksesuar gönderimine çoğu zaman ihtiyaç duyulmamaktadır [16].

Kuru tip transformatör yapısı, basitçe nüve, alçak gerilim ve yüksek gerilim bobinleri ile bu yapıları birarada tutan demir aksamdan oluşmaktadır. Nüvenin bacaklarına içten dışa doğru sırasıyla alçak gerilim bobini ve yüksek gerilim bobini yerleştirilmektedir. Transformatör gerilimine göre alçak gerilim bobini ile yüksek gerilim bobini arasına izolasyon silindiri de yerleştirilmektedir. Bobinlerin bağlantı şekli ve bağlantı grubu son kullanıcı isteğine ya da tasarım uygunluğuna göre değişmektedir. Standart bir dizayn için yüksek gerilim tarafında bağlantılar üçgen bağlantı iletkenleriyle, alçak gerilim tarafında baralarla yapılmaktadır. Transformatör sargı sıcaklığının kontrolü alçak gerilim bobine yerleştirilen sıcaklık

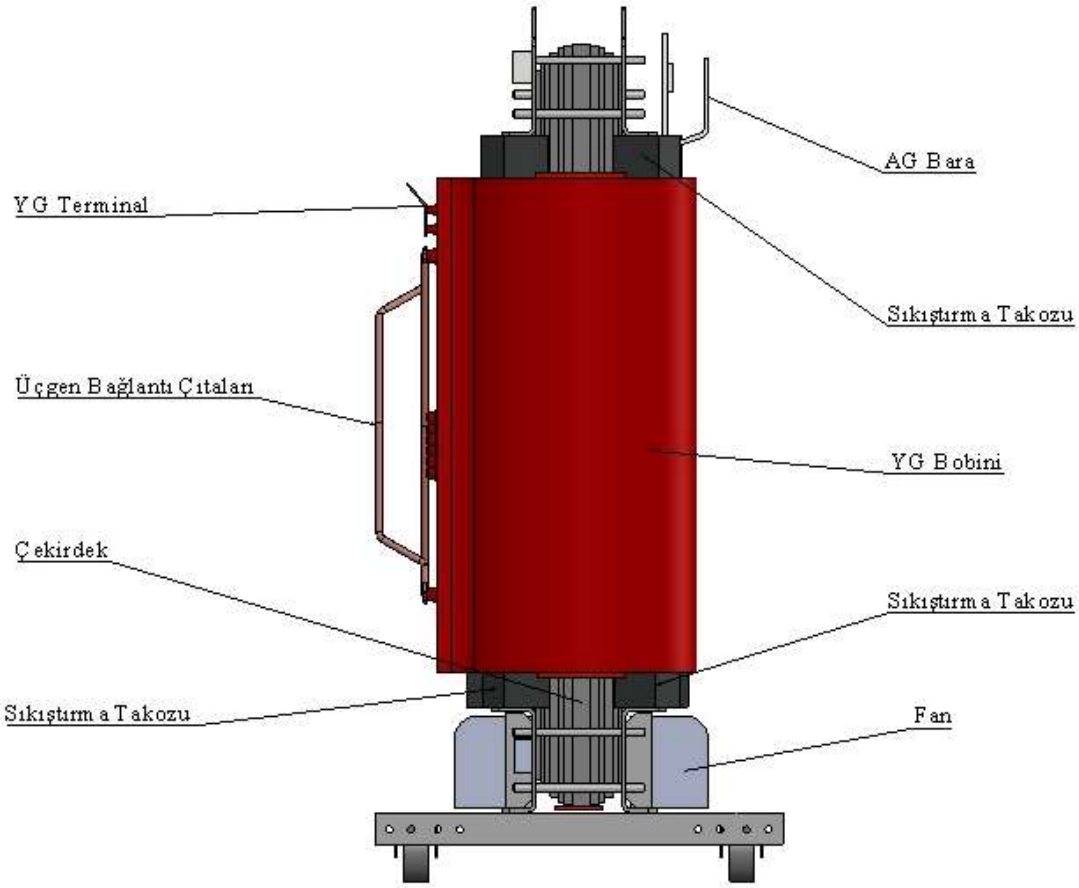
sensörleriyle yapılmaktadır. Fan ilavesi ile transformatör gücü %40 oranında artırılarak çalıştırılabilmektedir [16].



Şekil 3.1: Kuru tip transformatör önden genel görünüş.



Şekil 3.2: Kuru tip transformatör üstten genel görünüş.



Şekil 3.3: Kuru tip transformatör yandan genel görünüş.

3.2 Kuru Tip Transformatör Tasarım Bilgileri

Kuru tip transformatör tasarımı için belli parametrelerin bilinmesi gerekmektedir. Bu parametreler güç, gerilim, bağlantı grubu, iletken çeşidi gibi verilerdir. Diğer tüm parametreler bu ana parametreler üzerine kurularak hesaplanmaktadır. Ana parametrelerin dışında verilen parametreler, tasarım için sınırlayıcı olmaktadır. Uygulanması gereken değerin bilinmesi o değerin kıstas alınması anlamına gelmektedir [16].

Aşağıda teknik özellikleri verilen transformatör örneği üzerinden tasarım süreci takip edilerek, transformatör tasarım hesap süreci, tasarım optimizasyon süreci detaylandırılmaktadır.

Tablo 3.1: Kuru tip transformatör teknik özellikler listesi.

Transformatör Teknik Özellikleri			
	Tip	Birim	Özellikler
1.	Ürün Tipi		Kuru Tip Transformatör
2.	Kullanım Yeri		Bina içi
3.	Gücü	kVA	1600
4.	Primer Gerilimi	kV	20
5.	Sekonder Gerilimi	kV	0,4
6.	Kademe Ayar Aralığı		5 kademe ±2x2,5% (19-19,5-20-20,5-21)kV
7.	Frekans	Hz	50
8.	Faz Sayısı		3
9.	Bağlantı şekli		Dyn5
10.	YG/AG Sargı materyali		AL/AL
11.	Ortam Sıcaklığı	°C	40
12.	Referans Sıcaklık	°C	120
13.	Kısa Devre Empedansı	%	6(±10%)
14.	Boşta Kayıplar(120°C)	W	2200(±0%)
15.	Yükte Kayıplar(120°C)	W	13000(±0%)
16.	Toplam Kayıplar(120°C)	W	15200(±0%)
17.	Garanti Edilen Sargı Sıcaklık Artışı YG/AG		100K/100K
18.	Soğutma Şekli		AN(Doğal Soğutma)
19.	Gürültü Seviyesi	dB	68
20.	Baz Alınan Standartlar		IEC 60076-11
21.	Kısmi Deşarj	pC	≤ 10
22.	İzolasyon Seviyeleri i)Bir dakika süreli şebeke frekanslı dayanma gerilimi ii)Darbe dayanım gerilimi (1.2/50 µ s)	kV	HV/LV 50 / 3 125 / -

Tablo 3.1(devam)**:** Kuru tip transformatör teknik özellikler listesi.

23.	Transformatör Boyutları UzunlukxGenişlikxYükseklik	mm	1887x1166x2044
24.	Transformatör Ağırlığı	kg	4180
25.	Tekerlekler arası mesafe	mm	820
26.	Çevre Sınıfı		E2
27.	İklim Sınıfı		C2
28.	Yangın Sınıfı		F1
29.	Aksesuarlar Tekerlekler, Kaldırma Kulakları, Topraklama Terminalleri, 3 adet Sıcaklık Sensörü, 1 adet Sıcaklık Koruma Rölesi		

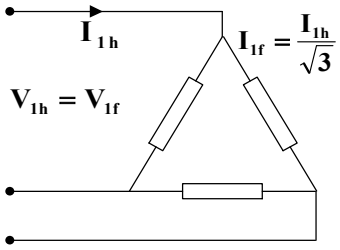
3.2.1 Transformatör Gücü ve Gerilimi

Transformatör gücü, gerilimi, iletken çeşidi ana parametrelerdendir. Tüm süreç güç, gerilim ve iletken çeşidi üzerine kurulmaktadır. Transformatör sargılarında iki çeşit iletken kullanılmaktadır. Alüminyum ya da bakır iletkeni kullanılmaktadır. 3 fazlı transformatörlerde güç ifadesi Eşitlik (3.1)'de belirtilen formülle hesaplanmaktadır:

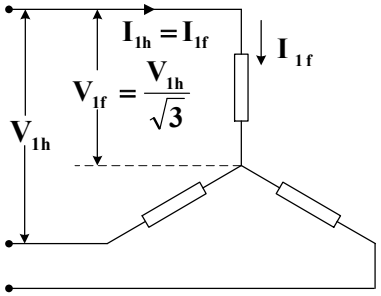
$$S=\sqrt{3}xUxI \tag{3.1}$$

Hat gerilim ve akım değerleri, faz üzerinde bağlantı grubuna göre değişkenlik göstermektedir. Akım değerlerindeki değişim tasarım sürecindeki diğer hesaplamalar için önemlidir. Üç fazlı transformatörlerde 3 çeşit bağlantı kullanılmaktadır. Yıldız, üçgen ve zigzag bağlantı şekilleridir. Alçak gerilim, yüksek gerilim bobinleri bu bağlantı şekillerinden uygun olanı ile bağlanarak bağlantı grubu oluşturulmaktadır.

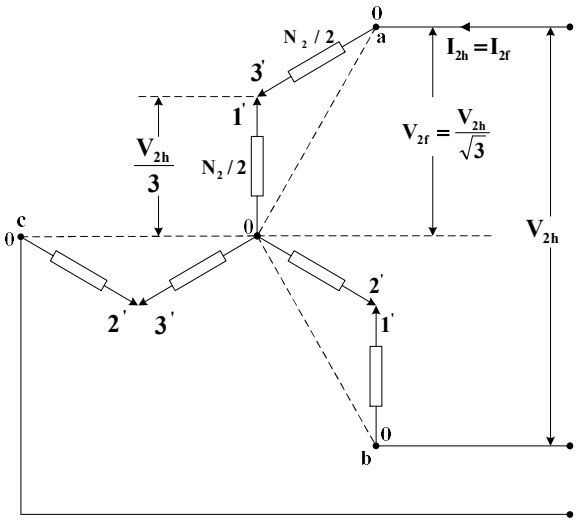
Bağlantı şekillerinin primer üzerinde hat akımından faz akımına ya da hat geriliminden faz gerilimine olan etkisi sırasıyla şekiller üzerinde gösterilmektedir. Hat akımı ve hat gerilimi "h" indisi ile, faz akımı ve faz gerilimi "f" indisi ile gösterilmektedir [18].



Şekil 3.4: Üçgen bağlantı modeli [18].



Şekil 3.5: Yıldız bağlantı modeli [18].



Şekil 3.6: Zig-zag bağlantı modeli [18].

Tasarım çalışmasında faz akımları kullanılmaktadır. Güç formülüne faz akımları bağlantı şekline göre yerleştirildiğinde değişimleri sırasıyla tabloda gösterilmektedir.

Tablo 3.2: Bağlantı şekline göre faz akımı denklemleri.

Bağlantı Şekli	Yıldız	Üçgen	Zigzag
Akım(A)	$I_f = S/(\sqrt{3} \times V_f)$	$I_f = S/(3 \times V_f)$	$I_f = S/(\sqrt{3} \times V_f)$

3.2.2 Akım Yoğunluğu

Transformatörden çekilen akım değeri iletken seçimi için önemlidir. Birim kesite düşen akım değeri, akım yoğunluğu olarak adlandırılmaktadır. Formülü Eşitlik (3.2)'de belirtildiği gibidir.

$$J = \frac{I}{A} \ A/mm^2 \tag{3.2}$$

Akım değerinin artışı kesit değeri ile doğru orantılı değişmektedir. Dolayısıyla akım değerinin artışı ile kesit değeri artmaktadır ve iletken kesitine göre yüzey alanı arttığından iletken tipi değişmektedir. Folyo, yassı, şerit folyo, yuvarlak iletken tiplerinden birisi kullanılabilmektedir.

Alüminyum ve bakır iletken için akım yoğunluğu farklılık göstermektedir. Alüminyum iletkende akım yoğunluğu 1,8 A/mm^2, bakır iletken için 2,8 A/mm^2 akım yoğunluğu kullanılmaktadır. Max akım yoğunluğu iletken çeşidine göre sınırlayıcı bir faktördür. Eşitlik (3.3)'te maximum akım yoğunluğu "Jmax", hesaplanan akım yoğunluğu "J" ifadesi ile belirtilerek formül haline getirilmektedir. Bu sınır aşmadan en uygun iletken tipi seçilmelidir.

$$J < Jmax \tag{3.3}$$

3.2.3 Volt/sipir Değeri

Sipir başına düşen gerilim değeri, volt/sipir olarak ifade edilmektedir. Bu ifade diğer hesaplamaların temelini oluşturmaktadır. Volt/sipir değeri, alçak gerilim ve yüksek gerilim için ayrı ayrı hesaplanabilmektedir. Verilen hesaplamalarda alçak gerilim volt/sipir değeri üzerinden gidilerek diğer hesaplamalara devam edilmektedir. Alçak gerilim " V_{ag} ", alçak

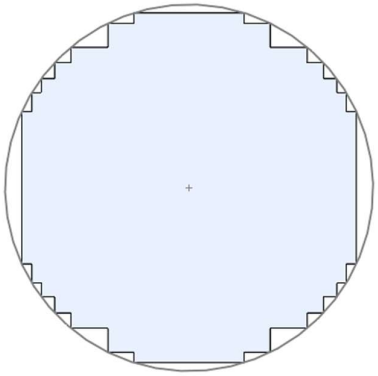
gerilim sipir sayısı " N_{ag} " olarak ifade edilmiştir. Alçak gerilim faz değeri bağlantı şekline göre değişmektedir. Aşağıdaki tabloda alçak gerilim bağlantı şekline göre volt/sipir hesabındaki değişim Tablo 3.3'te ifade edilmektedir:

Tablo 3.3: Bağlantı şekline göre volt/sipir denklemleri.

Bağlantı Şekli	Yıldız	Üçgen	Zigzag
Sipir Başına Düşen Gerilim	volt/sipir = $(V_{ag} /\sqrt{3}) / N_{ag})$	volt/sipir = V_{ag} / N_{ag})	volt/sipir = $(V_{ag}$ x 2/3) / N_{ag})

3.2.4 Doldurma Faktörü

Nüve kesidini oluşturan sacın kesit alanının, kesit etrafına çizilebilecek minimum çember alanına oranına Doldurma Faktörü(SF) adı verilmiştir. Doldurma faktörü 1'den küçük ve genellikle 0,95 ile 0,99 arasında kullanılmaktadır.



Şekil 3.7: Nüve kesiti ile kesit etrafına çizilebilecek minimum çember.

Doldurma faktörünün nüve kesiti hesabında önemli payı bulunmaktadır. Nüve kesiti hesabı, Eşitlik 3.4'te ifade edilmektedir [19].

$$Q_{fe} = \frac{\left(\frac{\text{Volt}}{\text{sipir}}\right)x10^4}{4{,}44x\ f\ x\ B\ x\ (SF)} \tag{3.4}$$

B = Akı Yoğunluğu [Tesla]

SF = Doldurma Faktörü

f = Frekans [Hz]

Q_{fe} = Nüve Kesiti [cm^2]

3.2.5 İndüksiyon

Değişken bir manyetik alan içerisinde bulunan bobinde gerilim endüklenir. Bobinde endüklenen gerilim değeri(E), akı yoğunluğuna(indüksiyon) (B), sarım sayısına(N), frekansa(f), nüve kesitine(Q_{fe}) bağlı olarak değişmektedir.

Endüklenen gerilim formülü transformatör çalışmasının temel prensibini oluşturmaktadır ve aşağıda belirtilmiştir.

$$E=4{,}44 \times N \times B \times f \times Q_{fe} \text{ (Volt)} \tag{3.5}$$

E = Endüklenen Gerilim Değeri [V]

N = Sarım Sayısı

B = Akı Yoğunluğu [Tesla]

f = Frekans [Hz]

Qfe = Nüve Kesiti [cm^2]

Manyetik akı yoğunluğu(B) formülü:

$$B = \frac{\left(\frac{\text{Volt}}{\text{sipir}}\right) x 10^4}{4{,}44 x\ f\ x\ Qfe\ x\ (SF)} \tag{3.6}$$

Üretilecek transformatör çeşidine göre nüvenin doyuma gideceği nokta için maximum manyetik akı yoğunluğu belirlenmektedir. Dizayn edilecek transformatör bu değerin altında kalacak şekilde en uygun kesit değerinde olmalıdır. Hesaplanan akı yoğunluğu “B”, çıkılabilecek maximum akı yoğunluğu “Bmax” belirlenerek Şekil 3.7’de formülize edilmiştir.

$$B \leq Bmax \tag{3.7}$$

3.2.6 Kısa Devre Empedansı

Kısa devre empedansının formülü aşağıdaki gibidir.

$$\%Uk=\sqrt{U_r^2 + U_x^2} \tag{3.8}$$

Ur = Kısa devre empedansı % olarak rezisitif bileşeni
Ux = Kısa devre empedansı % olarak reaktif bileşeni

Kısa devre empedansı garanti değerinin toleransı IEC 60076-11 standardı, Eco Design standardı, Tedaş Mlz şartnamesi vb. standart ve şartnamelerde ifade edilmektedir. Örneğin, IEC 60076-11 standardında belirtildiği gibi %Uk tolerans değeri ±10% ise hesaplanan Uk değeri bu toleransın altında veya üstünde olmayacak şekilde ayarlanmalıdır [20].

$$\%Ukmin < \%Uk < \%Ukmax \tag{3.9}$$

3.2.7 Transformatör Kayıpları

Transformatör kayıpları, boşta ve yükte kayıplardan oluşmaktadır [21]. Toplam kayıp değeri şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$P_{toplam} = P_{boşta} + P_{yükte} \tag{3.10}$$

3.2.7.1 Boşta Kayıplar

Boşta kayıplar transformatörlerin yüksüz(boşta) çalışma halinde oluşan kayıplarıdır [19]. Zamana bağlı değişen manyetik alan içerisinde, akının etkisiyle manyetik malzemeden yapılmış nüvede kayıplar oluşmaktadır. Boşta kayıp değeri, manyetik akı yoğunluğuna, sacın cinsine, nüve ağırlığına, nüve kesim şekline, frekansa bağlı değişkenlerin kayıplarının toplamından oluşmaktadır [22]. Boşta(çekirdek) kayıpları, histerezis ve fuko(eddy) kayıpları ile harici kayıplardan oluşmaktadır. Histerezis kayıpları, akımın manyetik devrede ani

değişimlere bağlı, volt/sipir ve B manyetik alan yoğunluğunun değişmesi ile oluşmaktadır. Fuko(eddy) kayıpları, elektrik akımına karşı demirin gösterdiği dirence bağlı oluşan kayıp değeridir. Harici kayıplar ise, eddy ve fuko kayıpları grubuna girmeyen kaçak diğer kayıplardır [21].

$$P_{boşta} = P_{histerezis} + P_{eddy} + P_{external} \quad (3.11)$$

Boşta kayıp değerleri Steinmentz denklemine göre akı yoğunluğu ve frekansa bağlı değişken üzerinde katsayılarla ifade edilebilmektedir. Histerezis kayıp katsayısı k_h, girdap(eddy) akımlarının oluşturduğu kayıp katsayısı k_e ve bunların dışında nüvede oluşan kayıpları ifade eden katsayı k_a olarak ifade edilmektedir. Katsayılara bağlı oluşturulan denklem şu şekildedir [12]:

$$Pboşta = k_h . f . B^n + k_e . f^2 . B^2 + k_a . f^{1.5} . B^{1.5} \quad (3.12)$$

3.2.7.2 Yükte Kayıplar

$$Pk = Pdc(\text{referans sıcaklığa göre}) + Pac + Pstray \quad (3.13)$$

Doğru akım kayıpları(DC), akımın karesiyle orantılı olarak sargı direncine bağlı (I^2.R) oluşan kayıplardır. Eşitlik (3.13)'te "Pdc" olarak gösterilmektedir. Kayıplar referans sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Alüminyum ya da bakır olmasına göre referans sıcaklıktaki sabit değişmektedir.

Alternatif akım kayıpları(AC) ve stray(başı boş) kayıplar, akı nüve üzerinden devresini tamamlarken sargılarda oluşan kaçak akıların oluşturduğu kayıplardır. Boşta ve yükte kayıplara göre oranla daha azdır. Eşitlik (3.13)'te alternatif akım kayıpları "Pac" olarak, stray kayıpları "Pstray" olarak ifade edilmiştir.

3.2.8 Transformatörde Isınma

Transformatörde çalışma sırasında oluşan toplam kayıplar temel ısı kaynağıdır. Kayıplar, boşta ve yükte olmak üzere ikiye ayrılır. Bu kayıplar çekirdek, sargılar üzerinde oluşan

kayıplardır. Dolayısıyla transformatör çalışma sırasında buralarda ısı transferi gerçekleşmektedir [23].

Doğal konveksiyon ve ışıma ile çekirdekte ısı transferi gerçekleşirken, doğal konveksiyon, iletim ve ışıma ile sargılarda ısı transferi gerçekleşmektedir [23].

3.2.8.1 Doğal Konveksiyon(Taşınım) ile Isınma

Enerji, sıvı ve gaz gibi akışkanlarda konveksiyon yoluyla aktarılmaktadır. Transformatördeki konveksiyon, katı yüzey ile gaz arasında gerçekleşen enerji aktarım türüdür [24]. Çekirdek ve sargılarda en önemli ısı transferi doğal konveksiyonla ısı transferi olarak kabul edilmektedir [23].

Sıcaklık farkı ortaya çıktığında yoğunluk farkının doğurduğu kaldırma kuvvetinin etkisi ile taşınım gerçekleşmektedir [24]. Konveksiyonla ısı transfer katsayısı "h" olarak ifade edilmektedir. Fakat "h" katsayısı gaz ya da katının özelliği değil, deneysel olarak ve sayısal hesaplamalara dayanan bir değerdir. Konveksiyon ile ısı transferi Eşitlik (3.12) formülize edilmektedir [25].

$$q''conv = h.\ A_s.\ (T_s - T_{air}) \tag{3.12}$$

T_s = Yüzey lokal sıcaklığı (K)

T_{air} = Ortam sıcaklığı (K)

h = Dış yüzey için ısı transfer katsayısı (W/m^2K)

A_s = Yüzey alanı (m^2)

q"conv = Isı transfer oranı m(W/m^2)

Formül içerisinde önemli değişken olan "h" ısı transfer katsayısının değişimi bazı parametrelere dayanmaktadır. Katsayıda değişime sebep olabilecek parametreler şu şekilde maddelendirilebilmektedir:

- Taşınımın sebep olan gazın(akışkanın) teknik özellikleri (viskozite, ısıl iletkenlik katsayısı, yoğunluk, ısı kapasitesi),
- Taşınımın sebep olan gazın(akışkanın) hızı,
- Enerji akış hareketinin tabiatına (laminar, türbülanslı),

- Taşınımın gerçekleştiği yüzeyin geometrisine bağlı olarak değişmektedir.

3.2.8.2 Işıma(Radyasyon) ile Isınma

Radyasyon ile ısı transferinde, atom veya moleküllerin yapılarında gerçekleşen değişiklik enerji akışına sebep olmaktadır. Radyasyon ile ısı transferinde, enerji akışı elektromanyetik dalgalar yoluyla yayılmaktadır. Konveksiyon ve kondüksiyonla ısı transferinden farklı olarak aracı bir ortama ihtiyaç duyulmamaktadır ve diğer transfer çeşitlerine göre en hızlı olandır. Radyasyon ile ısı transferine en güzel örnek, güneş enerjisinin yeryüzünü ısıtmasıdır [25]. Işıma ile ısı transferi, bütün katı, sıvı, gazlarda gerçekleşebilmektedir. Katılarda ise genellikle yüzey olayı olarak anılmaktadır [24]. Transfromatörlerde ışıma ile ısı transferi ile sargılar ve çekirdeğin dış yüzeyinde gerçekleşmektedir. Işıma ile ısı transferi Eşitlik (3.13)'deki gibi hesaplanabilmektedir [23].

$$q''r = \varepsilon_6 . F_{ij} . (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.13)$$

q"r = Radyasyon ısı transferi oranı m(W/m^2)
ε=Yüzey yayma katsayısı
Ϭ=Stephan Boltzman katsayısı ($5{,}67.10^{-8}$ W/m^2K^4)
F_{ij}=Görüş faktörü
T_1^4=İlk yüzey sıcaklığı (K)
T_2^4=İkinci yüzey sıcaklığı ya da hava sıcaklığı (K)

3.2.8.3 İletim(Kondüksiyon) ile Isınma

Yüksek enerjili parçacıktan düşük enerjili parçacığa, maddenin içerisinde gerçekleşen enerji akışıdır. İletim ile ısı transferi bütün katı, sıvı ve gazlarda görülebilmektedir. Katılarda, serbest elektronlarla ya da atom veya moleküllerin titreşmesi ile meydana gelmektedir [25]. Transformatörün sargılarında gerçekleşen bir diğer ısı transfer çeşididir. İletim ısı transferi hesabı Eşitlik (3.14)'te verilmektedir[23]:

$$q = -k . A . \frac{\partial T}{\partial x} \ (W/m^2) \quad (3.14)$$

q = İletim ile ısı transfer oranı (W/m^2)

k = Havanın iletkenlik katsayısı (W/m. K)

A = Yüzey alanı (m^2)

T = Yüzey sıcaklığı (K)

3.2.9 Transformatörde Yalıtım Sistemi

Belirtilen ısı transfer yöntemleri ve hesaplarıyla kuru tip transformatör sıcaklık hesabı yapılmaktadır. Tasarımın optimum olması için nüve ve sargılardaki sıcaklık değeri izolasyon sınıfında tanımlandığı şekilde olmalıdır.

Tablo 3.4: IEC 60076-11'e göre yalıtım sınıfları [20].

Yalıtım Sistemi Termal Sınıfı °C	Nominal Akımda Ortalama Sargı Sıcaklığı Artış Limitleri K
105(A)	60,0
120(E)	75,0
130(B)	80,0
155(F)	100,0
180(H)	125,0
200(N)	135,0
220(R)	150,0
250,0	175,0

Tablo 3.4'te verilen değerler IEC 60076-1'de de belirtildiği gibi 40°C ortam sıcaklığı için tanımlanmıştır [26]. Harfler, IEC 60085'te verilen sıcaklık sınıflandırmalarına atıfta bulunmaktadır [27]. IEC 60076-11'de madde 14.3.2'ye göre ölçülen sıcaklık artışı belirlenmiştir [20]. Yalıtım sistemi termal sınıfı 250°C' nin üzerindeki gösterimlerinde 25°C' lik artışlarla belirtilmeli ve buna göre sıcaklık artış değeri belirlenmelidir.

3.2.10 Transformatörde İzolasyon Seviyeleri

Transformatörlerde temel olarak belirtilen kavramlardan olan nominal gerilim değeri yalnızca teknik hesaplamalarda kullanılmaktadır. Optimum açıklık değerinin bulunabilmesi için IEC 60076-11'de belirtilen izolasyon seviyeleri önemli rol oynamaktadır [20]. Nominal gerilim seviyesine göre uygulanan gerilim ve yıldırım darbe gerilim değeri Tablo 3.5'te verilmektedir.

Tablo 3.5: IEC 60076-11'e göre izolasyon seviyeleri [20].

Nominal Gerilim(rms) kV	Uygulanan Gerilim(rms) kV	Yıldırım Darbe Gerilimi(pik değer) kV	
		Liste 1	Liste 2
≤1,1	3	-	-
3,6	10	20	40
7,2	20	40	60
12,0	28	60	75
17,5	38	75	95
24,0	50	95	125
36,0	70	145	170
40,5	80	170	200
52,0	95	200	250
72,5	140	250	325

Tabloda belirtilen değerler minimum olarak baz alınan değerlerdir. Transformatör son kullanıcısı, nominal gerilim değerine göre daha üst seviyede uygulanan gerilim ve yıldırım darbe gerilim değeri istenebilmektedir. Örneğin, 36kV nominal gerilime sahip transformatör için 80kV Uygulanan Gerilim değeri, 200kV (Liste 2'ye göre) Yıldırım Darbe Gerilim değerinde izolasyon seviyesi istenebilmektedir. Bu durumda 36kV nominal gerilim seviyesindeki transformatör 70kV/170kV izolasyon seviyesine uygun üretilmesi beklenirken 80kV/200kV izolasyon seviyesine uygun üretilir. Dolayısıyla transformatörün oluşabilecek arızalara karşı daha dayanıklı olması beklenmektedir.

Uygulanan gerilim ve yıldırım darbe gerilimi faz-toprak arası mesafelerle ilişkilidir. Dolayısıyla Şekil 4.2'de gösterilen transformatör açıklığı, izolasyon seviyeleri ile doğrudan bağlantılıdır. İzolasyon seviyesi arttıkça gerilimin sağlanabilmesi için açıklık değerinin de artması beklenmektedir.

Tez çalışmasında, nominal gerilim seviyesinde Tablo 3.5'te belirtilen ya da spesifik olarak istenen Uygulanan Gerilim ve Yıldırım Darbe Gerilim izolasyon seviyelerini sağlayabilecek optimum açıklık üzerine değinilmektedir.

3.2.11 Transformatör Tasarımında Optimum Tasarımı Belirleme

Standart bir kuru tip transformatör tasarımında optimum tasarımın yapıldığını anlayabilmek için öncelikli olarak sınır koşulları bilinen değerlerin bu sınır koşullarını geçmeyecek seviyede olması gerekmektedir. Tablo 3.1'de 1600kVA transformatörün teknik özelliklerinde garanti edilen parametreleri geçmeyecek şekilde dizayn yapılmaktadır. Sargı sıcaklık artışı(T), yüzde kısa devre gerilimi(%Uk), boşta kayıp değeri(Po) ve yükte kayıp değeri(Pcu) parametreleri teknik özellikte garanti edilen parametrelerden bazılarıdır. Teknik özellikte belirtilmeyip iletken tipine, sac tipine, transformatör spesifik özelliğine göre uyulması gereken bazı sınır koşullar bulunmaktadır. Tablo 3.1'de belirtilen akım yoğunluğu(J) ve akı yoğunluğu(B) bu parametrelerdendir. Standart bir kuru tip transformatör tasarımı için bu sınır koşulların sağlanması ilk etapta yeterlidir ve Tablo 3.6'da gösterilmektedir. Fakat son kullanıcının transformatör tasarımı şartnamesi mevcut ise ve şartnamede başka sınır koşullar belirtildi ise bu koşullar da çalışmanın uygunluğuna etki etmektedir. Örneğin, son kullanıcının transformatörü kullanacağı kapalı alan boyutları belli ve satın alınacak transformatör bu alana uygun seçilmesi istenmektedir. Bu durumda, transformatör dizayn koşullarına yeni bir parametre eklenerek, boyut sınırlandırması koşuluna uygun çalışma yapılması beklenmektedir. Aynı durum, transformatör ağırlığı, transformatör çalışma koşulları(>1000m yükselti, -25°C ortam sıcaklığı, transformatör kullanım amacına(solar transformatör, rüzgar türbini transformatörü, topraklama transformatörü, generatör transformatörü vb.) göre de yeni sınır koşullarını gündeme getirmektedir.

Tablo 3.6: Transformatörde optimum dizayn sınır koşulları.

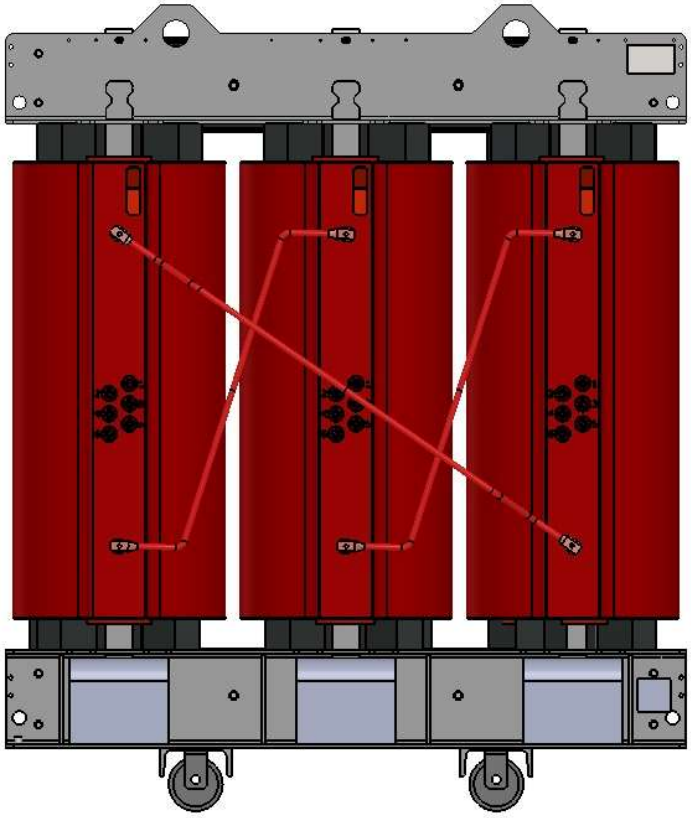
Dizayn Sınır Koşulları	Primer Taraf	Sekonder Taraf
Akım Yoğunluğu	Jmin <J < Jmax	Jmin <J < Jmax
Sargı Sıcaklık Artışı	T≤Tmax	T≤Tmax
Akı Yoğunluğu	B ≤ Bmax	
Yüzde Kısa Devre Gerilimi	%Ukmin < %Uk < %Ukmax	
Garanti Edilen Boşta Kayıp Değeri	Po≤Pomax ya da Po<Pomax	
Garanti Edilen Yükte Kayıp Değeri	Pcu≤Pcumax ya da Pcu<Pcumax	

Sınır koşullarını belirleyen en önemli faktör ise maliyettir. Standart kuru tip transformatör tasarımı sınır koşullarına uymak kaydıyla, parametreler kendi içinde değiştirilerek(sınırların altında kalacak şekilde) çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Koşulları sağlayan çalışmalar kıyaslanarak içlerinde en uygun maliyete sahip çalışma ile devam edilmektedir. Maliyeti etkileyen, gerektiğinde çalışmaların güncellenmesine sebep olan faktör ise transformatörün üretiminde kullanılan malzeme birim maliyetlerinin her geçen gün değişmesidir. Dolayısıyla birim maliyet hangi malzeme için düşük ise, o günün koşullarında bunun dikkate alındığı çalışma en uygun maliyeti vermektedir.

Bölüm 4'te açıklanan transformatörde açıklık değerlerinin optimum olması da dizaynın optimum değerde olmasına katkı sağlamaktadır. Kuru tip transformatörlerde açıklıkların tasarıma etkisi Bölüm 4.3'te açıklanmaktadır.

4. KURU TİP TRANSFORMATÖRLERDE DİELEKTRİK MESAFELER

Kuru tip transformatör tasarımı bazı temel dielektrik mesafeler (açıklıklara) bağlıdır. Dizaynı etkileyen bu açıklıklara izolasyon seviyesine uygun değerler verilmektedir. Tasarımda optimumu yakalamak için açıklıklara minimum değerler verilmektedir. Tasarıma bağlı olarak değerlerin üzerine çıkılabilir fakat altına düşülememektedir.



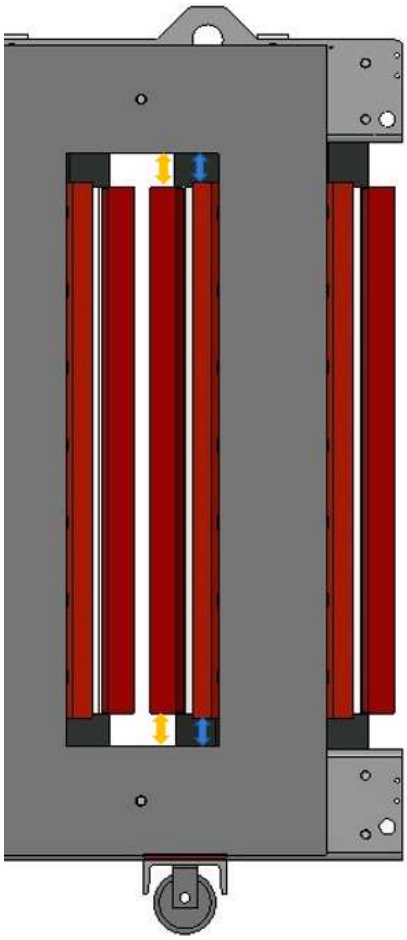
Şekil 4.1: Kuru tip transformatör önden görünüm.

Transformatör dizaynı izolasyon mesafeleri için Tablo 3.5'te verilen izolasyon seviyeleri dikkate alınmaktadır. IEC 60076-11 standardına göre tabloda nominal gerilimine karşılık gelen yıldırım darbe gerilim değeri ve uygulanan gerilim değerinin sağlanması beklenmektedir [20]. Örneğin, transformatör yüksek gerilimi 6,3kV için tabloda karşılık

gelen 7,2kV anma gerilimi dikkate alınmaktadır. 7,2kV anma gerilimine karşılık gelen 20kV uygulanan gerilim testi için, 60kV yıldırım darbe testi için sağlanması beklenmektedir.

4.1 Çekirdek ve Bobinler Arası Dikey Mesafeler

Transformatör alçak gerilim ve yüksek gerilim bobinleri, pencere yüksekliği dikkate alınarak izolasyon seviyesine göre belirlenen mesafelerde açıklık bırakılarak yerleştirilmektedir. Açıklıklar Şekil 4.2'de renkli oklarla gösterilmiştir.

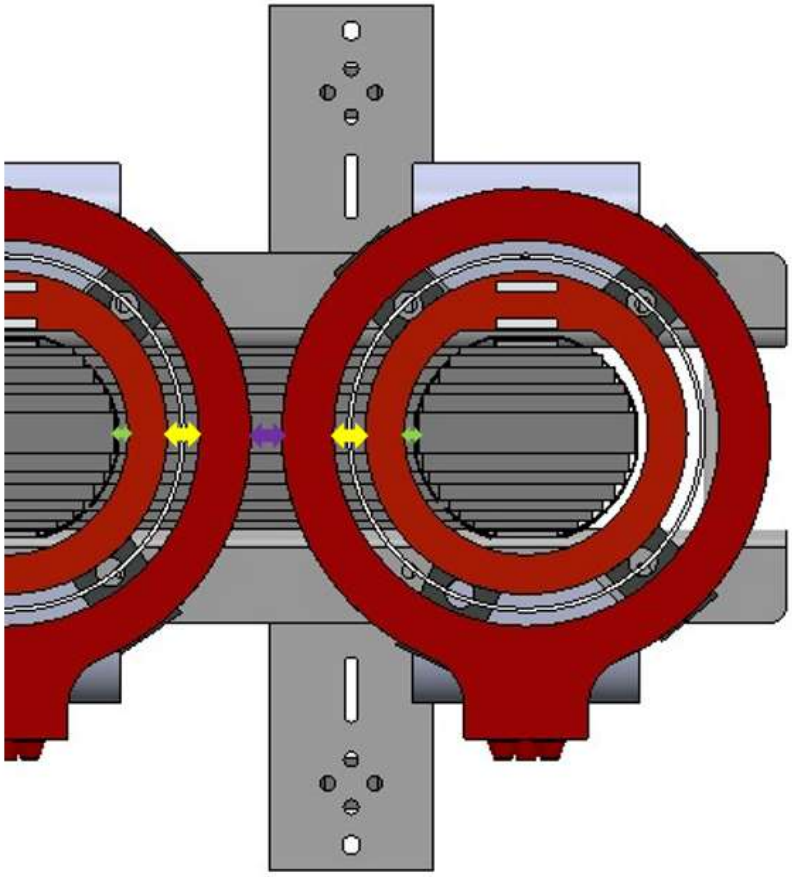


Şekil 4.2: Kuru tip transformatör önden kesiti.

Turuncu ok ile gösterilen yüksek gerilim bobini ile nüve arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Mavi ok ile gösterilen ise alçak gerilim bobini ile nüve arasındaki mesafeyi ifade etmektedir.

4.2 Çekirdek ve Bobinler Arası Yatay Mesafeler

Transformatör alçak gerilim ve yüksek gerilim bobinleri nüve bacaklarına yerleştirilirken izolasyon seviyesine göre belirlenen mesafelerde açıklık bırakılarak yerleştirilmektedir. Çekirdek ile bobin, alçak gerilim/yüksek gerilim bobinleri arası ve yüksek gerilim/yüksek gerilim bobinleri arası açıklıklar bırakılmaktadır. Açıklıklar Şekil 4.3'de renkli oklarla gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Kuru tip transformatör üstten kesiti.

Yeşil ok ile gösterilen alçak gerilim bobini ile nüve arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Sarı ok ile gösterilen alçak gerilim bobini ile yüksek gerilim bobini arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Mor ok ile gösterilen ise yüksek gerilim bobini ile yüksek gerilim bobini arasındaki mesafeyi ifade etmektedir.

4.3 Kuru Tip Transformatördeki Açıklıkların Tasarıma Etkisi

Bölüm 4.1'de ifade edilen çekirdek ve bobinler arası dikey açıklıkların minimum ya da maksimum seviyede kullanılması, öncelikli olarak pencere yüksekliğini dolayısıyla nüve boyutlarını ve ağırlığını etkilemektedir. Benzer şekilde Bölüm 4.2'de ifade edilen çekirdek ve bobinler arası yatay açıklıkların minimum ya da maksimum değer alması, bobin çaplarını etkilemektedir. Bobinlerin çapının artması aynı zamanda ağırlığının artmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla açıklıkların en uygun minimum değerde olması dizaynı optimize etmektedir. Daha küçük boyutlar, daha az ağırlık, daha az malzeme kullanılacağı anlamına gelmektedir ve maliyeti düşürmektedir. Ağırlıktan kazanılan maliyet haricinde açıklıkların minimum değerde kullanılması, Tablo 3.6'da aktarılan optimum dizayn koşullarının sağlanmasında da maliyet kazandırmaktadır. Açıklığın minimum değerde kullanılarak tasarlanacak transformatör maliyeti ile maksimum değerde kullanılarak tasarlanacak transformatör maliyeti arasında da diğer faktörler dolayısıyla ciddi fiyat farkı oluşmaktadır. Minimum açıklık tercihinde bobin ve nüvelerden kazanılan ağırlık farkının maliyeti ön kazanım iken, optimum dizayn koşullarının getirdiği maliyet farkı devamı niteliğindeki diğer maliyet kazanımları olarak nitelendirilebilmektedir.

5. KURU TİP TRANSFORMATÖR TESTLERİ

Transformatör testleri, tasarım için baz alınan standartların kontrolü, müşteri tarafından verilen spesifikasyonların kontrolü için yapılmaktadır ve tasarımın uygunluğu da doğrulanmış olur. Transformatör testlerinde, transformatörün çalışma esnasındaki yalıtım dayanımı, performansı ve işletme karakteristiği belirlenmektedir [28].

Transformatör testlerinde temel alınan standartlar, IEC(International Electrotechnical Commision), ANSI(American National Standard Institution) ve IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)' dir [28].

Tüm transformatör deneyleri ile ilgili genel bilgiler en genel hatlarıyla IEC 60076-1'de belirtilmektedir. Transformatör testleri uygulamada rutin testler, tip testleri ve özel testler olmak üzere üç başlıkta incelenmektedir. Rutin Testler, imal edilen her transformatöre uygulanmaktadır. Tip Testler, seri halinde üretilen aynı teknik özelliklere sahip transformatörler içerisinden rastgele seçilerek birine yapılmaktadır. Özel Testler, bu testlerin dışında kalan müşteri isteğine bağlı yapılan testlerdir [26]. Dolayısıyla imal edilen transformatörün işletme koşullarında sağlıklı bir şekilde çalışabilmesinin ön koşulu rutin testler ile sağlanmaktadır. Transformatör dayanıklılığı, çalışma performansı, üretim ve dizayn kalitesi öncelikli olarak rutin testlerle belirlenmektedir. Kuru tip transformatör özelinde uygulanan testler IEC 60076-11 standardında açıklanmaktadır [20].

5.1 Rutin Testler

IEC 60076-11 standardında kuru tip transformatör rutin testleri şu şekilde belirtilmektedir [20]:

- Gerilim Oranının Ölçülmesi ve Faz Yer Değiştirmesinin Kontrolü
- Sargı Direncinin Ölçülmesi
- Kısa Devre Empedansının ve Yük Kayıplarının Ölçülmesi
- Boşta Kayıpların ve Akımın Ölçülmesi
- Uygulanan Gerilim Deneyi
- İndüklenen Gerilim Deneyi
- Kısmi Deşarj Ölçülmesi

5.1.1 Gerilim Oranının Ölçülmesi ve Faz Farkının Kontrolü

- Testin amacı, bağlantı noktalarının kontrolü, gerek sargıların gerekse bağlantıların durumunun belirlenmesi, boşta gerilim yüzdesinin doğruluğunun ispatlanması amacıyla yapılmaktadır. Transformatörde hata durumunun ilk sinyalleri bu test ile verilmektedir [28].
- Testin yapılışında, nominal kademede çalışırken primerden (DC) gerilim verilerek sekonderden değer ölçülmektedir [26].
- Primer ve sekonder gerilimleri oranlanarak çevirme oranı belirlenmektedir [26].

Teorik çevirme oranı = YG sargı gerilimi / AG sargı gerilimi (5.1)

- Boşta çevirme oranındaki sapma ≤ % 0,5 olması beklenmektedir [26].
- Deney sonucuna göre fazla ya da eksik sipir, tel kopukluğu olup olmadığı anlaşılmaktadır. Sapma pozitif yönde ise fazla sipir sarıldığı, negatif yönde ise eksik sipir sarıldığı anlaşılmaktadır [28].

$$\text{Sapma} = \frac{(\text{Ölçülen çevirme oranı}) - (\text{Olması gereken çevirme oranı})}{\text{Olması gereken çevirme oranı}} \times \%100 \quad (5.2)$$

5.1.2 Sargı Direncinin Ölçülmesi

- Testin amacı, transformatör sargı ve terminal bağlantılarının kontrolü amacıyla yapılmaktadır [28].
- Bu testten elde edilen veriler daha sonraki ölçümlerde referans olarak kullanılmaktadır. Yükte kayıp hesabı için önemli parametre oluşturmaktadır [28].
- Uygulama aşamasında boşta akımın 1,2 katından büyük (1,2xIo), nominal akımın 0,1 katından (0,1xIn) küçük değere sahip DC akım verilmektedir. Verilen akım ile sargıda bir gerilim endüklenir ve direnç değerleri I=V/R formülünden bulunmaktadır [28].

5.1.3 Kısa Devre Empedansının ve Yük Kayıplarının Ölçülmesi

- Transformatörün kısa devre kayıpları ve kısa devre gerilimi, işletmede çalışma sırasında oluşan parametreleridir. Dolayısıyla transformatörün çalışma performansını belirlemektedir [29].
- Teknik özellik sayfasında garanti edilen kısa devre kayıplarına göre işletme ömrü boyunca maliyet getireceği düşünülmektedir. Kullanım süresi boyunca transformatörün kayıplarına işletme maliyeti getirmektedir. Dolayısıyla işletme ekonomisini doğrudan etkileyen bir parametredir [28].
- Parelel çalışma koşullarına bakıldığında, kısa-devre gerilimi birlikte çalışacak transformatörler için aynı olması gereken bir parametredir [29].
- Transformatör kısa devre kayıp değerleri, ısınmayı doğrudan etkileyen bir veridir [28].
- Kısa-devre gerilimi, sargılardan birisi kısa devre edilirken diğer sargıdan nominal akımın akmasını sağlayan gerilim değeridir [28].
- Kısa-devre kayıpları, transformatör çalışma durumunda nominal akımın sargıda oluşturduğu DC kayıpları (doğru akım) ile kaçak akılarının aktif kısım ve kazan duvarlarında oluşturduğu AC kayıplarından (alternatif akım) meydana gelmektedir.
- Ölçülen toplam kısa devre kayıp (Pkm) değerleri, AC ve DC olarak basit hesabı için alçak gerilim sargıları "AG", yüksek gerilim sargıları "YG" kısaltması ile belirtilerek ölçme sıcaklığındaki(t_m) formülü aşağıda verilmektedir [29].

$$\text{Doğru akım(DC) kaybı} = Pdc = 1{,}5.(I^2.R_{YG} + I^2.R_{AG}) \quad (5.3)$$

$$\text{AC / Ek kayıplar} = Pac = Pkm - Pdc \quad (5.4)$$

Referans (75°C) sıcaklığındaki kayıplar:

$$Pk = Pdc \cdot \frac{t_R + 75°C}{t_R + t_m} + Pac \cdot \frac{t_R + t_m}{t_R + 75°C} \quad (5.5)$$

t_R: 235°C Bakır için (IEC 60076-1'e göre)

225°C Alüminyum için (IEC 60076-1'e göre)

Ölçme sıcaklığında(t_m) kısa devre gerilimi :

$$U_{KM} = 100 \cdot \frac{U_{KM}}{U_N} \% \quad (5.6)$$

" omik/DC " bileşen; $U_{RM} = 100 \cdot \frac{P_{KM}}{S_N} \%$ (5.7)

" endüktif/AC " bileşen; $U_{XM}\% = \sqrt{U_{KM}^2 - U_{RM}^2}$ (5.8)

Kısa devre kayıpları ve kısa-devre gerilimleri ölçme, hesaplama ve düzeltme işlemleri anma kademesi ile en yüksek ve en düşük kademelerde yapılmalıdır.

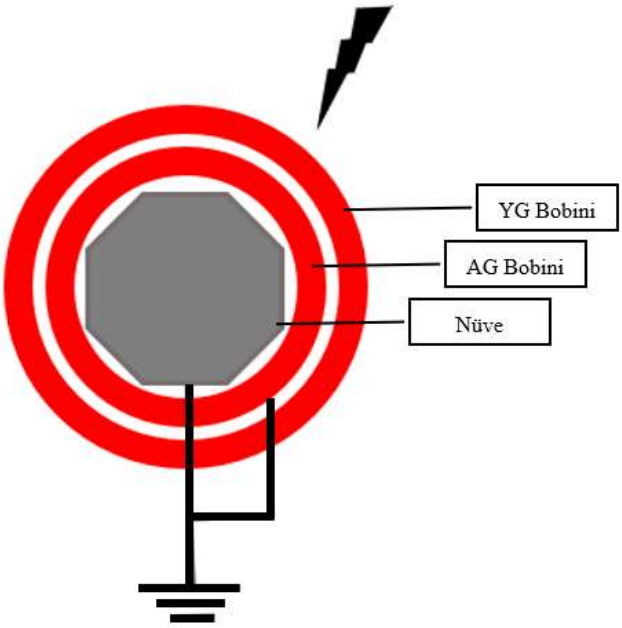
5.1.4 Boşta Kayıpların ve Akımın Ölçülmesi

- Boşta kayıplar, kısa devre kayıp değerleri gibi kullanım süresi boyunca işletmeye getirecek maliyetler açısından önemli bir parametredir. Dolayısıyla transformatörün çalışma performansını belirlemektedir ve işletme ekonomisi açısından önemlidir [28].
- Kısa devre kayıplarında olduğu gibi transformatör boşta çalışma kayıp değerleri ısınmayı doğrudan etkileyen bir veridir [29].
- Transformatörde boştaki kayıp ve akımı ölçümü, sargı çiftlerinden biri (genellikle yüksek gerilim sargısı) boşta tutulurken diğer sargının anma gerilimi ve frekansında beslenmesi ile yapılır [29].
- Bu test sırasında boşta akım (Io) ile boştaki kayıplar (Po) ölçülmektedir [28].

5.1.5 Uygulanan Gerilim Deneyi

- Yalıtım testlerinden biridir. Testin amacı, alçak gerilim yüksek gerilim bobinleri arası hava boşlukları, topraklanmış olan çekirdek ile bobinler arası, konstrüktif parçaların yalıtımı ve dayanımının ön görülen test gerilimi ile kontrolüdür [30].
- Bu test ile, işletmede transient durumundaki aşırı yüklenmede, çalışma esnasında oluşabilecek dengesizlik durumunda, sistemde arıza oluşması durumunda ve sistemin yapısından kaynaklanan hatalarda transformatör yalıtımının dayanımının kontrolü yapılmaktadır [29].
- Test yapılırken, test edilecek sargılar (yüksek gerilim bobinleri) kısa devre edilmektedir, test edilmeyen sargılar (alçak gerilim sargıları) ve nüve topraklanmaktadır [30]. Yüksek gerilim sargılarından IEC 60076-11'de belirtilen değerde gerilim

uygulanmaktadır. Testte uygulanan model basitçe aşağıda şematik olarak gösterilmiştir [20]. Temsili nüve iç tarafa yerleştrilip dışına alçak gerilimi bobini ve en dışa yüksek gerilimi yerleştirilmiştir.



Şekil 5.1: Uygulanan gerilim deneyi basit modeli.

- Transformatör uygulanan gerilimi için IEC 60076-11'de yüksek gerilim nominal gerilimine göre verilen izolasyon değerleri kullanılmaktadır [20]. Örneğin tablo 3.1'de teknik özellikleri verilen 1600kVA 20/0,4kV için tablo 3.4'de belirtilen izolasyon seviyesine göre yüksek gerilim bobinine 50kV gerilim uygulanmaktadır.
- Test frekansı anma frekansı ile aynı değerde ya da %80'inden az olmayacak değerde olmalıdır [30].
- Test gerilimi %25'den az değerde başlatılmalıdır, kademe kademe artırılarak tam seviyeye ulaştırılarak 1 dakika bu seviyede tutulmalıdır. 1 dakika sonunda gerilim hızla düşürülmelidir [30].
- Testin sonucunda, atlama olmaması ve üst seviyede gürültü oluşmaması beklenmektedir. Bu durumlar oluşmadığı sürece test başarılı kabul edilmektedir [28].

5.1.6 İndüklenen Gerilim Deneyi

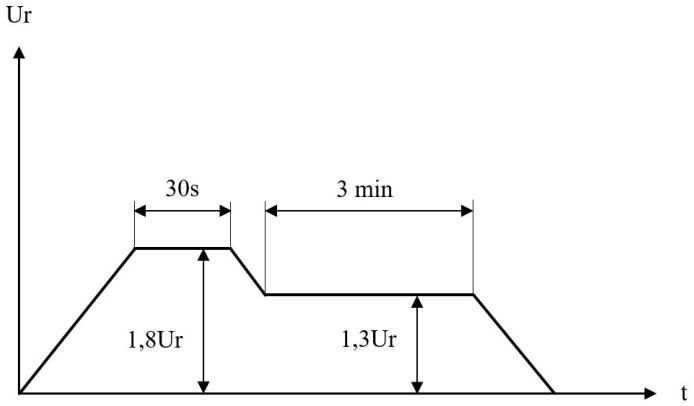
- Yalıtım testlerinden biridir. Testin amacı, giriş terminalleri ile topraklanmış kısmın yalıtımının kontrolü, fazlar ve sarımlar arası yalıtımının kontrolü ile bobinler arası yalıtımının kontrolü için yapılmaktadır [29].
- Test sırasında, gerilimin az olduğu (genellikle alçak gerilim) sargıya test gerilimi uygulanır, kalan sargı uçları açıkta bırakılarak topraklanmaktadır [28].
- Testte verilen gerilim değeri anma geriliminin iki katıdır [26]. Test gerilimi, anma geriliminden yüksek olduğu için nüvenin aşırı doyuma gitmesi ihtimali mevcuttur. Bu durumu engellemek için testte verilen frekans anma frekansın iki katından yüksek verilmelidir [28].
- Test süresi 15 saniyeye eşit ya da yüksek olması gerekmektedir. Hesaplanma şekli aşağıda belirtilmektedir [30].

$$\text{Test Süresi} = 120 \text{ saniye} \times (\text{Anma frekansı} / \text{Test frekansı}) \quad (5.9)$$

- Endüklenen gerilim testinde gerilim seviyesinin iki katı verilmesinden sonra aynı koşullarda kısmi deşarj ölçümü olarak teste devam edilmektedir.

5.1.7 Kısmi Deşarj Ölçülmesi

- Kısmi deşarj, transformatör yalıtımında rastgele bir bölgede elektrotlar arası etkileşim ile atlama meydana getiren elektriksel boşalmadır. Katı yalıtım malzemesindeki boşluklardan kaynaklanabileceği gibi, yalıtılmış ortam hava kabarcıklarından da kaynaklanabilmektedir [30].
- Kısmi deşarj kaynakları, sivri nokta, bobin üzerindeki kirler, tozlar, kılcal çatlaklar, vakum, korona, topraklanmamış nüve vb. olarak gösterilebilmektedir [28].
- Anma gerilimi kademe kademe 1,8 katına çıkılarak 30saniye beklenir, sonrasında 1,3katına indirilerek 3 dakika beklenerek ölçüm yapılmaktadır [26]. Ölçüm değerleri IEC 60076-11'e göre 10pC'u geçmemelidir [20], [28].



Şekil 5.2: Kısmi deşarj deneyi uygulama grafiği [28].

6. KATI YALITKANLAR

Katı yalıtkanlar, farklı mekaniksel, kimyasal, ısıl yapıya ve çevresel faktörlere sahip bulunabilmektedir [31]. Yapıları, organik-inorganik, doğal-yapay, tekil ya da kompozit olabilmektedir. Katı yalıtkanlar genel olarak yüksek dielektrik dayanıma, düşük dielektrik kayıplara sahip ve mekanik özellikleri bakımından dayanıklıdır. Elektriksel sistemlerde yalıtım malzemesi olarak çok sayıda katı yalıtkan kullanılmaktadır. Kullanım şekillerine göre çeşitleri şu şekildedir [32]:

- Kalıp malzemeleri (İzolatör, buşing gibi yalıtım malzeme yapılarında bulunan cam elyaf, cam elyaf takviyeli plastikler, cam, seramik, epoksi reçine vb.)
- Kılıf Malzemeleri (Güç kablolarında kullanılan polietilen, PVC, doğal ve sentetik kauçuklar, kondansatör ve transformatörde kullanılan polipropilen, kağıt yalıtkanlar, elektrik makinalarında kullanılan mika, fiberglass bazlı polipropilen bantlar vb.)
- Dolgu Malzemeleri (Güç kablolarında, transformatörlerde, kondansatörlerde dielektrik kağıdın emprenye olması için kullanılan yağ vb.)
- Mekanik Destek Malzemeleri (Transformatör, devre kesici ve izolatörlerde kullanılan prespan, takoz, sert kağıt, ahşap vb [32].)

6.1 Elektriksel Özellikler

Katı yalıtkanın dielektrik sabiti, elektriksel direnci ve elektrik dayanımı elektriksel özelliklerindendir. Katı yalıtkan malzeme dielektrik direncine bağlı dielektrik kayıplar oluşturmaktadır. Katı yalıtkanın elektrik alan içinde verdiği tepkiye göre polarizasyon oluşmaktadır, bunun sonucunda dielektrik sabiti belirlenmektedir. Her malzeme şekli, büyüklüğü, ortam koşulları farklı olduğu için katı yalıtkanların dielektrik dayanımları farklılık göstermektedir [31].

6.1.1 Dielektrik Sabiti

Yalıtkanlar genellikle pozitif ve negatif iyonların dengesindedir. Yalıtkan malzemeye elektrik alan uygulandığında kutuplaşma gerçekleşmektedir. Her bir yalıtkanın elektrik alan

içerisinde vereceği tepki farklıdır, bu duruma dielektrik sabiti denilmektedir. "ε_r" ifadesi ile gösterilmektedir [31].

6.1.2 Dielektrik Polarizasyon

Katı yalıtkan malzeme içerisinde elektrik alan etkisiyle iyonların yer değiştirmesine polarizasyon denilmektedir. Yer değiştirme durumu kutuplu yalıtkanda malzemede de kutupsuz yalıtkan malzemede de gözlenmektedir [33]. Elektrik alan etkisiyle polarizasyon oluştuğu gibi, elektrik alan da polarizasyondan etkilenmektedir. Polarizasyon sonucu dielektrik sabiti(ε_r) oluşmaktadır. ε_0 dielektrik sabitine sahip vakum ortamında elektrik alan uygulanırsa, oluşan elektriksel akı yoğunluğu(deplasman) ifadesi denklem 6.1'de ifade edildiği şekildedir [34].

$$D_0 = \varepsilon_0 . E \tag{6.1}$$

Aynı elektrik alan içerisinde vakum yerine farklı bir yalıtım malzemesi kullanıldığında elektriksel akı yoğunluğu(deplasman) aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [34].

$$D_0 = \varepsilon_0 . \varepsilon_r . E \tag{6.2}$$

ε_0 = 8.854x10^{-12}[F/m], Vakum ortamının dielektrik sabiti
ε_r = İlgili malzemenin dielektrik sabiti
E = Uygulanan elektrik alan [kV/mm]

6.1.3 Elektriksel İletkenlik

Yalıtkan iki elektrot arasına yerleştirilip elektrotlar arasına gerilim uygulandığında gösterdiği dirence izolasyon direnci denilmektedir. Birim boyuta düşen direncine ise özgül direnç denilmektedir. Aynı zamanda hacimsel direnç olarak da ifade edilmektedir. Özgül direnç formülü şu şekildedir [34].

$$\rho_V = R_i \text{ x } \frac{A}{d} \tag{6.3}$$

ρ_V = Özgül direnç (Hacimsel direnç) [Ω.cm]

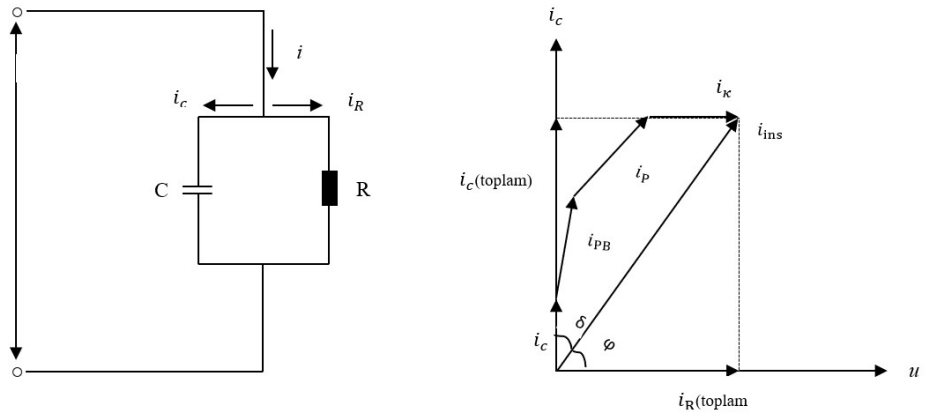
Ri = İzolasyon direnci [Ω]

A = Elektrot yüzey alanı[cm^2]

D = Yalıtkan kalınlığını[cm]

6.1.4 Dielektrik Kayıp Faktörü

Yalıtkan malzeme üzerine gerilim uygulandığında, kapasitif şarj akımlarına ek olarak polarizasyon kaynaklı kaçak akımlar oluşmaktadır. Oluşan kaçak akımların büyüklüğü, uygulanan gerilimin büyüklüğüne, genliğine, yalıtkanın ısıl ortamına göre farklılık göstermektedir. Yalıtkanın sahip olduğu bu akımların oluşturduğu enerji, dielektrik kaybın(tan δ) değerini belirlemektedir. Gerilim uygulandığında yalıtkanın üzerinden geçen akımlar ve fazör diyagramı Şekil 6.1'de gösterilmektedir [34].



(a) (b)

Şekil 6.1: (a) Yalıtkan malzemenin parelel modellenmesi ve (b) yalıtkan üzerindeki akım mekanizmaları fazör gösterimi [34]

Alternatif gerilim uygulandığında, Şekil 6.1'deki fazör diyagramda gösterildiği gibi polarizasyon etkisi ile kapasitif akım ve gerilim arasındaki faz farkı 90°C'nin altına düşmüştür. Dolayısıyla dielektrik kayıp faktörü oluşmuştur. Kapasitif akım, direncin oluşturduğu akım ve güç kaybı şu şekilde hesaplanmaktadır [34].

$$I_C = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} = \omega \text{ x } C \text{ x } U \tag{6.4}$$

$$I_C = I_C \text{ x } \tan \delta \tag{6.5}$$

$$P_{kayıp} = \omega \text{ x } C \text{ x } U^2 \text{ x } \tan \delta \tag{6.6}$$

$$\tan \delta = \frac{\text{Aktif Güç}}{\text{Reaktif Güç}} = \frac{U \text{ x } I \text{ x } \cos\varphi}{U \text{ x } I \text{ x } \sin\varphi} = \frac{I_R}{I_C} \tag{6.7}$$

6.1.5 Elektriksel Dayanım

Yalıtkan bir malzemenin elektrik alan içinde verdiği tepkiye denilmektedir. Tepki olarak katı yalıtkan, yalıtkanlık özelliğini yitirdiğinde elektriksel delinme meydana gelmektedir ve kV/mm veya V/m cinsinden ifade edilmektedir. Katı yalıtkanlar delindiğinde sıvı ve gazlara kıyasla yalıtkanlık özelliklerini yitirmektedirler. [34] Dielektrik malzemenin delinme dayanımı, deneysel faktörlere, çevresel faktörlere, uygulanan gerilimin büyüklüğüne, malzeme cinsine göre değişmektedir [31].

Tezin ileriki bölümlerinde düzlemsel elektrot sisteminde deneyler yapıldığından ve delinme dayanımının kontrolünün gerçekleştirildiğinden bahsedilmektedir. Düzlemsel elektrot sisteminde elektrik alan bağıntısı şu şekildedir:

$$E = \frac{U}{d} \tag{6.8}$$

E = Elektrik alan (kV/mm)

U = Uygulanan gerilim (kV)

d = Elektrotlar arası uzaklık (mm)

Düzlemsel elektrot sisteminde elektrik alan formülü (6.8)'de belirtildiği gibi uygulanan gerilimin elektrotlar arası uzaklığa oranına eşittir [3]. Düzlemsel elektrot sisteminde elektriksel dayanım da benzer şekilde basitçe ifade edilebilmektedir [35].

$$E_b = \frac{U_b}{d} \tag{6.9}$$

E_b = Dielektrik dayanım (kV/mm)

U_b = Elektriksel dayanma gerilimi (kV)

d= Elektrotlar arası uzaklık (mm)

6.2 Isıl Özellikleri

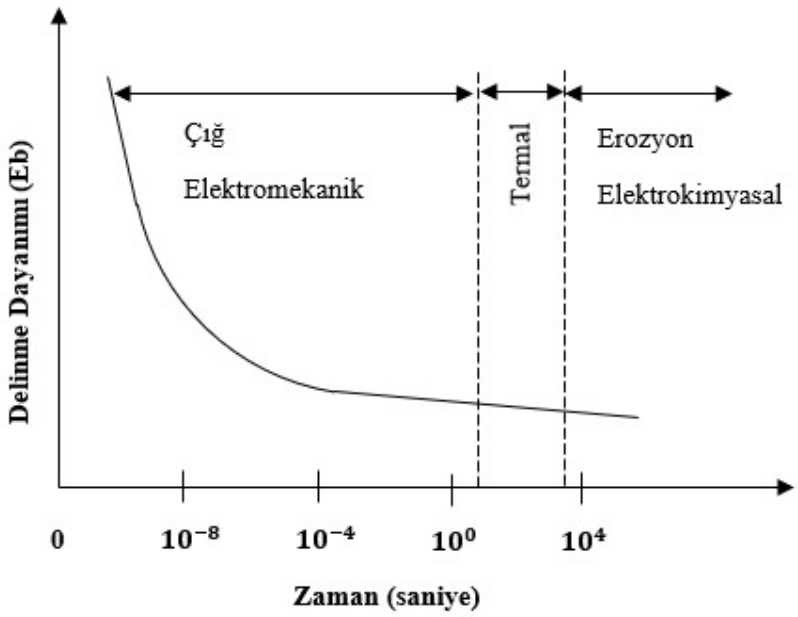
Yalıtkan malzemelerde ısı transferi önemli bir durumdur. Yalıtkan sıcaklığa ne oranda maruz kalırsa o oranda yapısal değişikliğe uğrayacaktır. Dolayısıyla bu durum yalıtkanın çalışma sırasındaki verimini, kalitesini, kullanım süresini etkilemektedir [36]. Maksimum çalışma sıcaklık koşullarına göre transformatör, kondansatör, kablo gibi kullanıldığı alanlarda sıcaklık artış sınıfları bulunmaktadır. Transformatörler için kullanılan Tablo 6.1'de belirtilen yalıtım sistemi termal sıcaklık sınıfları, diğer katı yalıtkan malzemeler için de geçerlidir. Çeşitli katı yalıtkanların termal sınıflandırılması Tablo 6.1'de gösterildiği gibidir [32].

Tablo 6.1: Katı yalıtkanların termal sınıflandırılması.

Malzeme Sınıfı		Malzeme İsmi	Çalışma Sıcaklığı Limiti
Y		Emprenye edilmemiş pamuk, ipek, kağıt, pvc, doğal kauçuk.	90°C
A		Y sınıfının emprenye edilmiş halleri ve naylon.	105°C
E		Pet, selüloz triasetat, poliüretan, polivinil asetat bazlı emaye.	120°C
B		Mika, asbest, bakalit, fiberglass ve polyester emaye.	130°C
F		B sınıfının alkid ve epoksi reçineyle birlikte kullanıldığı durumlar.	155°C
H		B sınıfının silikon reçine katkılı halleri, silikon kauçuk, aromatik Poliamid, Poliimid film.	180°C
C (IEC 60085:2004)	N ve R (IEC 60085:2008)	B sınıfının inorganik bağlayıcı katkısıyla kullanıldığı halleri ve Teflon.	180°C ve üzeri

6.3 Katı Yalıtkanlarda Delinme Süreçleri

Katı yalıtkanlarda delinme olayı birçok sebepten kaynaklanabilmektedir. Yalıtkan malzeme mekanizması delinme sebepleri; ani delinme, elektromekanik, ısıl, elektrokimyasal, kimyasal bozulmalar, dahili kısmi deşarj, yüzey deşarjı, korona, ağaçlanma vb. şeklinde olabilmektedir [32]. Elektriksel problem kaynaklarının etkisiyle mekanik problem kaynaklarından elektriksel delinme gerçekleşebilir, bu duruma elektro-mekanik delinme olarak tanımlanmaktadır. Yalıtkan malzemedeki dielektrik kayıpların oluşturduğu ısı sebebiyle delinme meydana gelebilir. Bu duruma ısıl delinme denilmektedir. Katı yalıtkanın yüzeyinde delinme meydana gelebilir, bu duruma basitçe yüzeysel boşalma denilmektedir. Malzemenin ömrünü belirleyen en önemli etken elektriksel kısmi boşalmalardır. Uygulanan gerilimin süresine göre katı yalıtkanın bozulma grafiği Şekil 6.2'deki gibidir [37].



Şekil 6.2: Delinme dayanımının zorlanma süresiyle değişimi [37].

Zamana bağlı bu değişim basitçe mekanik delinme, ısıl delinme ve kimyasal delinme olmak üzere üç ana grupta toplanabilmektedir. Üç ana grup kendi içinde delinme sebebine göre farklı başlıklarda incelenebilmektedir [32].

6.3.1 Ani(Öz) Delinme

Katı yalıtkan hacmi boyunca hareket halinde olabilen serbest elektronların oluşturduğu delinme çeşididir. Uygulanan gerilimin süresi 10^{-8}sn seviyesinde (darbe şeklinde) çok kısa iken malzemenin dayanımını temsil etmektedir. Dayanımı, uygun koşullar altında deneysel koşullar sağlanarak elde edilebilmektedir [32].

6.3.1.1 Elektronik Delinme

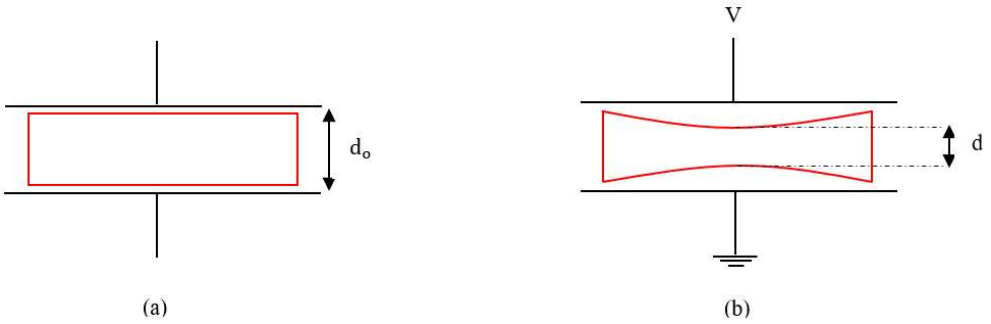
10^{-8}sn seviyesi gibi çok kısa sürede gerçekleştiği için yapısı gereği elektronik olduğu varsayılan delinme çeşididir. Elektrik alan uygulandığında yalıtkan malzemenin elektronları enerjilenerek iletim bandına geçebilirler. Tekrarlanan bu olayda iletim bandında elektron sayısının artması sonucu delinme gerçekleşmektedir [32].

6.3.1.2 Kanal Oluşumu

Yalıtkanın içindeki iletim elektronları, elektrik alan altında katottan anoda doğru hareketi sırasında enerjilenirler. Bu enerjiyi yalıtkan içinde gerçekleşen çarpışmalar sırasında kaybederler. Kazanılan enerji iyonlaşma potansiyelini aşarsa bir elektron serbest kalabilir. Tekrarlan bu olay neticesinde elektron çığı oluşabilmektedir. Yalıtkanın delinmesi için tek bir elektron çığı yeterli değildir. Tekrarlanan elektron çığı, malzeme boyunca ilerleyerek delinmeyi meydana getirmektedir [32].

6.3.2 Elektromekanik Delinme

Elektrik alan etkisi altında iki elektrot arasında konumlanan yalıtkan malzeme, yüzey yüklerinin meydana getirdiği çekim etkisi nedeniyle mekanik kuvvetlerle sıkışmaktadır. Yüzeydeki bu basınç kuvvetleri, yalıtkanın kalınlığını azaltmaya yönelik bir zorlanma yaratmaktadır ve zorlanmayı artıracak yöndedir. Bu durumu anlatan görsel Şekil 6.3'deki gibidir [38].



Şekil 6.3: Elektrik alan sıkıştırma etkisi (a) Elektrik alan uygulanmaz iken, (b) Elektrik alan altında iken [38].

Yalıtkanın ilk kalınlığı "d_0", uygulanan gerilim "V" iken yüzeydeki basıncın etkisi ile kalınlık "d" olarak ifade edilmektedir. Yalıtkana etkiyen elektriksel kuvvet ile malzemenin mekanik dayanımı denge halindedir. Basınç kuvvetinin ifadesi Hooke yasasına göre şu şekildedir:

$$Pc = \varepsilon_0 . \varepsilon_r . \frac{V^2}{2.d^2} = Y . \ln[\frac{d_0}{d}] \tag{6.10}$$

"Y" ifadesi Young Modülü, "ε_r" ifadesi dielektrik sabiti, "ε_0" ifadesi boşluğun dielektrik sabitidir. Young Modülü, yalıtkan malzeme için karakteristik bir özelliktir, basınç kuvvetinin yüzey alanına etkiyen kısmında meydana gelen boyut değişimi olarak ifade edilebilmektedir. (6.11) eşitliğinde ifade edilen oranlardaki değişim, delinmenin başlamasına sebebiyet vermektedir.

$$\frac{d_0}{d} = 0.6 \tag{6.11}$$

(6.10) eşitliği içerisinde (6.11) eşitliğinde ifade edilen değerler yerleştirildiğinde delinme süreci başlamadan maximum elektrik alan dayanımı değeri bulunmaktadır. Yalıtkan malzemenin dayanabileceği max elektrik alan (6.12) eşitliğinde ifade edilmektedir. [37]

$$Emax = \frac{V}{d_0} = 0.6 .[\frac{Y}{\varepsilon_0.\varepsilon_r}]^{1/2} \tag{6.12}$$

6.3.3 Termal (Isıl) Delinme

Dielelektrik dayanımı, Eşitlik (6.9)'da belirtildiği gibi malzemenin kalınlığı arttıkça artmaktadır. Belirtilen durum belli malzeme kalınlıklarına kadar geçerlidir. Elektrik alan etkisinde yalıtkan malzeme üzerinden kaçak akımlar akmaktadır. Bu kaçak akımlar, yalıtkanın ısınmasına neden olmaktadır. Yalıtkanın sıcaklık artışı, uygulanan gerilimin büyüklüğüne, uygulama süresine ve yalıtkanın ısı iletimine göre değişebilmektedir. Yalıtkan artan ısısı, radyasyon yolu ile dış yüzeye ulaştırılmaktadır. Yalıtkan malzemenin sıcaklık artışı, dışarı verilen ısıya eşitse malzeme termal denge halinde anlamına gelmektedir. Yalıtkan malzeme termal denge halinde kararlı davranmaktadır. Alternatif gerilim ve doğru gerilim uygulandığında üretilen ısı (6.13) ve (6.14) eşitliklerinde özetlenmektedir [37].

$$Wdc = E^2 . \rho \quad W/cm^3 \tag{6.13}$$

$$Wac = \frac{E^2 . f . \varepsilon_r . \tan\delta}{1{,}8 . 10^{12}} \ W/cm^3 \tag{6.14}$$

Dışarı verilen ısı değeri ise Wt ile ifade edilmektedir. (6.15) eşitliğinde formülü verilmektedir.

$$Wt = c_v . \frac{dT}{dt} + div(K.gradT) \tag{6.15}$$

ρ = Malzemenin İletkenliği [Ω.cm]
T = Malzemenin Sıcaklığı [°C]
K = Malzemenin Isıl İletkenliği [Siemens/cm]
t = Isının dağıtıldığı süre [sn]

Yalıtkan malzemenin soğuma hızı, malzemenin ısınma hızına yetişemediğinde kararsız bir durum ortaya çıkmaktadır. Yani üretilen ısı, dışarı transfer edilen ısıdan büyük olduğunda meydana gelen kararsızlık durumu yalıtkan malzemede ısıl delinmeye yol açmaktadır [32].

6.3.4 Kimyasal ve Elektrokimyasal Bozulma

Gerilim uygulanırken, katı yalıtkan hava ve diğer gazlarla etkileşim halindedir. Bu etkileşim bazı kimyasal reaksiyonlara dolayısıyla değişikliklere neden olmaktadır. Kimyasal reaksiyonlardan bazıları şu şekilde özetlenebilir.

Oksitlenme : Katı yalıtkan malzemenin hava veya oksijenle etkileşimi sonucu malzeme yüzeyinde oksitlenme nedeniyle çatlaklar meydana gelmektedir.

Hidroliz : Katı yalıtkan malzeme yüzeyinde su buharı veya nem olması halinde etkileşim meydana gelmektedir. Su ile etkileşim sonucu meydana gelen reaksiyon, yıkım reaksiyon olarak da adlandırılan hidrolizdir. Bu reaksiyon yalıtkan malzemenin elektriksel ve mekanik özelliklerinin kötüleşmesine sebep olmaktadır.

Kimyasal Etkileşim : Yüksek sıcaklığa bağlı kimyasal kararsızlık, hidroliz, oksidasyon nedeniyle yüzeyin çatlaması gibi kimyasal etkileşim durumları, elektrik alan uygulanmadığı durumda bile kimyasal bozulmaya sebep olabilmektedir. Kimyasal ve elektrokimyasal bozulmalarda sıcaklığın etkisi çok yüksektir. Bu nedenle katı yalıtkan çalışma sıcaklığına, ortam sıcaklığına dikkat edilmesi, uygun koşullarda kullanılması kimyasal bozulmanın gerçekleşmesini önleyebilmektedir. Gerektiğinde sıcaklığı düşürmek için uygun soğutma şekilleri kullanılabilir [32].

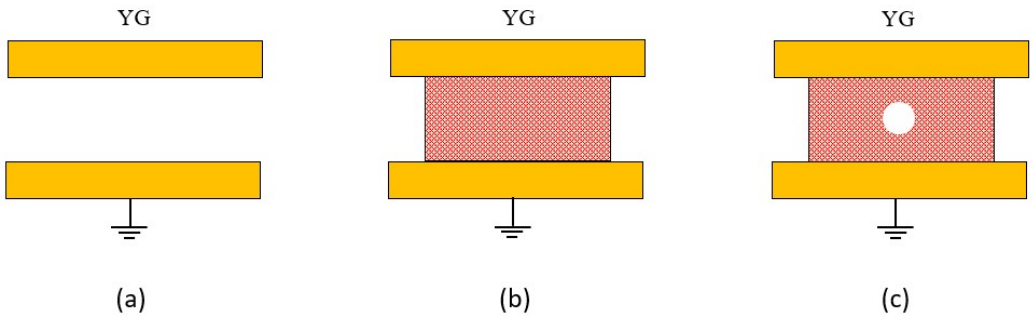
6.4 Katı Yalıtkanlarda Kısmi Deşarj

Katı yalıtkan malzemenin dayanma sınırının aşıldığı bölgelerde elektriksel kısmi boşalmalar oluşmaktadır. Elektriksel zorlanmaya dayanma süresi çeşitli parametrelere göre değişmektedir. Sıcaklığa, basınca, malzemenin cinsine göre elektriksel dayanım değişiklik göstermektedir. Yalıtım malzemesinin bu elektriksel zorlanmalara dayanabilmesi için mekanik dayanım özelliği yüksek, ısıl ve kimyasal bozulmalara karşı dayanıklı, nem, hava boşluğu gibi durumlara sahip olmaması ve düşük dielektrik kayba sahip olması gerekmektedir. Katı yalıtkanlar, sıvı ve gaz yalıtkanlara göre daha iyi yalıtım özelliği göstermektedir. Fakat elektriksel zorlanmalara dayanamayıp delinme oluştuktan sonra katı yalıtkanlar kullanılamaz hale gelmektedir [32]. Kısmi deşarjlar sebepleri şu şekilde sıralanmaktadır [37]:

- Katı yalıtkan malzeme içerisinde var olan boşlukların oluşturduğu dahili deşarjlar

- Farklı ortamdan kaynaklanan ya da yüzeyde meydana gelen yüzey deşarjları
- Homojenliği olmayan gazlardan kaynaklı korona deşarjları
- Katı yalıtkanda sürekli meydana gelen deşarjların etkisi (ağaçlanma) [37]

Üç temel kısmi deşarj tipi bulunmaktadır: Korona deşarjı, yüzey deşarjı ve dahili(iç) kısmi deşarjıdır. Deşarjların tekrarlanması ile ağaçlanma tipi ortaya çıkmaktadır. Üç temel deşarj tipi Şekil (6.4)'te modellenmiştir.



Şekil 6.4: Kısmi deşarj tipi modellemeleri (a) Korona deşarjı, (b) Yüzey deşarjı, (c) Dahili(iç) deşarj [9].

6.4.1 Korona Deşarjı

Katı yalıtkan gazlı bir ortamda bulunmaktadır. Gerilim yavaş yavaş yükseldikçe belirli bir noktada iyonizasyon başlar ve korona deşarjı için gerekli koşullar sağlanmış olur. Gazlı ortamda katı yalıtkandan uzak iletken etrafında oluşabilecek deşarj çeşididir [37]. Korona deşarj basit modeli Şekil (6.4)'te gösterilmektedir.

6.4.2 Yüzey Deşarjı (İz Oluşumu)

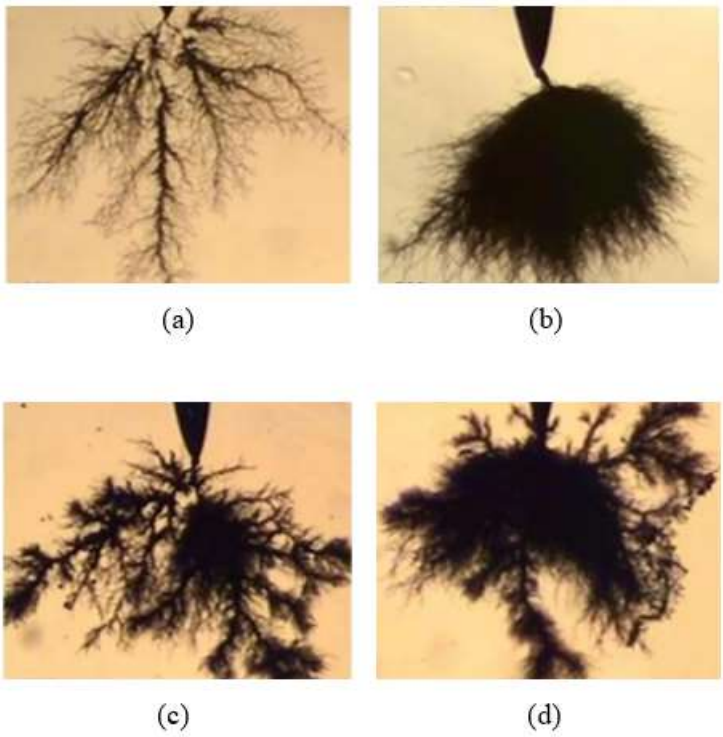
Katı yalıtkan malzemeye gerilim uygulandığında sınır yüzeyinde yüzey ıslaklığı yada kirlenme nedeniyle elektrik iletimi başlar ve aynı zamanda yüzeyde ısı üretilmektedir. Üretilen ısı yüzeyde bütünlüğü bozarak yüzeysel deşarj meydana gelmesine sebep olmaktadır. Yüzeydeki bütünlüğün bozulması sonucu, ısınan bölgede karbonlaşarak iz oluşmaktadır. Bu nedenle yüzey deşarjı, "İz Oluşumu" olarak da isimlendirilmektedir.

Karbonizasyon sonucu iz oluşumuna bağlı, malzeme yapısı kalıcı olarak iletkenlik özelliği kazanmaktadır [32]. Yüzey deşarjı basit modeli Şekil (6.4)'te gösterilmektedir.

Yüzeysel boşalma sıcaklık, basınç gibi parametrelere bağlı olabileceği gibi diğer deşarj çeşitlerinden farklı olarak yüzey direncine, yüzey kapasitesine, yüzey pürüzsüzlüğüne ve yüzey kirliliğine bağlı olarak değişebilmektedir. Yüzeysel deşarja sebep olan kirlenme çeşitleri toz, kir, nem, atmosferik kimyasallar olarak örnek verilebilir [38].

6.4.3 Ağaçlanma

Elektrik alan uygulandığında, katı yalıtkan malzemenin delinme gerçekleşmeden önceki yaşlanma mekanizmasıdır. Deşarjlar sonucu oluşan izler, ağaç şeklini aldığı için ağaçlanma olarak isimlendirilmektedir. Ağaçlanma, zaman içerisinde kısmi deşarj oluşumları sonucu gerçekleşebileceği gibi, darbe gerilimi sonucu aniden de oluşabilmektedir. Yalıtkan bozulmaları içerisinden en çok rastlanan bozulma çeşitlerinden biridir fakat her ağaçlanma sonucu delinme gerçekleşmeyebilir. Ağaçlanma tipleri, iplik tipi, çalı tipi ve ağaç tipi olarak sınıflandırabilmektedir [34].



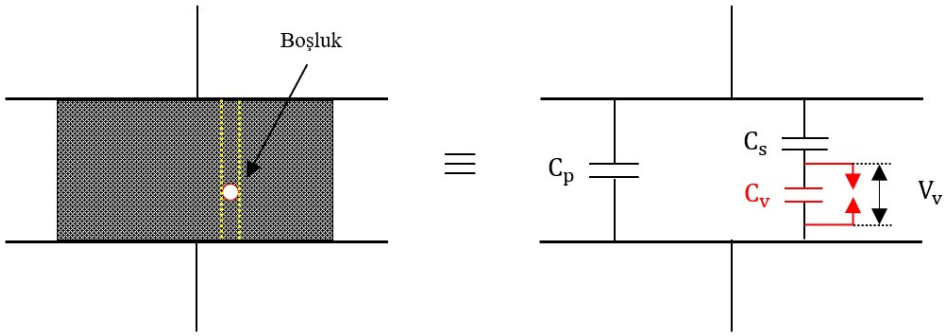
Şekil 6.5: Elektriksel ağaçlanma tipleri (a) dal tipi, (b) çalı tipi, (c) çam dalı tipi, (d) çalı çam dalı tipi [39].

6.4.4 Dahili Kısmi Deşarj (Erozyon)

Katı yalıtkan malzemeler, malzemenin kendisinden daha düşük dielektrik dayanıma sahip gaz ya da sıvı dolu boşluklar bulundurabilmektedir. Boşluklar, katı yalıtkan malzemenin iç yapısında ya da elektrotlarla olan sınır yüzeyleri arasında konumlanmaktadır. Katı yalıtkan içinde bulunan boşluğun dielektrik sabiti, kendisinden oldukça küçüktür. Bu sebepten dolayı, boşluğun elektrik alan şiddeti katı yalıtkanın üzerinde bulunan elektrik alan şiddetinden büyük olmaktadır. Bu durum, normal koşullarda katı yalıtkanın dayanabileceği gerilimlere, boşluklarından dolayı dayanamamasına neden olmaktadır.

Boşluğa uygulanan gerilim, dayanma gerilimine ulaştığında deşarj başlamaktadır. Deşarjlar tekrar etmektedir, ısı üretilmesine ve zamanla yalıtkan malzemenin zarar görerek delinmesine neden olmaktadır [38].

İki elektrot arasına yerleştirilmiş bir yalıtkan malzeme üç kısma ayrılmıştır ve eşdeğer devresi Şekil 6.6'daki gibidir. Cs boşluğa seri bağlı kapasiteyi, Cv boşluğun kapasitesini, Cp ise kusursuz dielektrik kısmın kapasitesini temsil etmektedir.



Şekil 6.6: Boşluğun dielektrik devresinin eşleniği [38].

Şekil 6.6'da gösterilen elektrot sistemine "V" gerilimi uygulandığında boşluk uçlarındaki gerilim değeri (6.16) eşitliğindeki gibi hesaplanabilmektedir.

$$V_v = \frac{d_1}{d_1 + \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_1}\right).d_2} \text{ x } V \qquad (6.16)$$

d_1 = Boşluğun kalınlığı [mm]

d_2 = Dielektrik malzeme kalınlığı [mm]
Vv = Boşluğun gerilimi [V]

Boşluğun gaz dolu olduğu varsayılırsa, $d_1 << d_2$ iken (6.17)'deki eşitlik dikkate alınabilir.

$$V_v = \varepsilon_o X \frac{d_1}{d_2} \text{ x } V \quad (6.17)$$

6.5 Katı Yalıtım Malzemelerinin Dielektrik Dayanımının Tahmini

Dielektriksel bozulmayı etkileyen birden fazla faktör bulunmaktadır. Bu faktörler katı yalıtkan malzeme özelliklerinden kaynaklanan içsel faktörler olabileceği gibi, dış (çevresel) faktörler de olabilmektedir [8]. Katı yalıtkan malzemelerin delinme sebeplerinden bölüm 6.3'te ve 6.4'te bahsedilmiştir. Her bir delinme süreci için ayrı bir matematiksel model oluşturulabilmektedir [40]. Bu durum delinme sürecinin basit bir modele dayandırılmasını epey zorlaştırmaktadır. Dielektrik dayanımın tahmini için basit ampirik formüller kullanılmaktadır. Bu formüle göre katı yalıtkanın elektriksel özellikleri kullanılarak basitçe dielektrik dayanımının tahmini yapılmaktadır. Katı yalıtkan malzemenin dielektrik sabiti (ε_r), dielektrik kayıp faktörü (tan δ), hacimsel öz direnç (ρ_V) kullanılarak A ve B sabitini dayalı bir formül geliştirilmiştir [5].

$$Eb = A + B.\log(\rho_V/\varepsilon_r . \text{Tan}\delta) \quad (6.10)$$

Eb = Elektriksel dayanım (kV/mm) ya da (V/m)
ρ_V = Özgül direnç (Hacimsel direnç) [Ω.cm]
ε_r = Dielektrik sabiti
tanδ = Dielektrik kayıp faktörü

(6.10)'da ifade edilen ampirik formülün mantığı, yapılan deneylerin dielektrik dayanım tahmini için kullanılacaktır.

7. YÖNTEM VE ANALİZ

Yüksek gerilim güç bileşenine sahip transformatörlerin elektrik sistemi içerisinde sürekli, hatasız ve uzun ömürlü çalışması beklenmektedir. Bu koşulun sağlanabilmesi için dört alanda transformatörün iyi yalıtılması gerekmektedir. Bu dört alan şu şekildedir: Toprak ve sargı arası(faz-toprak), iki farklı faza ait sargı arasında(faz-faz), sarımın kendi katları arasında(sarımlar arası), aynı fazdaki sargılar arasında(sargılar arası)dır [36].

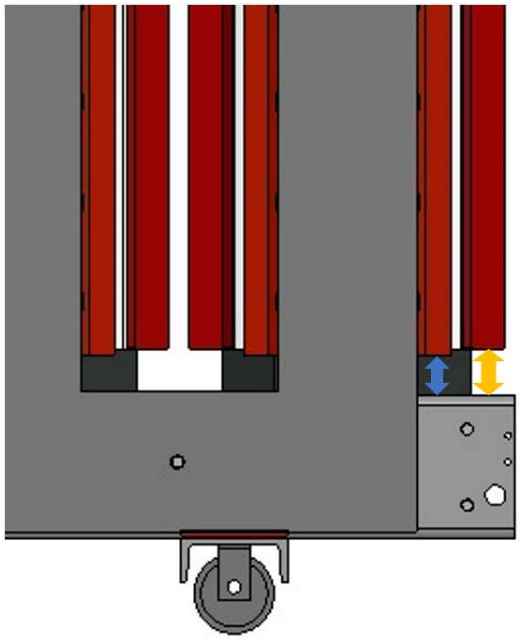
Bu çalışmada faz-toprak yalıtımının kontrolü için deneysel olarak optimum mesafe belirleme çalışması yapılmaktadır. Transformatör dielektrik mesafeleri, yalıtım testleri ile doğrudan ilgilidir. Elektriksel yalıtımın kalitesi, dayanıklılığı, sürekliliği bu testlerle belirlenmektedir. Kısmi deşarj testi ile elektriksel bozulmanın ilk sinyalleri verilirken, uygulanan gerilim deneyi ile yalıtımın dayanabileceği maksimum gerilim tespit edilmektedir. Transformatör uygulanan gerilim deneyindeki sistem basitçe simule edilerek test edilmiş, sonrasında Sonlu Elemanlar Yöntemi(FEM) baz alınarak oluşturulmuş Ansys Maxwell programında analiz edilmiştir.

Çalışma için iki farklı yöntem kullanılmıştır. Deneysel Yöntem ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile analiz yöntemidir.

7.1 Deneysel Yöntem ve Analizi

Transformatör tasarımında emniyet mesafesi olarak belli ölçülerde dielektrik mesafeler bırakılmaktadır. Faz-faz arası, faz-toprak arası, sarımlar arası ve sargılar arasında olan bu mesafelerin bir kısmı kuru tip transformatör tasarımında katı yalıtım malzemeleri ile donatılmaktadır. Kuru tip transformatörün sağlıklı, uzun ömürlü ve verimli çalışabilmesi için dielektrik mesafenin değeri, mesafe arasında kullanılan dielektrik yalıtkanın cinsi, büyüklüğü, fiziksel şekli, mekaniksel ve elektriksel dayanımı önem arz etmektedir. IEC 60243-1 standardında izolasyon malzemelerinin elektriksel dayanımı için test tekniklerinden bahsedilmektedir [41]. Bu çalışmada kuru tip transformatör faz-toprak arası dielektrik mesafenin optimum değeri incelenmiştir. Kuru tip transformatörde faz-toprak arası mesafe alçak gerilim ve yüksek gerilim bobinlerinin en üst ve en alt noktaları ile nüvenin arasında kalan mesafedir. Fakat alçak gerilim ve yüksek gerilim bobinleri ile nüve hiçbir noktada temas etmemektedir. Nüve, içerisinde bulundurduğu saplama delikleri ile demir aksamlara (klempe) sıkıştırılmıştır ve bobinler mekaniksel sabitleme için takozlar yardımıyla

klemplere oturtulmuştur. Dolayısıyla faz-toprak dielektrik mesafelerinde bağlantıda olduğu bobin-klemp arası mesafe ve takozun etkisi incelenmiştir. Bobinlerin alt noktaları ile klemp arası mesafeler Şekil 7.1'de gösterilmektedir.



Şekil 7.1: Bobin alt kısımları ile klemp arası mesafe.

Çalışmada şekilleri birbirinde farklı iki takoz modeli üzerinde deneyler yapılmaktadır. Takozlardan birincisi Leplast marka %60 cam elyaf takviyeli polyamid malzemedir. Diğeri aynı teknik özelliklerde silindirik yapıya sahip takozdur. Leplast marka takozun tek parça ölçülen yüksekliği 38mm, silindirik takozun tek parça ölçülen yüksekliği 45mm'dir.

Şekil 7.2: Deneyde kullanılan takoz örnekleri (a) Leplast takoz, (b) Silindirik takoz.

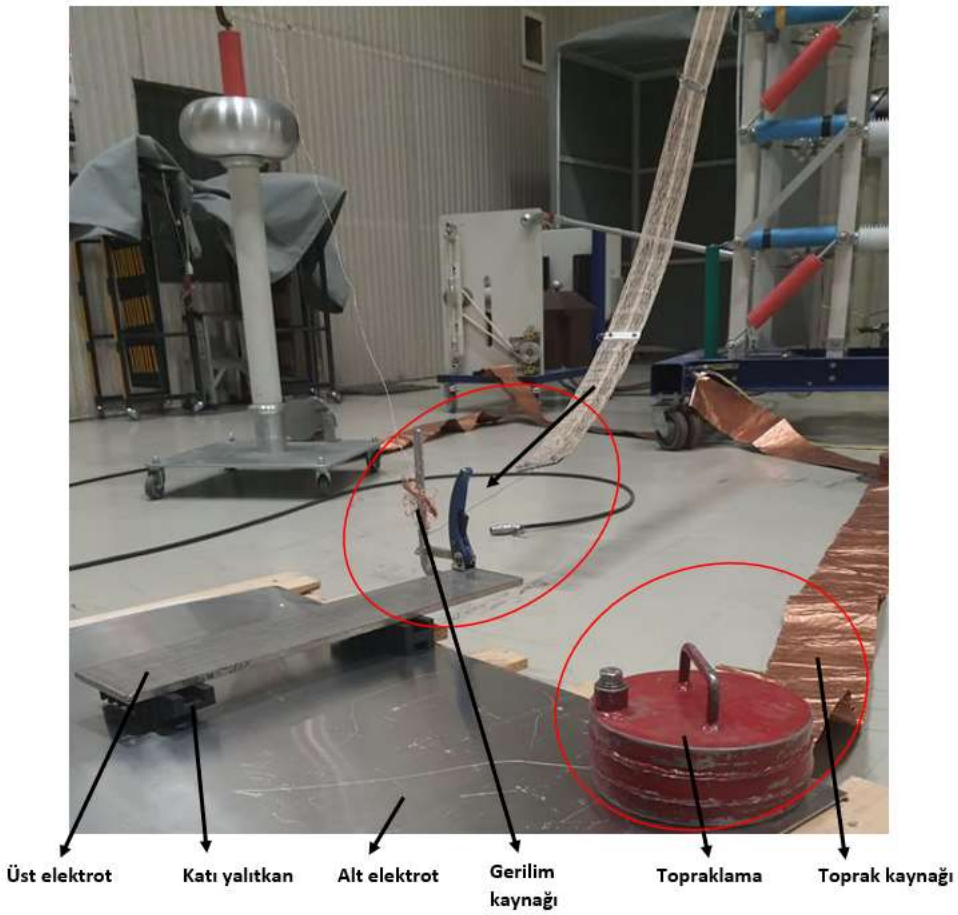
Deneyde, hem kullanılan takoz modelinin dielektrik dayanıma etkisi hem de kuru tip transformatör için gerekli minimum dielektrik mesafenin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yüksekliğin dielektrik dayanıma etkisini incelemek için tek malzeme, iki malzeme üst üste ve üç malzeme üst üste konularak dielektrik mesafe artırılarak deneyler yapılmıştır. Ek olarak, dielektrik izolasyon kağıdının dielektrik dayanıma etkisi de leplast takozlar arasına konularak denemeler yapılmıştır. Leplast takoz ve silindirik takoz üzerinden yapılan deneylerin listesi Tablo 7.1'de verilmektedir.

Tablo 7.1: Kuru havada farklı malzeme yükseklikleri ile yapılan deney düzenekleri.

	Deney No	Malzeme	Mesafe(mm)	Açıklama	Ortam
KURU	1	Leplast	38	Tek malzeme	Kuru Hava
	2	Leplast	76	İki malzeme	Kuru Hava
	3	Leplast	114	Üç malzeme	Kuru Hava
	4	Silindirik	45	Tek malzeme	Kuru Hava
	5	Silindirik	90	İki malzeme	Kuru Hava
	6	Silindirik	135	Üç malzeme	Kuru Hava

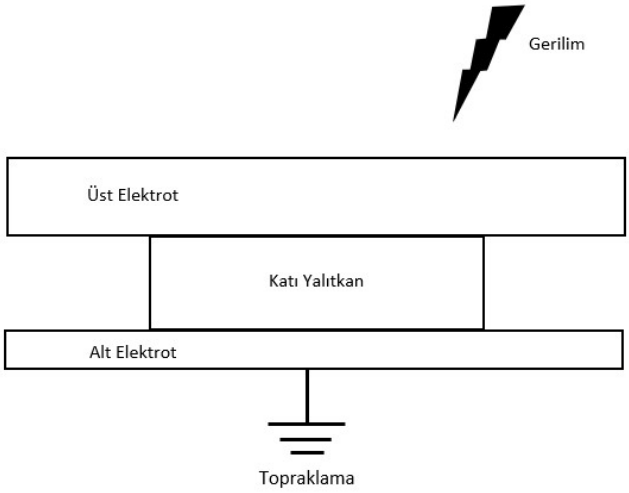
Şekil 7.3'te deney düzeneği resmi verilmektedir. Üst elektrot için 120x8mm alüminyum bara, alt elektrot için 2,5mm kalınlıkta alüminyum folyo kullanılmıştır. Üst elektroda gerilim verilirken, alt elektrot toprağa bağlanmıştır. Deney boyunca iki elektrot arasında aynı malzeme yapısında katı yalıtkan takoz kullanılmıştır. Elektrotlar her zaman aynı uzunlukta ve kalınlıkta kullanılmıştır. Deney sırasında yalnızca takozların üst üste konulmasıyla iki elektrot arası mesafe değişmektedir. İki elektrot arası değişen mesafe Tablo 7.1'de ifade edilmektedir. Her deney sırasında aynı sıcaklık, aynı nem ve aynı basınç ortamı sağlanmıştır. Her deney öncesinde elektrot yüzeyleri kontrol edilmiş ve silinmiştir. Toz, kir parçacıklarından arındırılmış pürüzsüz bir yüzeye sahip olmasına dikkat edilmiştir. Test gerilimi, değişken sinüzoidal yapıya sahip alçak gerilim kaynağından beslenen bir yükseltici transformatöründen elde edilmiştir. IEC 60243-1 standardında belirtildiği gibi kısa süreli gerilim artış hızına göre deney şekli tercih edilmiştir [41]. Gerilim değeri, sıfırdan takoz üzerinde delinme görene kadar eşit oranlarda artırılmıştır. Deney başladıktan sonra delinmenin 10s ile 20s arasında gerçekleşmesini sağlayacak gerilim değerleri seçilmiştir. Artış oranları, 100 V/s, 200 V/s, 500 V/s, 1000 V/s, 2000 V/s, 5000 V/s gibi oranlarla sağlanmıştır. Takoz mesafesi artırıldığında delinme gerilimi de artacağı için gerilim oranının büyüklüğüne göre gerilim artış oranı da değişkenlik göstermiştir. Ses, ışık gibi tepkiler yoluyla katı yalıtkan zarar gördüğü anda verilen gerilim durdurulmuştur. Her düzenek en az

5 kere test edilmiştir. Gerektiğinde test adedi 5'i geçmiştir. Son aşamada belirlenen değer delinme gerilimi olarak not alınmıştır.



Şekil 7.3: Deney düzeneği.

Deney ile yapılmak istenen Şekil 7.4'te basit bir model olarak ifade edilmektedir. Transformatörde bobin ile klemp arasına yerleştirilen takoz, basit modelde iki elektrot arasına yerleştirilerek simule edilmektedir. Basit model ile transformatörün izolasyon seviyesinde bobin-klemp arası optimum açıklığının tespiti yapılmış olacaktır. Benzer şekilde Şekil 7.4'te görülen basit model, Şekil 5.1'de transformatör ilgili testinde de görülmektedir.

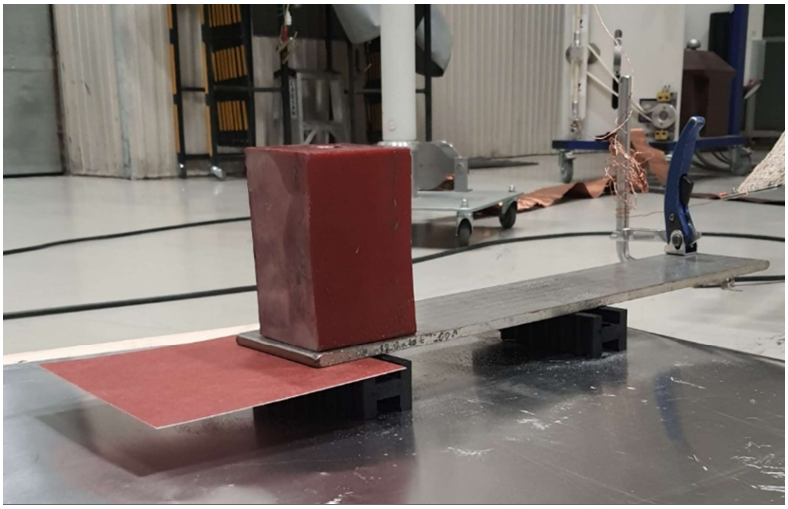


Şekil 7.4: Deney düzeneği basit modeli.

7.1.1 Kuru Hava Ortamında Leplast Tek Takoz Deneyi

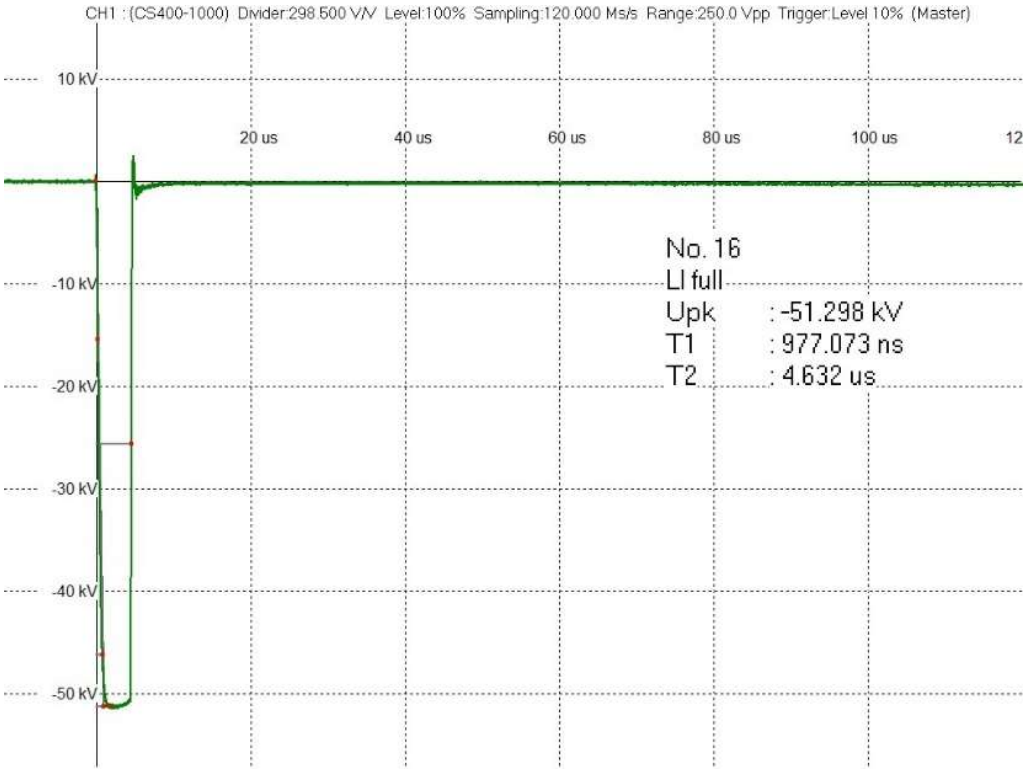
Kuru hava ortamında Şekil 7.5'te görülen ilk deney yapılmıştır. 38mm yükseklikteki takoz iki elektrot arasına konumlandırılmıştır. Alt elektrot topraklanmış olup üst elektroda gerilim uygulanmaktadır.

Gerilim bağlantısı için bara ile gerilim bağlantısının işkence ile sıkıştırıldığı Şekil 7.5'te görülmektedir. Resimde görülen epoksi reçine yapı, kullanılan işkencenin ağırlık dengesi içindir. Denge için kullanılan üst elektrot üzerindeki takozun deneye etkisi bulunmamaktadır. Deney, iki elektrot arasında takozun yüksekliği boyunca takozun dış çevresinde oluşabilecek atlamanın gözlenmesi için yapılmaktadır.



Şekil 7.5: Tek leplast takoz ile yapılan deney düzeneği.

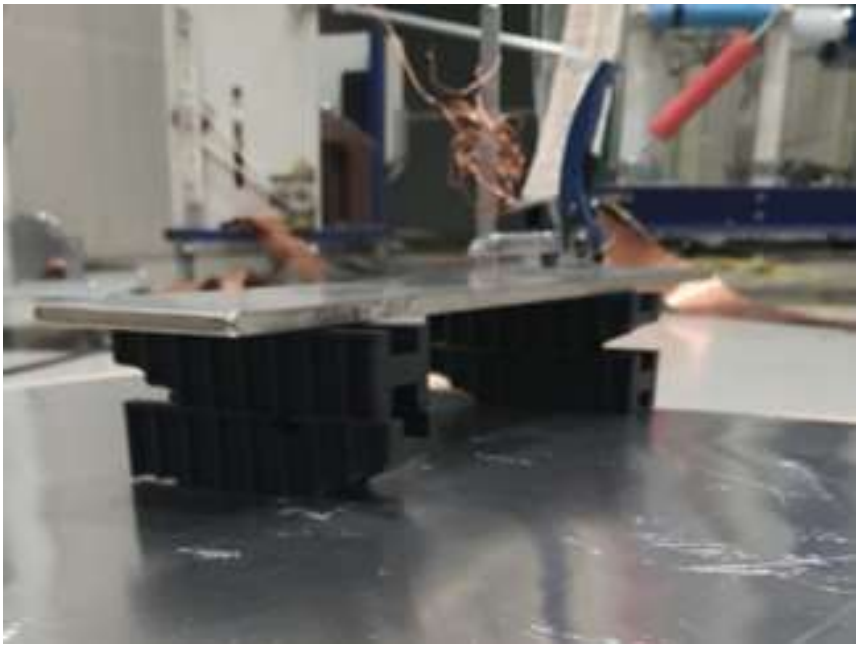
Adım adım gerilim artırılarak uygulandığında iki elektrot arasında tek takoz düzeneğinde Şekil 7.6'da belirtildiği gibi 51,298kV'a dayanabilmektedir. Bu gerilim değerinin üzerine çıkıldığında takoz üzerinde atlama olduğu gözlenmiştir.



Şekil 7.6: Tek leplast takoz ile yapılan testin sonucu.

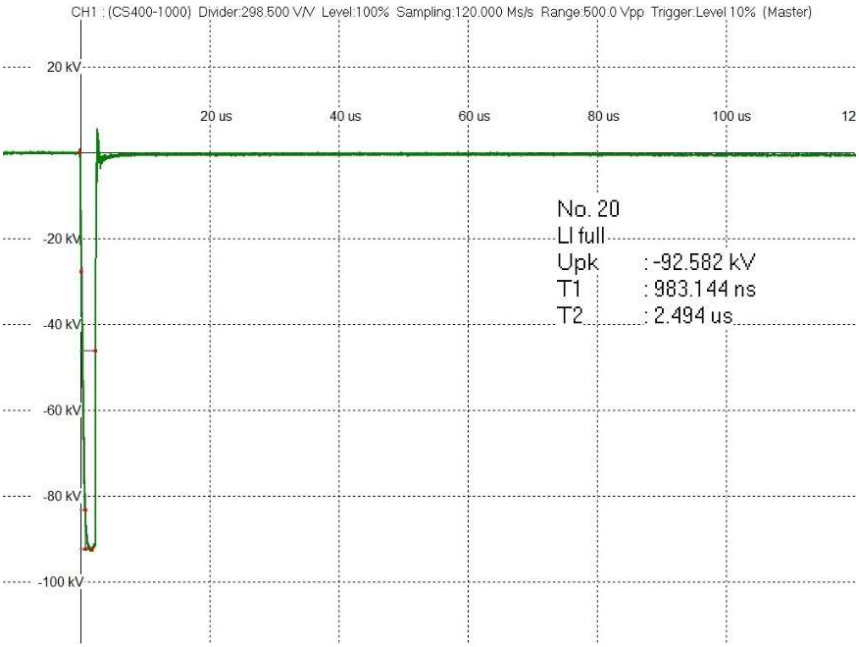
7.1.2 Kuru Hava Ortamında Leplast İki Takoz Deneyi

İki elektrot arasına iki takoz üst üste konularak deney gerçekleştirilmiştir. Takozlar üst üste 76mm yüksekliktedir. Deney düzeneği, Şekil 7.7'de gösterilmektedir.



Şekil 7.7: İki leplast takoz ile yapılan deney düzeneği.

Şekil 7.7'de verilen deney düzeneğinde iki takoz üst üste 76mm mesafede takozun dayanabileceği gerilim değeri 92,582kV olarak tespit edilmiştir. Test sonucu Şekil 7.8'de ifade edilmektedir.



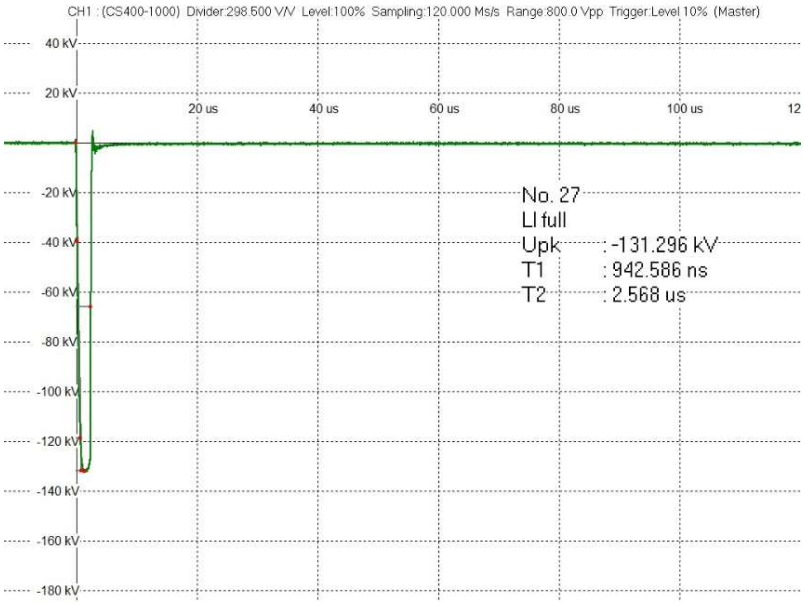
Şekil 7.8: İki leplast takoz ile yapılan testin sonucu.

7.1.3 Kuru Hava Ortamında Leplast Üç Takoz Deneyi

İki elektrot arasına üç takoz üst üste konularak deney düzeneği hazırlanmıştır. Amaç 114mm mesafede iki elektrot arasındaki takozların dayanabileceği gerilim değerini görebilmektir. Deney düzeneği Şekil 7.9'da gösterilmektedir.

Şekil 7.9: Üç leplast takoz ile yapılan deney düzeneği.

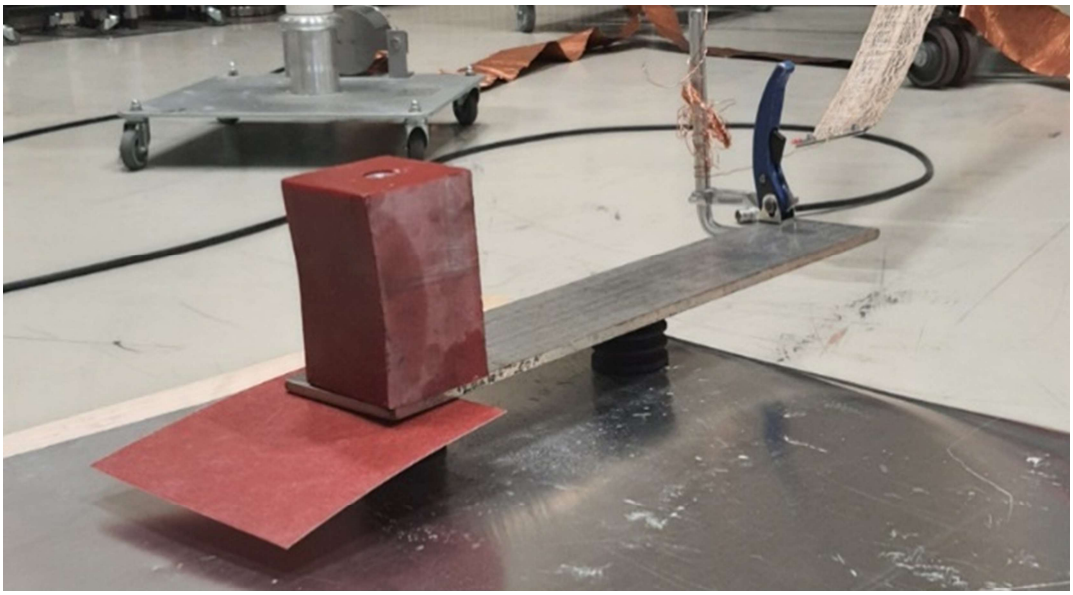
Üç takoz üst üste 114mm yükseklik elde edildiğinde takozların dayanabileceği gerilim değeri 131,296kV olarak tespit edilmiştir.



Şekil 7.10: Üç leplast takoz ile yapılan testin sonucu.

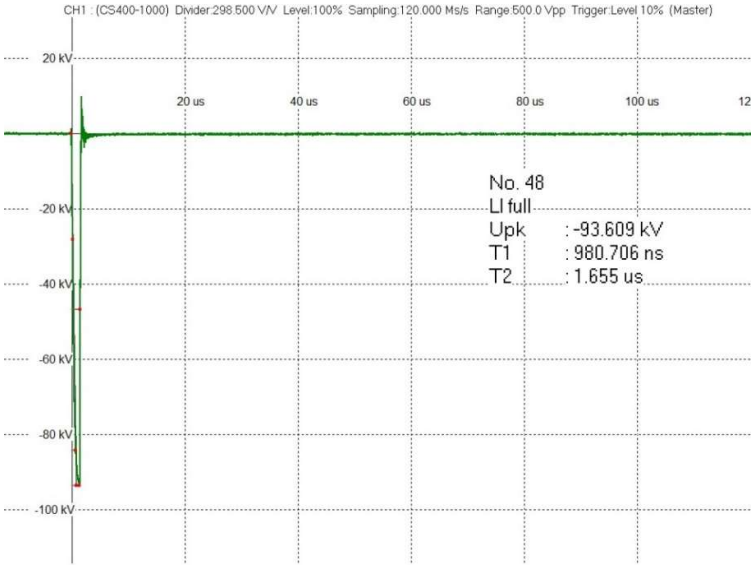
7.1.4 Kuru Hava Ortamında Silindirik Tek Takoz Deneyi

Silindirik takoz fiziksel yapısı, Leplast takoz fiziksel yapısından tamamen farklıdır. Dış yüzey kıvrımları daha fazladır, izolasyon kağıdı eklenerek benzetilmeye çalışılan dış yüzey, silindirik takozda doğal olarak bulunmaktadır. Leplast takoz tek parça halinde kullanıldığında 38mm yüksekliğe sahip iken silindirik takoz tek parça yüksekliği 45mm'dir. Dış yüzey kıvrımı artırma ve yükseklik artırma gibi geliştirme faaliyetleri silindirik takoz modelinde doğal olarak bulunmaktadır. Leplast takoz deney düzeneği ile aynı düzenek hazırlanmıştır ve Şekil 7.11'de gösterilmektedir.



Şekil 7.11: Tek silindirik takoz ile yapılan deney düzeneği.

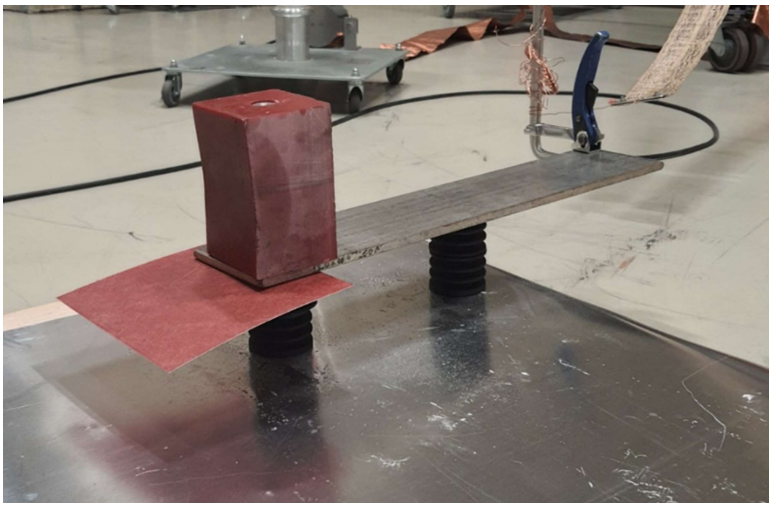
Silindirik takoz ile yapılan deney düzeneğinin Şekil 7.12'de görüldüğü gibi 93,609kV gerilim seviyeye kadar dayanabildiği görülmektedir. Leplast tek takoz ile yapılan deney düzeneğinde ise 51,298kV'a dayandığı tespit edilmişti. Silindirik takozun dış yüzey kıvrımı ve yükseklik avantajı dayanabildiği gerilim değerinde açıkça görülmektedir.



Şekil 7.12: Tek silindirik takoz ile yapılan testin sonucu.

7.1.5 Kuru Hava Ortamında Silindirik İki Takoz Deneyi

Silindirik takozlar üst üste konularak iki elektrot arası mesafe 90mm'e çıkarılmıştır. Bu mesafede dayanabileceği gerilim değeri incelenmektedir. Deney düzeneği Şekil 7.13'te gösterilmektedir.



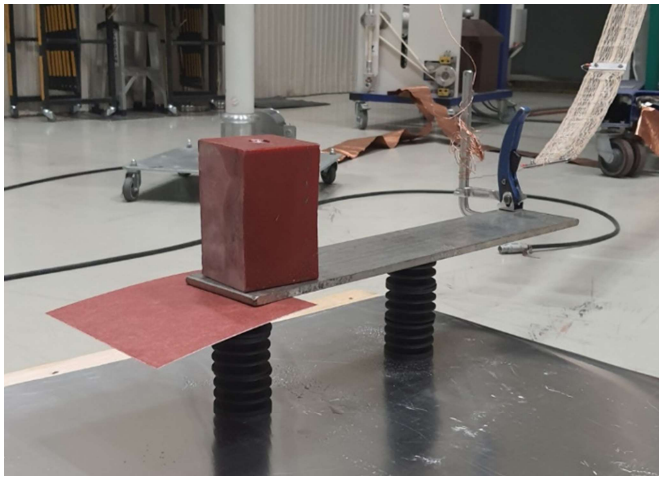
Şekil 7.13: İki silindirik takoz ile yapılan deney düzeneği.

İki silindirik takoz üst üste 90mm yükseklikte 162,500kV'a kadar dayanabildiği tespit edilmiştir. İki adet leplast takoz üst üste konulduğunda 76mm mesafe ile 92,582kV'a

dayandığı tespit edilmişti. Silindirik takoz dış yüzeyi ve mesafesinin avantajı ile iki üst üst takoz düzeneği için de dayanma gerilimi daha yüksek çıkmıştır.

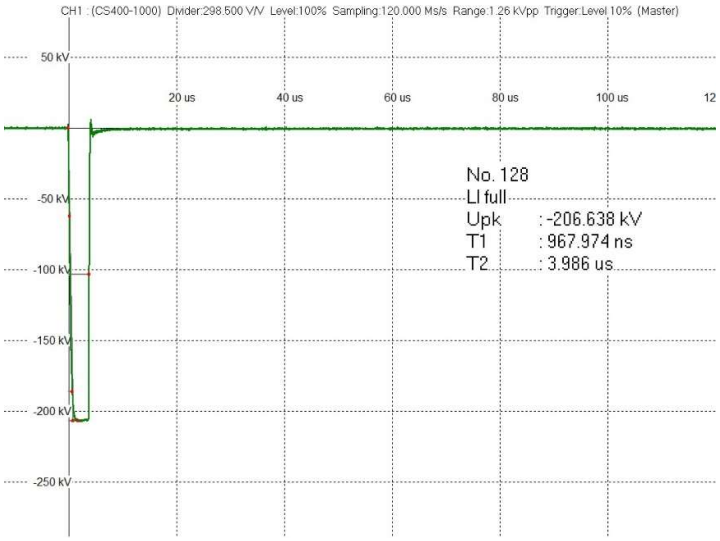
7.1.6 Kuru Hava Ortamında Silindirik Üç Takoz Deneyi

İki elektrot arasında silindirik takoz adedi 3'e çıkarılarak mesafe 135mm olarak güncellenmiş ve deneylere devam edilmiştir. Deney düzeneği Şekil 7.14'te görülmektedir.



Şekil 7.14: Üç silindirik takoz ile yapılan deney düzeneği.

Üç silindirik takoz üst üste yapılan deney düzeneğinde dayanma gerilimi 206,638kV olarak tespit edilmiştir ve Şekil 7.15'te gösterilmektedir.



Şekil 7.15: Üç silindirik takoz ile yapılan testin sonucu.

Leplast 3 takoz üst üste konumlandırıldığında 114mm mesafede dayanma gerilimi 131,296kV olarak tespit edilmişti. Silindirik takoz için kurulan benzer düzenekte 135mm mesafede bu değerin 206,638kV olarak tespit edilmesi, bu deney düzeneği için de silindirik takozun daha dayanıklı olduğunu göstermektedir.

7.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Elektrik Alan Analizi

Katı yalıtkan delinme dayanım gerilimleri ve elektrik alan değerleri Ansys Maxwell programı kullanılarak incelenmiştir. Bölüm 7.1'de yapılan tüm deney modellerinin Ansys Maxwell programında simulasyonu yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Delinme gerilimine göre elektrik alan değişimleri arası ilişki yorumlanmıştır.

Ansys Maxwell programı Sonlu Elemanlar Yöntemi altyapılı bir simülasyon programıdır. Sonlu Elemanlar Yöntemi, karmaşık yapılı sınır değer problemlerine yaklaşık çözümler elde etmek için kullanılan bir sayısal yöntemdir. Sonlu Elemanlar Yöntemi, karmaşık bir problemi basit, küçük, çok sayıda birbirine bağlı sonlu eleman olarak isimlendirilen alt bölgelere indirgeyerek çözüme ulaştıran bir yöntemdir. Birbirine bağlı çok sayıda parçalar halindeki problemlerin çözümü bu yöntemle kolayca yapılabilmektedir [42].

Ansys Maxwell programı hem elektrik alan problemlerinde hem de manyetik alan problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır [43]. Problemlerin çözümü altyapısında önemli denklemlerin çözümü ile elde edilmektedir. Programın çözümü için kullanılan kanunlar şu şekildedir: Faraday İndüksiyon Kanunu, Gauss Manyetik Alan Kanunu, Amper Akım Kanunu, Gauss Elektrik Alan Kanunu. Kanunlar sırasıyla Eşitlik (7.1), Eşitlik (7.2), Eşitlik (7.3) ve Eşitlik (7.4)'te denklemleriyle ifade edilmektedir [44].

Faraday İndüksiyon Kanunu:

$$\nabla \text{x E} = -\frac{\partial \text{B}}{\partial t} \tag{7.1}$$

Gauss Alan Kanunu:

$$\nabla \text{. B} = 0 \tag{7.2}$$

Amper Akım Kanunu:

$$\nabla \text{ x } H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \tag{7.3}$$

Gauss Elektrik Alan Kanunu:

$$\nabla \text{ . } D = \rho \tag{7.4}$$

E = Elektrik alan şiddeti (Volt/metre)

D = Elektrik akı yoğunluğu (Coulomb/m^2)

H = Manyetik alan şiddeti (Amper/metre)

B = Manyetik akı yoğunluğu (Weber/m^2)

J = Elektrik akım yoğunluğunu (Amper/m^2)

ρ = Hacimsel elektrik yükü yoğunluğu

Yazılımın tercih edilmesinin nedeni, lineer olmayan problemlerin çözümündeki uygunluğu, yazılımın kullanıcı arabiriminin kullanışlı ve hızlı çözüm yatkınlığı ve görsel olarak tatmin edebilir olmasıdır. Ansys Maxwell programının çalışmada kullanımı 5 adımda gerçekleştirilmiştir [45]:

Adım 1 – Geometrinin çizimi ve elemanların tanımlanması

Adım 2 – Geometrinin bileşenlerini oluşturan malzemelerin tanımlanması

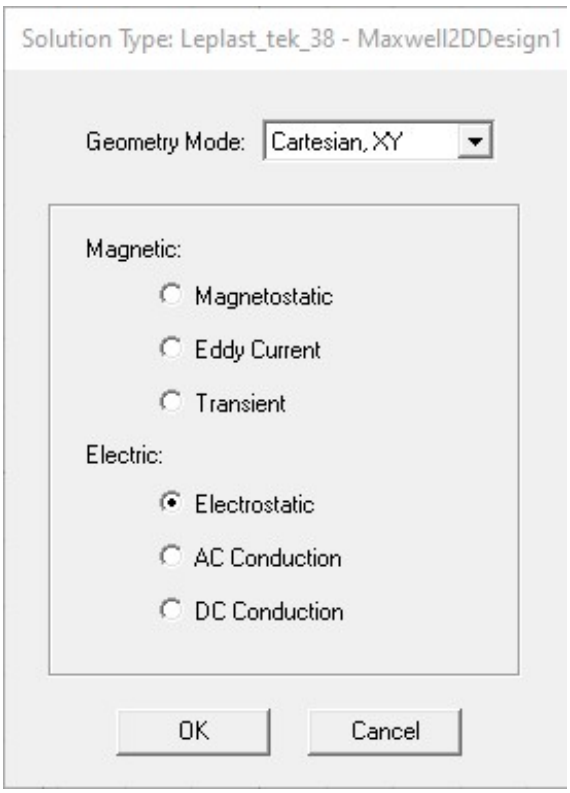
Adım 3 – Sınır değerlerin ve uyartım yapılacak kaynakların belirlenmesi

Adım 4 – Problemlerin çözülmesi

Adım 5 – Sonuç izleme ve yorumlama

Tablo 7.1'de belirtilen tüm deneyler Ansys Maxwell programında simule edilerek, dayanma gerilimi ve elektrik alan şiddetleri incelenmiştir. Bölüm 7.1'deki deneyler sırasıyla hem geometri çizimleri hem de elektrik alan şiddetleri incelenerek yorumlanacaktır. Ansys Maxwell programında analiz aşamaları şu şekilde basitçe özetlenebilmektedir [44]:

Adım 1 – Deney simulasyonu yapılırken Şekil 7.4'te gösterilen deney modeli baz alınarak basitçe modellenmiştir. Analiz elektrik alan şiddetini görebilmek için problem çözümlerinden "Electrostatics" çözümü seçilerek başlanmıştır. Problem çözümü seçimi Şekil 7.16'da gösterilmektedir. Problem çözümünde leplast takozlar için geometri tanımı kartezyen, silindirik takozlar için geometri tanımı silindirik olarak yapılmıştır.

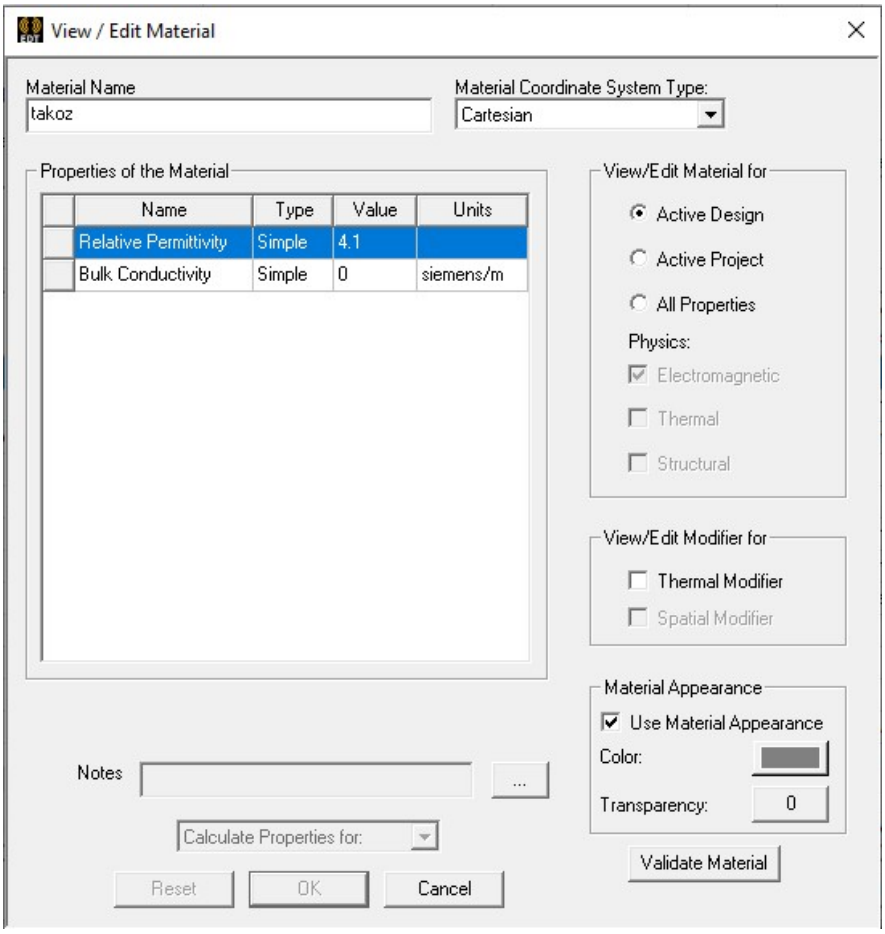


Şekil 7.16: Problem çözümü seçimi.

Üst elektrot, alt elektrot, katı yalıtkan çizimleri yapılmıştır. Geometri çizimleri Şekil 7.17'de gösterilmektedir. Çizilen geometri bileşenleri isimlendirilmiştir.

Şekil 7.17: Elektrotların ve katı yalıtkanın çizimi ve yerleşimi.

Adım 2 – Bileşenlerin malzemeleri tanımlanmış olup her bir malzemenin dielektrik katsayısı girilmiştir. Malzeme tanımları ve dielektrik katsayı girdisi Şekil 7.18'de gösterilmektedir.



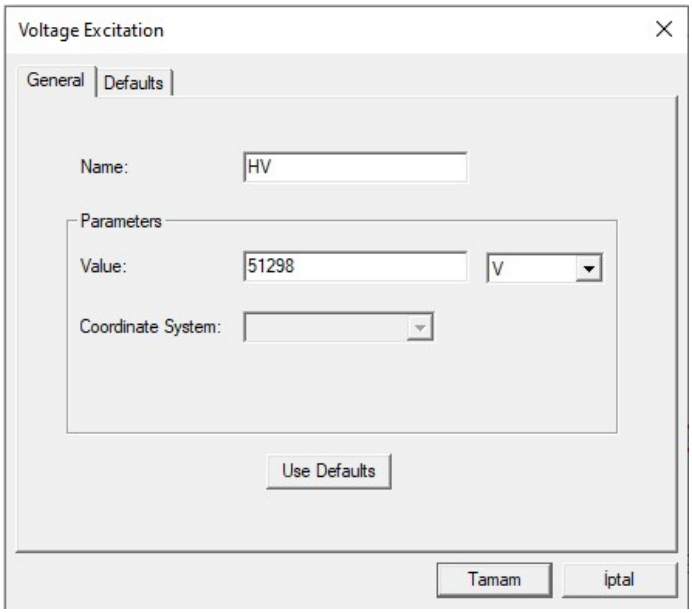
Şekil 7.18: Malzeme tanımı ve dielektrik katsayı girdisi.

Geometri malzeme bileşenlerinin dielektrik katsayıları için Tablo 7.2'de verilen değerler kullanılmıştır.

Tablo 7.2: Kuru havada, nemli havada farklı malzeme yükseklikleri ile yapılan deney düzenekleri.

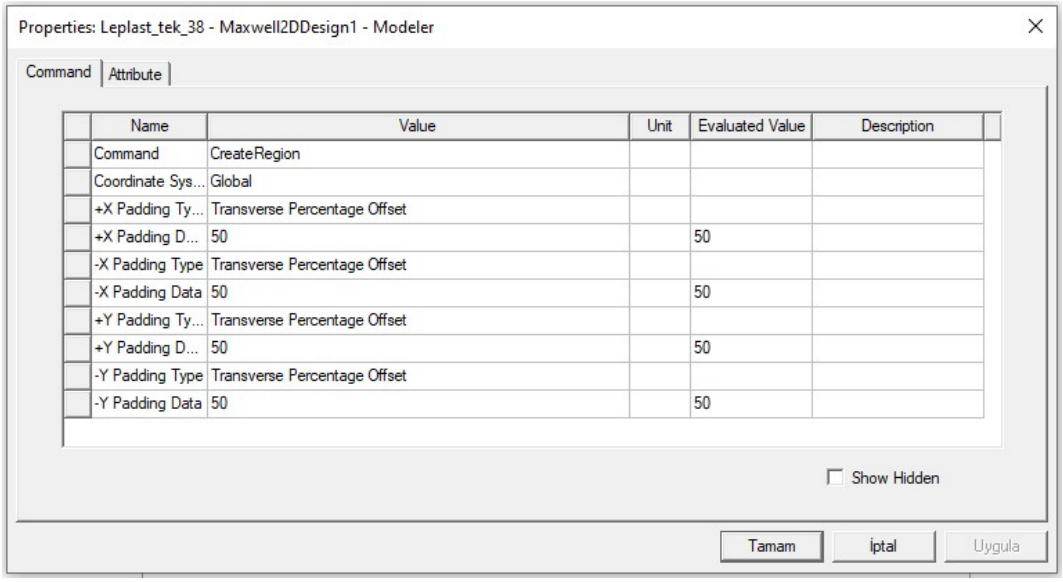
Malzeme	Dielektrik Katsayısı (Ɛr)
Hava	1
Takozlar	4,1

Adım 3 – Deneye göre alt elektrot topraklı, üst elektroda gerilim verilerek deney yapılmıştır. Deney ortamı olarak hava kullanılmıştır. Şekil 7.19'da gösterilen sınır koşulu çerçevesinde alt elektroda 0 volt gerilim, üst elektroda dayanması gereken gerilim değerleri atanmıştır.

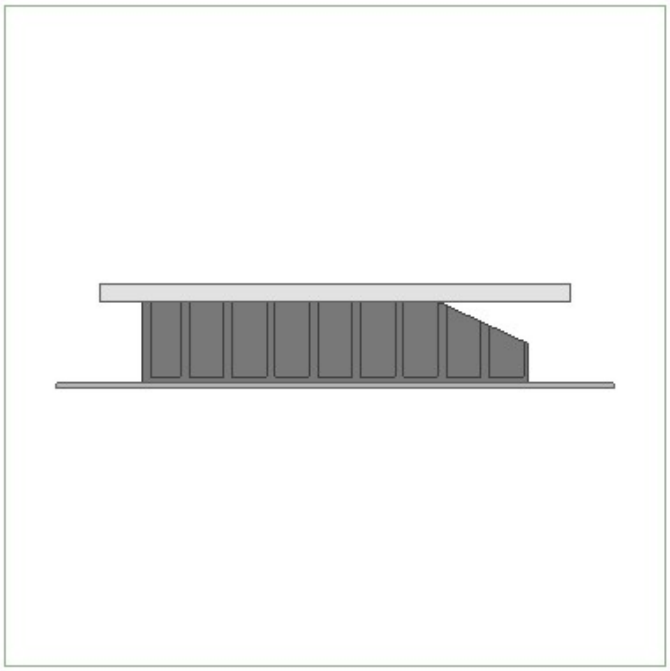


Şekil 7.19: Elektrotlara gerilim değeri atama.

Deney yalnızca hava ortamının etkisinde olmalıdır. Dolayısıyla deney geometrileri kapalı bir kutu içerisinde hava ortamı ile tanımlı alanda yer almaktadır. Kapalı geometrinin sınırı 0 volt gerilim değerindedir. Geometriyi kapalı alan içerisine yerleştirme aşaması Şekil 7.20'de gösterilmektedir. Kapalı alan içerisinde deney düzeneğinin simulasyon çizimi Şekil 7.21'de gösterilmektedir.

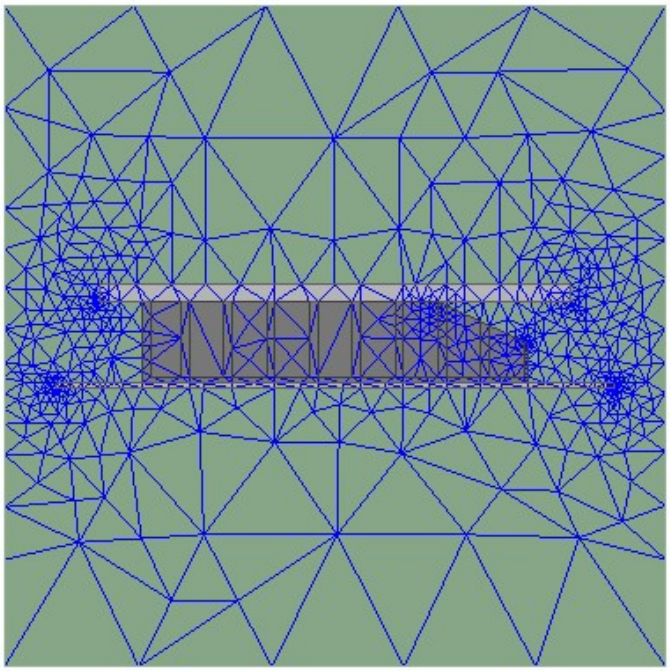


Şekil 7.20: Kapalı alan oluşturma.



Şekil 7.21: Kapalı alan içerisinde deney düzeneği simulasyon çizimi.

Adım 4 – Problemlerin çözümü için programda geometri küçük sonlu elemanlara bölünmek istenmiştir. Sonlu elemanlara bölme işlemi yapılmaktadır. Yapının ağlara bölünmüş hali Şekil 7.22'de gösterilmektedir.

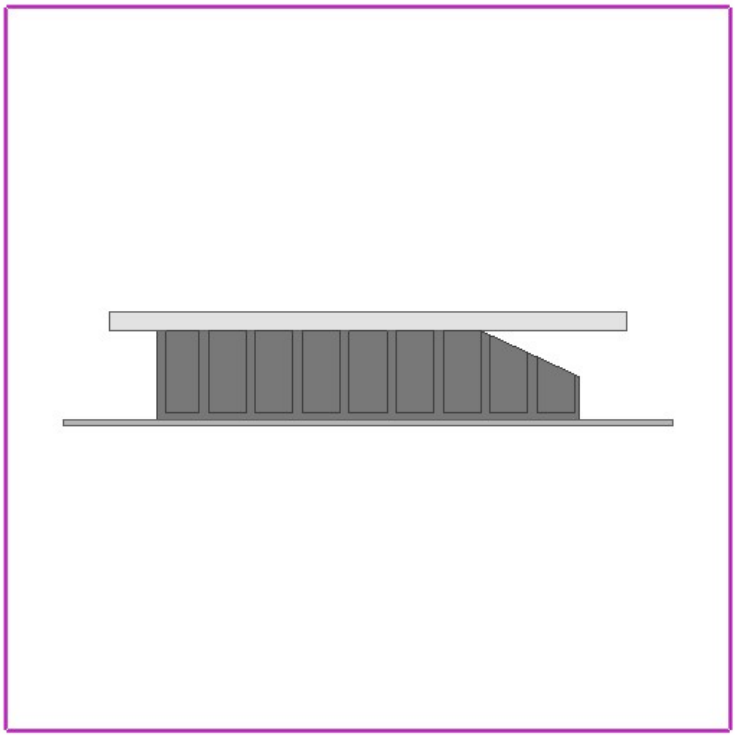


Şekil 7.22: Geometrinin sonlu elemanlara bölünmüş hali.

Adım 5 – Sonlu elemanlara bölündükten sonra programa analiz yaptırılmaktadır. Her bir deney için çıkan analiz sonuçları ayrı ayrı incelenecektir.

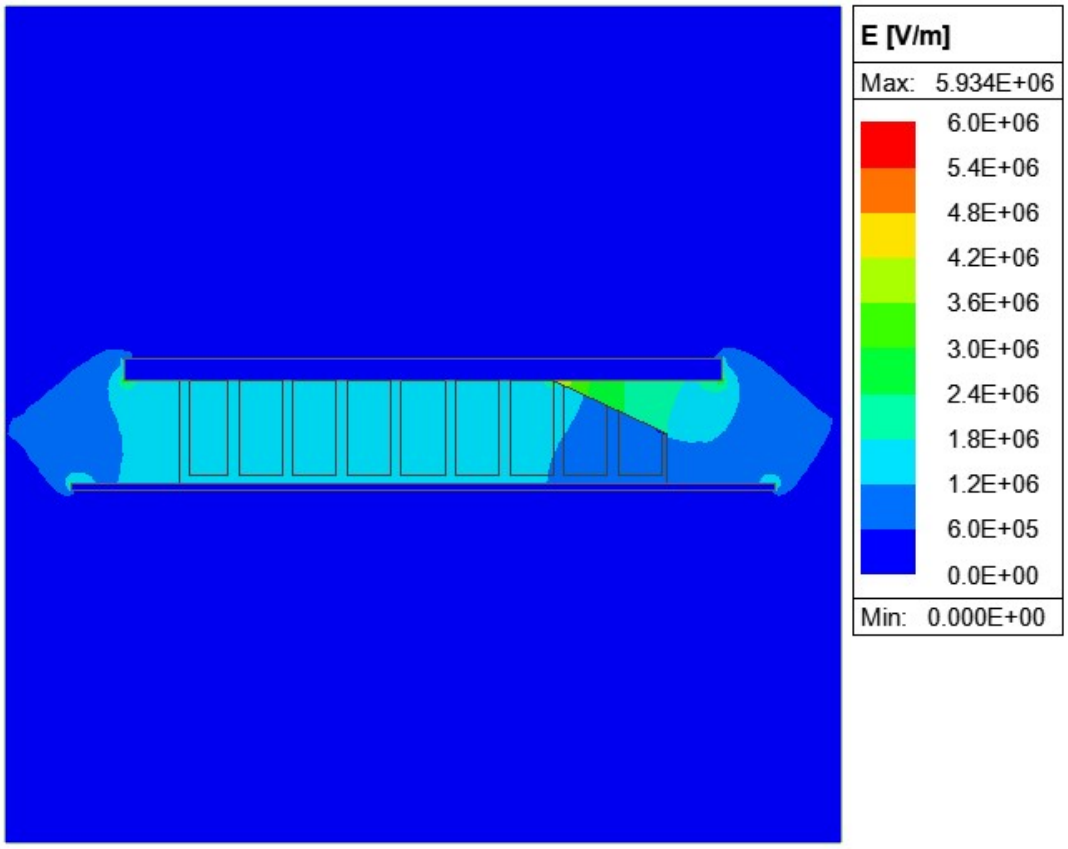
7.2.1 Kuru Hava Ortamında Leplast Tek Takoz Deneyi Maxwell Analizi

Kuru hava ortamında leplast tek takoz kullanılarak yapılan deneyin Maxwell programında çizimi Şekil 7.23'de gösterilmektedir.



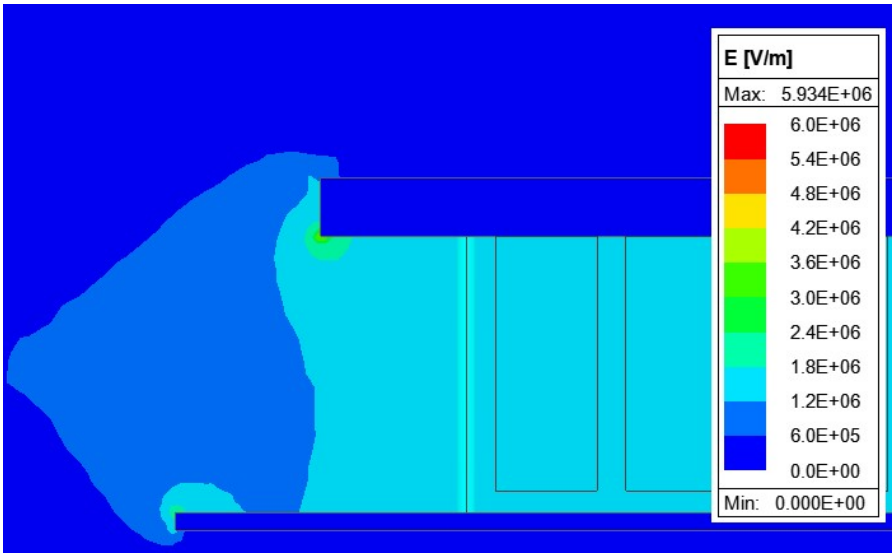
Şekil 7.23: Tek leplast takoz ile yapılan deneyin Maxwell programında çizimi.

Simülasyonun analizi Şekil 7.24'te gösterilmektedir. Deneyde tespit edilen delinme gerilim değeri olan 51,298kV üst elektroda uygulanmıştır ve renk değişimi görülmektedir. Elektrik alan yoğunluğu çoktan aza doğru sırasıyla kırmızı, turuncu, sarı, yeşil, mavi şeklinde olduğu görülmektedir. Her renk tonu ayrı bir elektrik alan değerini ifade etmektedir. Şekil 7.24'te maksimum elektrik alan değeri 5,934e+06 V/m, minimum elektrik alan düzeneğin en uzak noktaları olarak 0 V/m olarak görülmektedir.



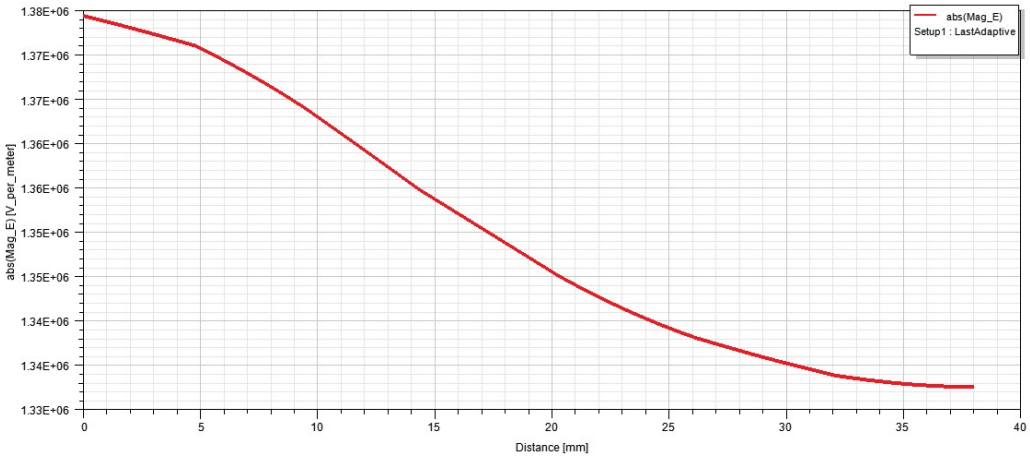
Şekil 7.24: Tek leplast takoz ile yapılan deneyin elektrik alan analiz görseli.

Havanın delinme gerilimi standart koşullar altında 29,8kV/cm olduğu bilinmektedir. Yaklaşık 30kV/cm olduğu düşünülürse renk skalasında "3e+006" değerine karşılık gelmesi beklenmektedir. Deney hava ortamında yapıldığından üst elektroda gerilim uygulandığında havanın delinme gerilimini geçtiği noktalarda delindiği düşünülmektedir. Şekil 7.24'te "3e+006" değeri ve üzeri, renk skalasında orta nokta ve üzeri olduğu görülmektedir. Şekil 7.24'e göre yeşilin bir kısmı, sarı, turuncu ve kırmızı tonların olduğu konumlarda elektrik alan değeri yüksek dolayısıyla bu noktalarda delindiği düşünülmektedir. Renk skalasına göre elektrik alan değerinin yoğun olduğu yerler, elektrotların köşe noktaları ve takozun gerilim verilen elektroda yakın olduğu dar alanlar olarak görülmektedir. Elektrotların köşe noktalarındaki elektrik alan değişimi Şekil 7.25'te gösterilmektedir.



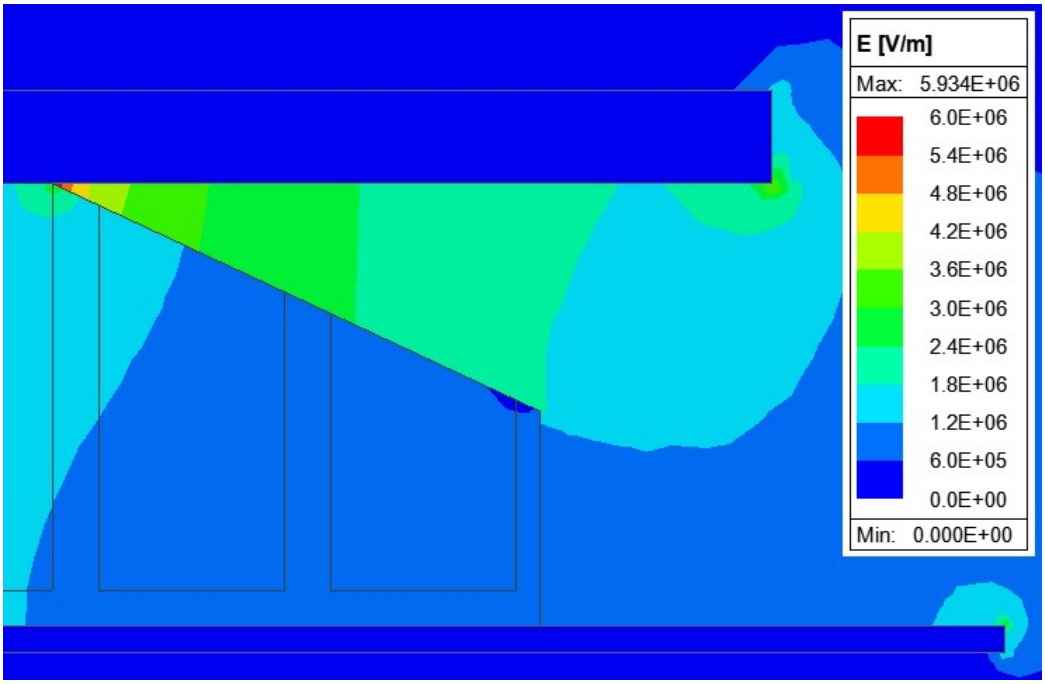
Şekil 7.25: Elektrotların köşe noktalarındaki elektrik alan değişimi.

Şekil 7.25'te takozun en üst noktasından en alt noktasına çizgi çekildiği görülmektedir. Bu iki nokta arası elektrik alan değişimi grafiği Şekil 7.26'da gösterilmektedir.



Şekil 7.26: Tek leplast takoz ile yapılan deneyin Maxwell analizinde takoz yüzeyine çizilen iki noktası arasındaki elektrik alan değişimi grafiği.

Şekil 7.26'a göre takozun en üst noktasından en alt noktasına elektrik alan değeri azalarak değişim göstermektedir. Grafikte gözlenen değişim, üst elektrottan alt elektroda gerilim değerinin azalmasından kaynaklı beklenen bir durumdur. Takozun en üst noktasında 1,38e+06 V/m elektrik alan değeri, deneyde verilen gerilimin uzaklığa oranıyla uyumlu olduğu görülmektedir.

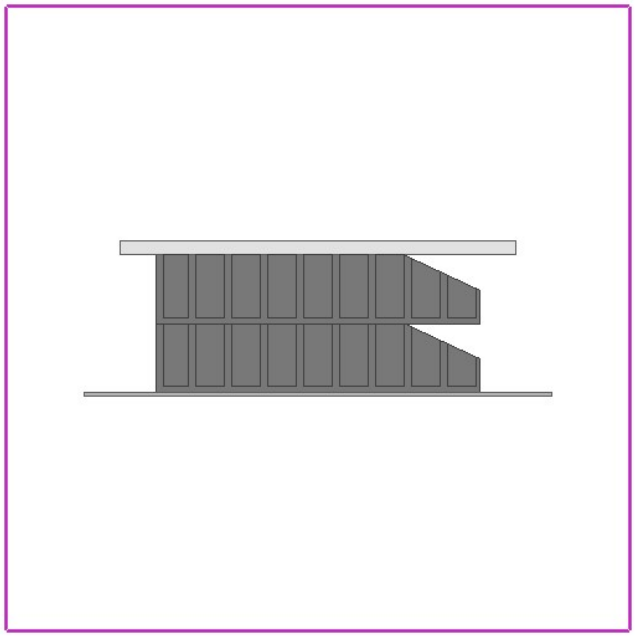


Şekil 7.27: Takozun gerilim verilen elektroda yakın olduğu dar alan.

Şekil 7.27'de takozun gerilim verilen elektroda yakın olduğu sivri kısımlardaki elektrik alan değişimi yakınlaştırılarak gösterilmektedir. Deney düzeneğinde gözlenen en yüksek elektrik alan 5,934e+06 değeri, gerilim verilen elektrot ile takoz arasından kalan en dar alanda meydana gelmektedir.

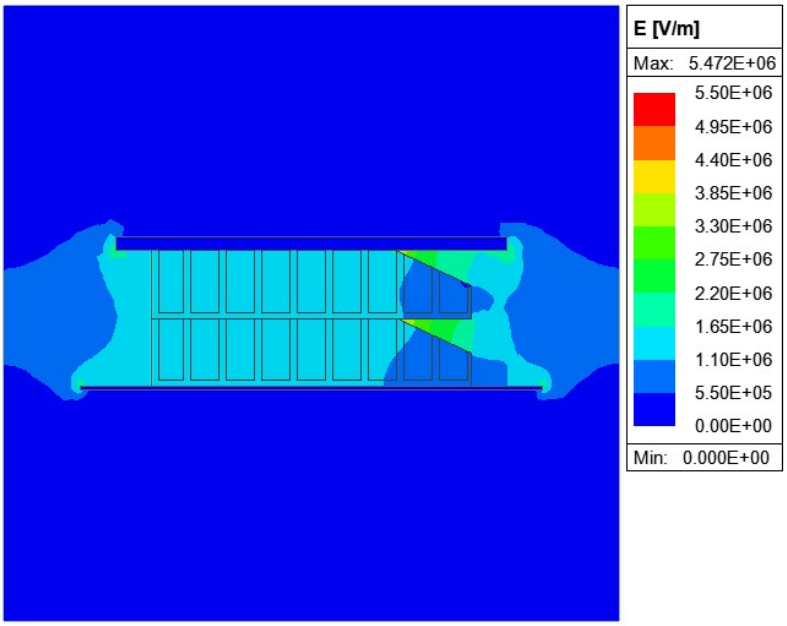
7.2.2 Kuru Hava Ortamında Leplast İki Takoz Deneyi Maxwell Analizi

Kuru hava ortamında iki leplast takoz üst üste konumlanmış iken delinme gerilimi deneyde 92,582kV tespit edilmişti. Delinme gerilimi uygulandığında takoz üzerinde oluşan elektrik alan incelenmek istendi. Şekil 7.28'de iki leplast takoz ile yapılan deneyin Maxwell çizimi görülmektedir.



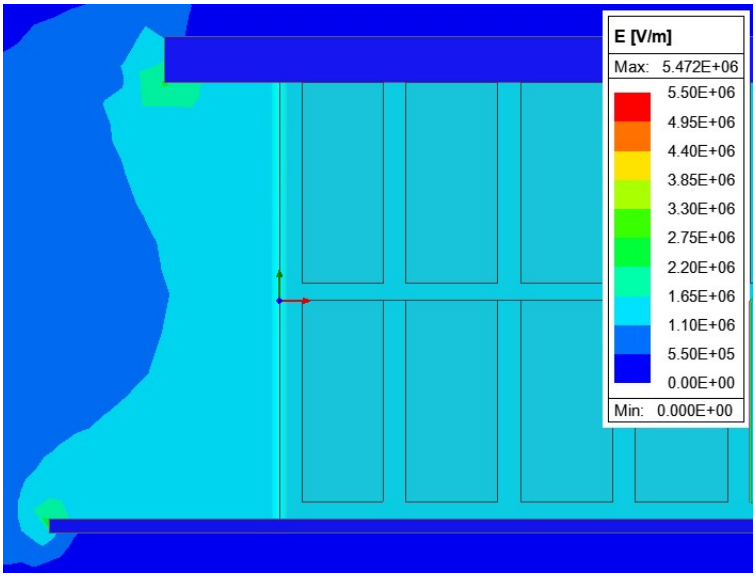
Şekil 7.28: İki leplast takoz ile yapılan deneyin Maxwell programında çizimi.

İki leplast takoz simülasyonunun analizi Şekil 7.29'da gösterilmektedir. Elektrik alan yoğunluğu çoktan aza doğru sırasıyla kırmızıdan laciverte doğru değişim gösterdiği görülmektedir. Her renk tonu ayrı bir elektrik alan değerini ifade edecek şekilde maksimum elektrik alan değeri 5,472e+06 V/m, minimum elektrik alan düzeneğin en uzak noktaları olarak 0 V/m olarak görülmektedir.



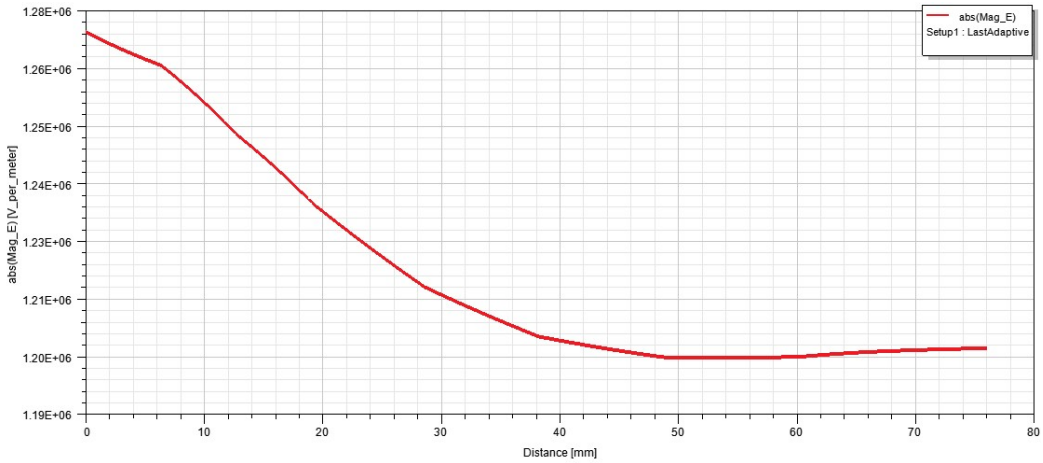
Şekil 7.29: İki leplast takoz ile yapılan deneyin elektrik alan analiz görseli.

Şekil 7.29'a göre elektrik alan yoğunluğu, tek takoz analizine benzer şekilde elektrot köşe noktaları, takozun gerilim verilen elektroda yakın olduğu dar alanlar ve takozlar arasında kalan dar alanlar olduğu görülmektedir. Elektrot köşe noktalarındaki elektrik alan değişimi yakınlaştırılmış hali Şekil 7.30'da gösterilmektedir.



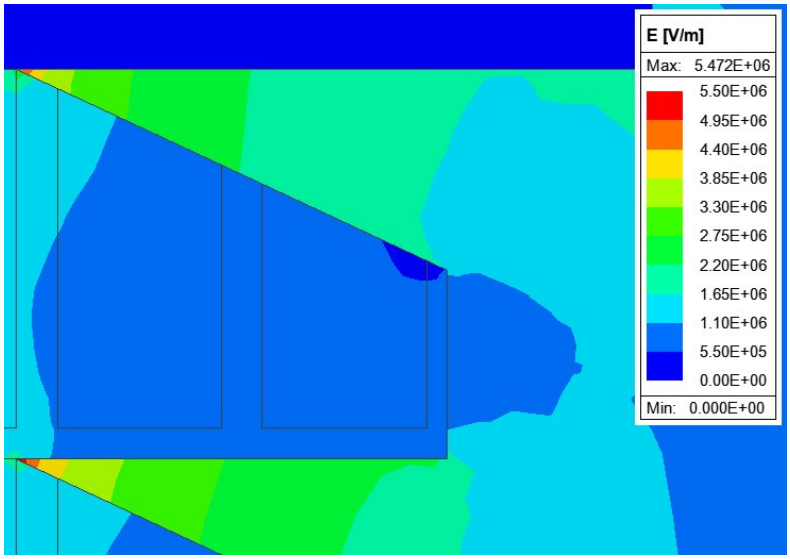
Şekil 7.30: Elektrotların köşe noktalarındaki elektrik alan değişimi.

Şekil 7.30'da takozun en üst noktasından en alt noktasına çizgi çekildiği görülmektedir. Bu iki nokta arası elektrik alan değişimi grafiği Şekil 7.31'de gösterilmektedir.



Şekil 7.31: İki leplast takoz ile yapılan deneyin Maxwell analizinde takoz üzerindeki elektrik alan değişimi grafiği.

Şekil 7.31'e göre takozun en üst noktasından en alt noktasına elektrik alan değeri azalarak değişim göstermektedir. Takozun en üst noktasında 1,27e+06 V/m elektrik alan değeri, deneyde verilen gerilimin uzaklığa oranıyla uyumlu olduğu görülmektedir.

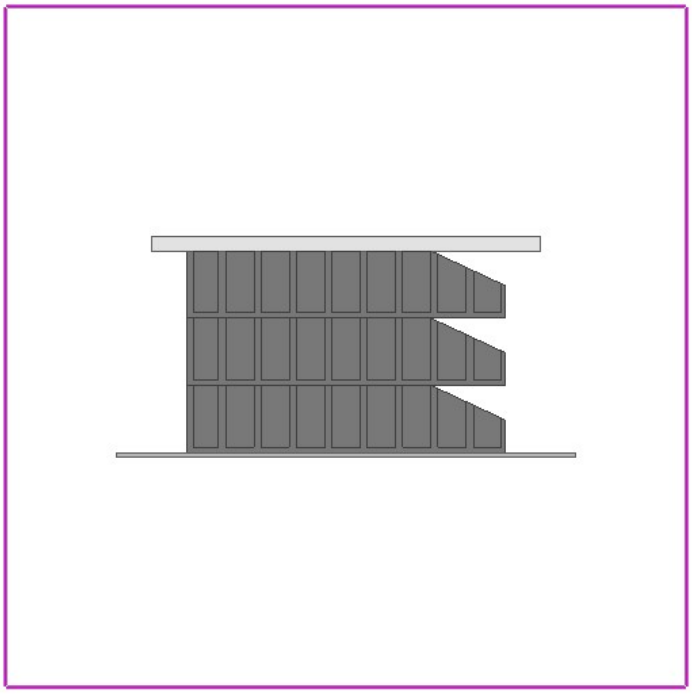


Şekil 7.32: Takozun gerilim verilen elektroda yakın olduğu dar alan ve takozlar arası dar alan.

Şekil 7.32'de takozun gerilim verilen elektroda yakın olduğu sivri kısımlardaki ve takozla arasında kalan dar alandaki elektrik alan değişimi yakınlaştırılarak gösterilmektedir. Deney düzeneğinde gözlenen en yüksek elektrik alan 5,472e+06 değeri, gerilim verilen elektrot ile takoz arasından kalan en dar alanda ve takozlar arasında meydana geldiği görülmektedir.

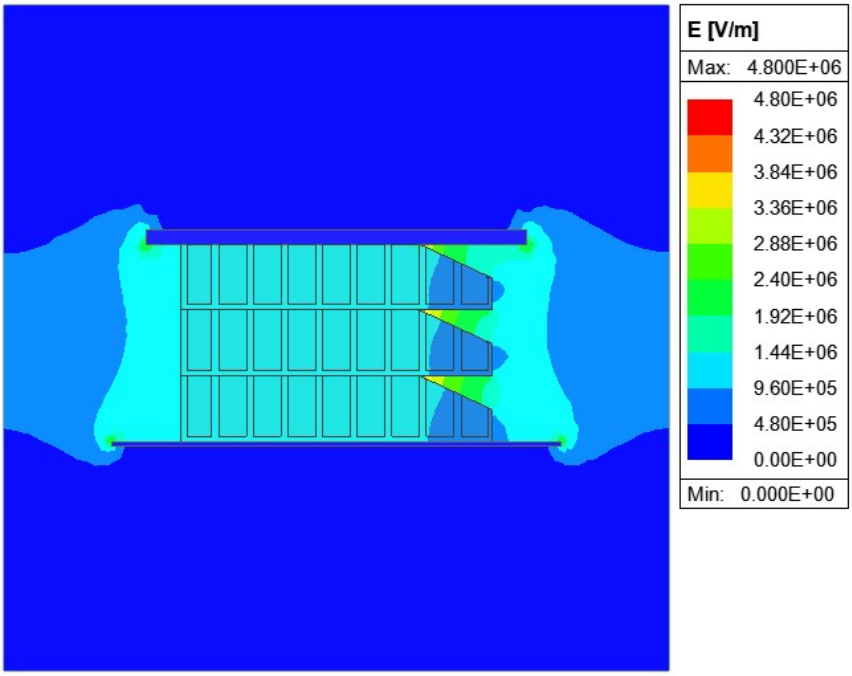
7.2.3 Kuru Hava Ortamında Leplast Üç Takoz Deneyi Maxwell Analizi

Üç leplast takoz üst üste konumlandırıldığında 114mm mesafe elde edilmektedir. 114mm mesafe için deneyde 131,296kV'a kadar dayanabildiği tespit edilmişti. Yapılan deneyin Maxwell programında çizimi Şekil 7.33'de gösterilmektedir.



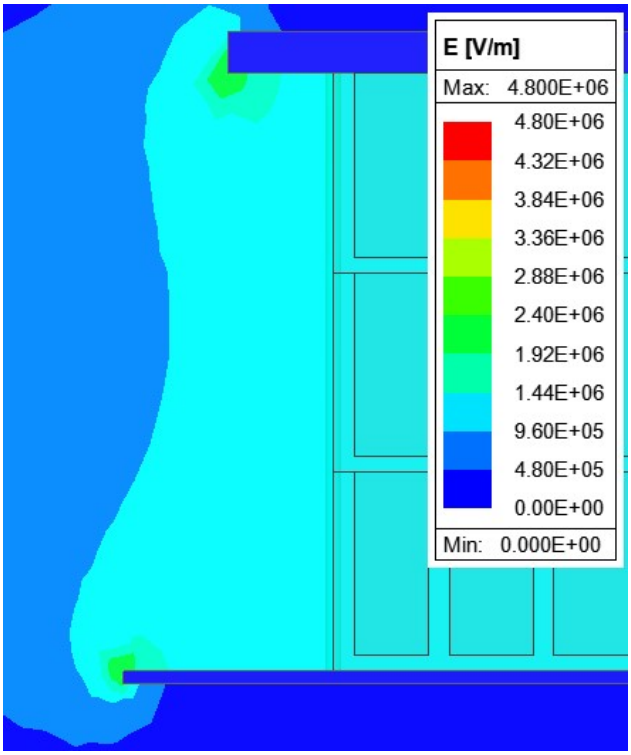
Şekil 7.33: Üç leplast takoz ile yapılan deneyin Maxwell programında çizimi.

Maxwell programında doğrulamak için yapılan analizde Şekil 7.34'te gösterilen elektrik alan değişimi ifade edilmektedir.



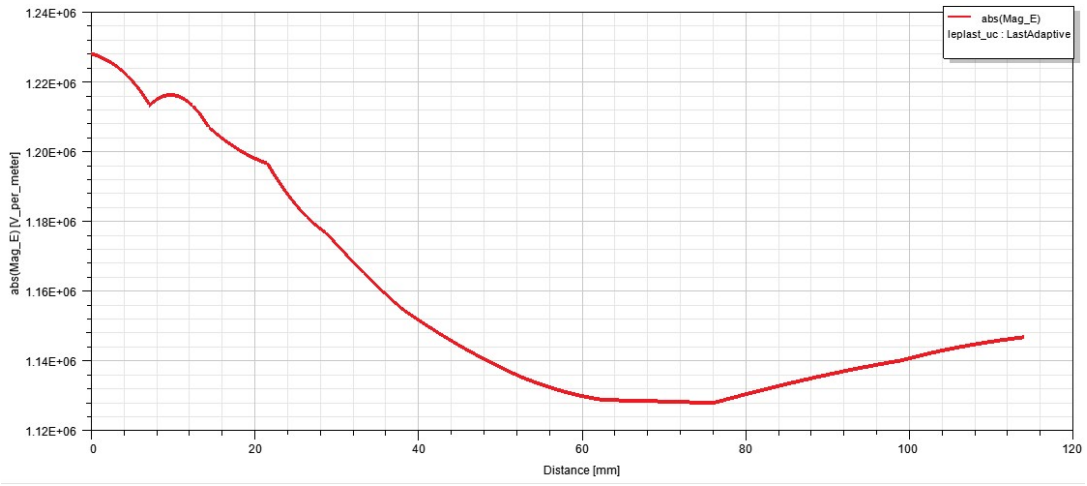
Şekil 7.34: Üç leplast takoz ile yapılan deneyin elektrik alan analiz görseli.

Şekil 7.34'te elektrik alan yoğunluğu çoktan aza doğru sırasıyla farklı renk tonlarıyla ifade edilmektedir. Maksimum elektrik alan değeri 4.8e+06 V/m, minimum elektrik alan düzeneğin en uzak noktaları olarak 0 V/m olarak görülmektedir. Havanın delinme gerilimi standart koşullar altında yaklaşık 30kV/cm olduğu düşünülürse renk skalasında "3e+006" değerine karşılık gelmesi beklenmektedir. Şekil 7.34'te "3e+006" değeri ve üzeri, renk skalasında orta nokta ve üzeri olduğu görülmektedir. Bu renk tonlarına sahip olan kısımlarda elektrik alan değerinin yüksek olduğu dolayısıyla delindiği düşünülmektedir. Renk skalasına göre elektrik alan değerinin yoğun olduğu yerler, elektrotların köşe noktaları, takozun gerilim verilen elektroda yakın olduğu dar alanlar ve takozlar arasında kalan dar alanlar olarak görülmektedir. Elektrotların köşe noktalarındaki elektrik alan değişimi Şekil 7.35'te gösterilmektedir.



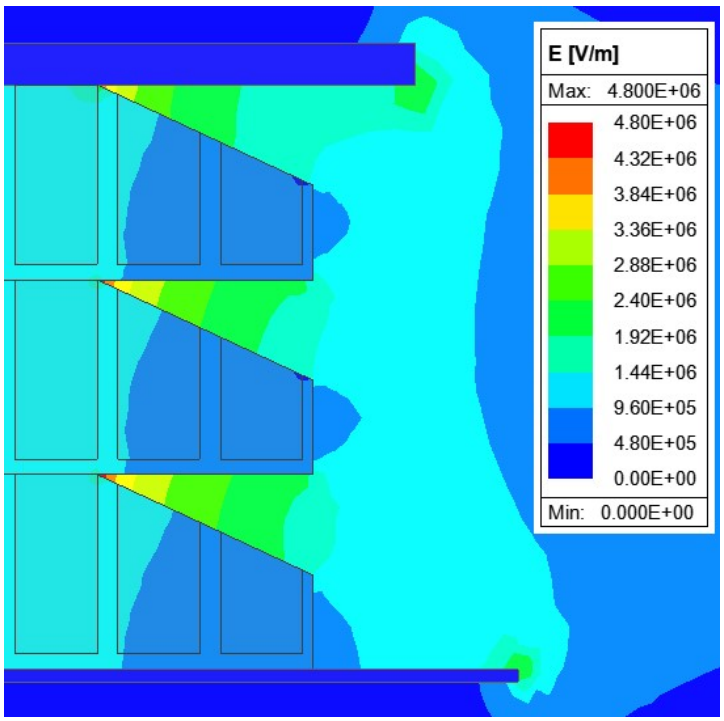
Şekil 7.35: Elektrotların köşe noktalarındaki elektrik alan değişimi.

Şekil 7.35'te takozun en üst noktasından en alt noktasına çizgi çekildiği görülmektedir. Bu iki nokta arası elektrik alan değişimi grafiği Şekil 7.36'da gösterilmektedir.



Şekil 7.36: Üç leplast takoz ile yapılan deneyin Maxwell analizinde takoz üzerindeki elektrik alan değişimi grafiği.

Şekil 7.36'a göre takozun en üst noktasında 1,23e+06 V/m elektrik alan değeri, deneyde verilen gerilimin uzaklığa oranıyla uyumlu olduğu görülmektedir. Takozun en üst noktasından en alt noktasına elektrik alan değeri azalarak değişim göstermektedir.

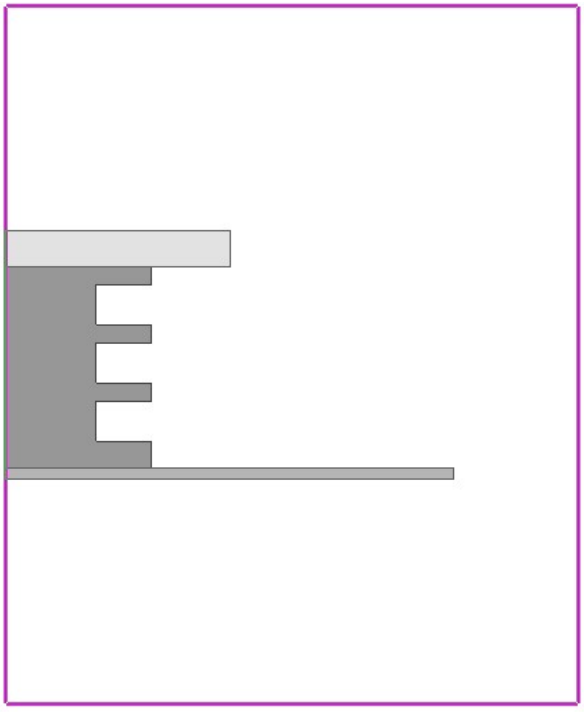


Şekil 7.37: Takozun gerilim verilen elektroda yakın olduğu dar alan ve takozlar arası dar alanlar.

Şekil 7.37'de takozun gerilim verilen elektroda yakın olduğu sivri kısımlardaki ve takozlar arasında kalan dar alanlardaki elektrik alan değişimi yakınlaştırılarak gösterilmektedir. Deney düzeneğinde gözlenen en yüksek elektrik alan 4.8e+06 değeridir. En yoğun elektrik alan değeri gerilim verilen elektrot ile takoz arasından kalan en dar alanda ve takozlar arasında meydana geldiği görülmektedir.

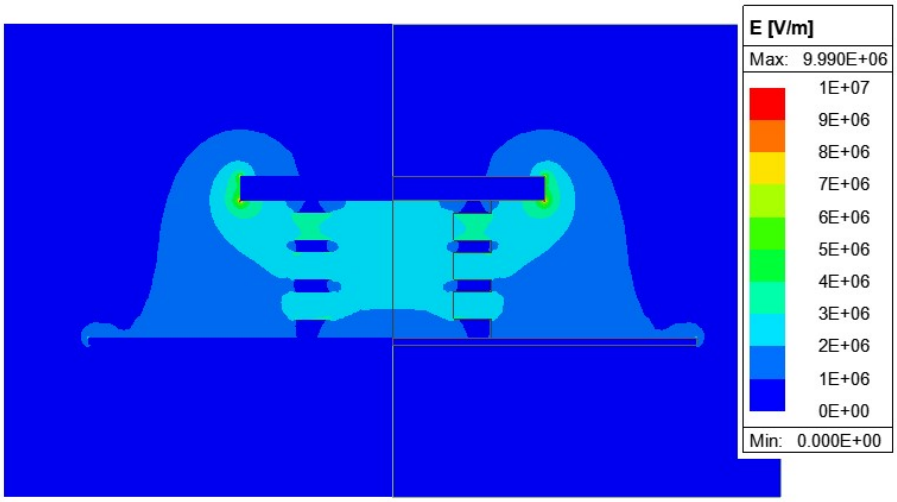
7.2.4 Kuru Hava Ortamında Silindirik Tek Takoz Deneyi Maxwell Analizi

Kuru hava ortamında yapılan silindirik takoz deneylerini doğrulamak için Maxwell programında analiz yapılarak çıkan sonuçlar değerlendirilmiştir. Şekil 7.38'de Maxwell programında yapılan analiz için silindirik takoz deney düzeneği simulasyon görseli yer almaktadır.



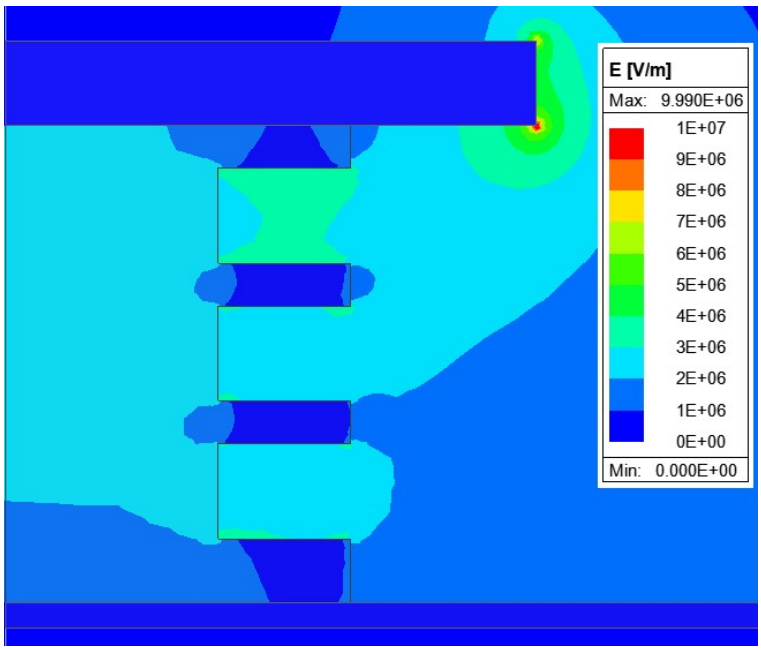
Şekil 7.38: Silindirik tek takoz ile yapılan deneyin Maxwell programında çizimi.

Silindirik takoz tek kullanıldığında 45mm mesafede deneyler yapılmıştır. 45mm mesafede silindirik takoz için yapılan deneyde 93,609kV'a kadar gerilim değerine dayandığı tespit edilmişti. Maxwell programında 93,609kv gerilim değeri için çıkan analiz sonucu Şekil 7.39'da gösterilmektedir.



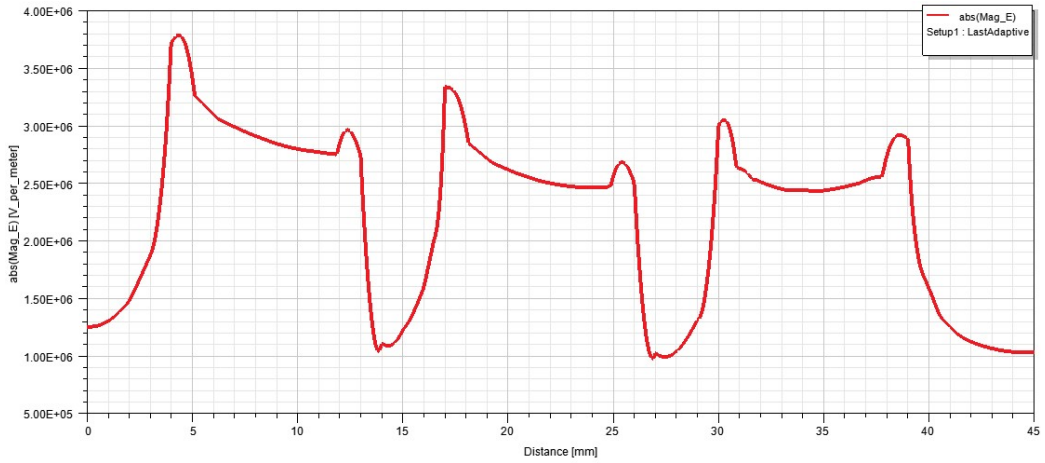
Şekil 7.39: Silindirik tek takoz ile yapılan deneyin elektrik alan analiz görseli.

Şekil 7.39'da "3e+006" değeri ve üzeri değer, renk skalasında orta noktadan itibaren bulunduğu gözlemlenmektedir. Belirtilen konumdaki renk tonlarına sahip olan kısımlarda elektrik alan değerinin yüksek olduğu dolayısıyla delindiği düşünülmektedir. Renk skalasına göre elektrik alan değerinin yoğun olduğu yerler, elektrotların köşe noktaları, takozun gerilim verilen elektroda yakın olduğu dar alan olarak görülmektedir. Elektrotların köşe noktalarındaki değişim yakınlaştırılarak Şekil 40'da gösterilmektedir.



Şekil 7.40: Elektrotların köşe noktalarındaki ve yüzey kıvrımları arasında elektrik alan değişimi.

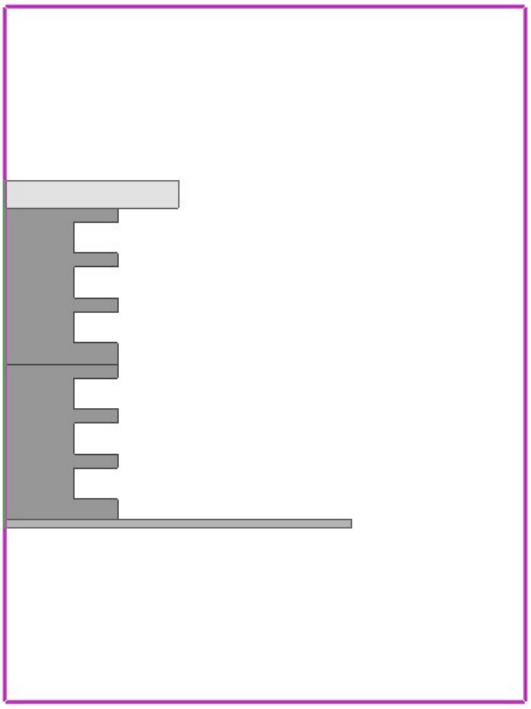
Silindirik takoz yüzeyine en üst noktadan en alt noktaya çizgi çekilerek yüzey üzerindeki elektrik alan değişimi incelenmiştir. Şekil 7.41'de belirtilen grafikte silindirik takoz yüzeyinde, üst elektrottan alt elektroda doğru elektrik alan şiddetinin basitçe azalmadığı görülmektedir. Silindirik takoz yapısındaki tırtıklı yüzey, her kıvrım içinde elektrik alan şiddetinin pik yaparak artmasına yol açtığı gözlemlenmiştir. Şekil 7.41'e göre takozun en üst noktasında 1,35e+06 V/m elektrik alan değeri, takoz yüzeyinde inildikçe kıvrımlarında elektrik alan değerinin yaklaşık 3,8e+06 V/m değerlerine kadar çıktığı gözlemlenmektedir. Takoz yüzeyinden aşağı inildikçe elektrik alan değeri her kıvrımda pik yaparak kademeli olarak azaldığı gözlemlenmektedir.



Şekil 7.41: Silindirik tek takoz ile yapılan deneyin Maxwell analizinde takoz üzerindeki elektrik alan değişimi grafiği.

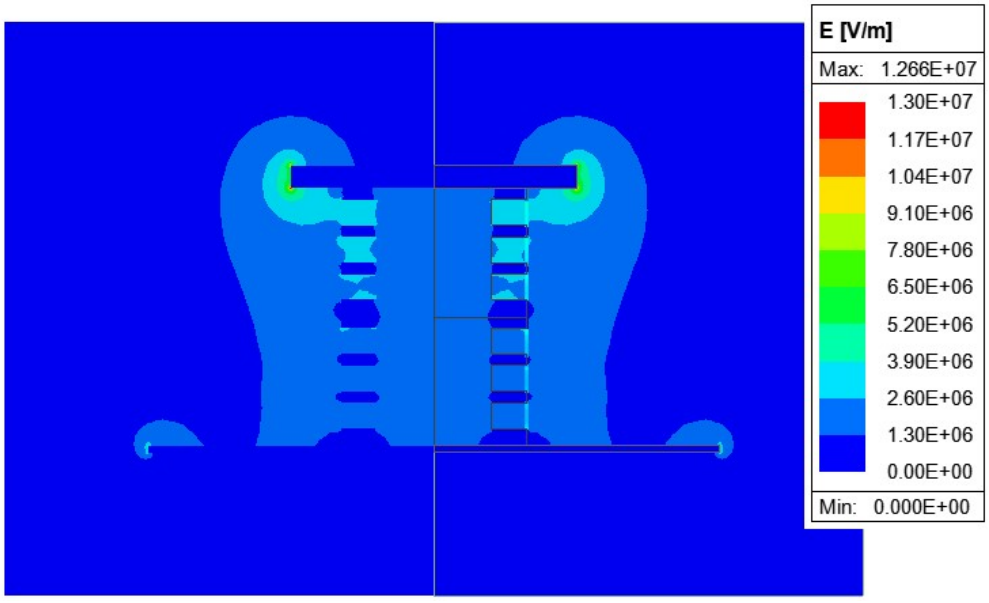
7.2.5 Kuru Hava Ortamında Silindirik İki Takoz Deneyi Maxwell Analizi

İki silindirik takoz üst üste konumlandırılarak yapılan deneyin Maxwell analizi için Şekil 7.42'de geometri çizimi yer almaktadır.



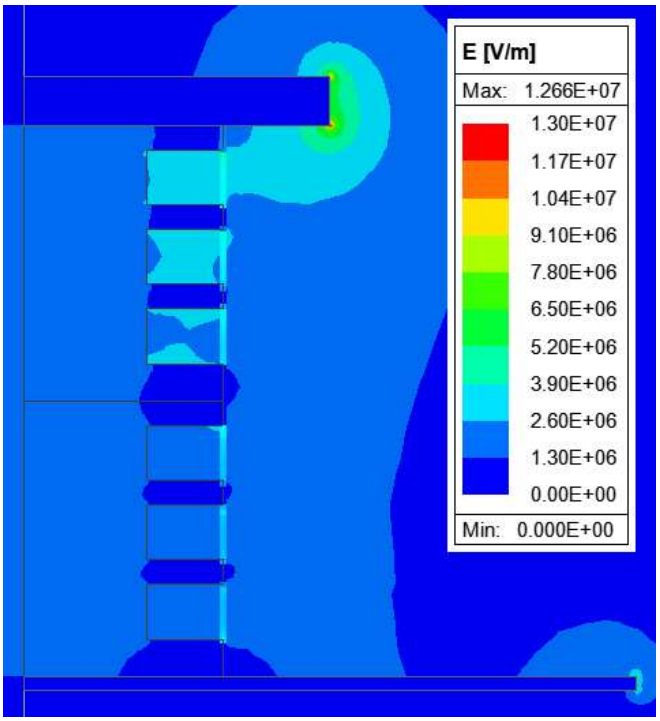
Şekil 7.42: Silindirik iki takoz ile yapılan deneyin Maxwell programında çizimi.

İki silindirik takoz üst üste konulduğunda elde edilen 90mm mesafe ile deneyde 162,5kV gerilim değerine kadar dayanabildiği tespit edilmişti. Delinme geriliminde yapılan analiz sonucu Şekil 7.43'te gösterilmektedir.



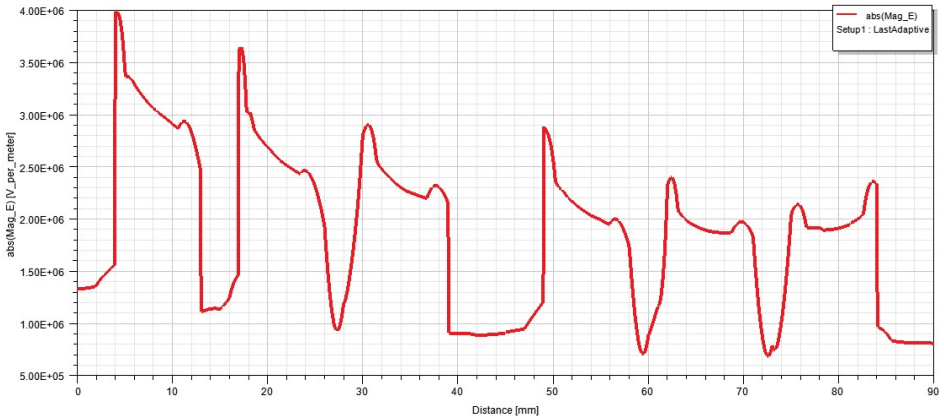
Şekil 7.43: Silindirik iki takoz ile yapılan deneyin elektrik alan analiz görseli.

Her renk tonu ayrı bir elektrik alan değerini ifade edecek şekilde maksimum elektrik alan değeri 1,266e+07 V/m, minimum elektrik alan düzeneğin en uzak noktaları olarak 0 V/m olarak görülmektedir. Havanın delinme gerilimi yaklaşık 3e+06 V/m alındığında, bu değere karşılık gelen ve üzerinde olan renk tonlarında delinmenin gerçekleştiği düşünülmektedir. Şekil 7.43'e göre elektrik alan şiddeti değerinin elektrotların köşe noktalarında ve takoz kıvrımları arasında yoğun olduğu gözlemlenmektedir. Elektrik alan değerinin yoğun olduğu yerler, elektrotların köşe noktaları, takozun yüzey kıvrımlarında görülmektedir. Elektrotların köşe noktalarındaki değişim yakınlaştırılarak Şekil 44'de gösterilmektedir.



Şekil 7.44: Elektrotların köşe noktalarındaki ve yüzey kıvrımları arasında elektrik alan değişimi.

İki elektrot arasında takozların yüzeyine temas halinde çizgi çizildiğinde oluşan elektrik alan grafiği Şekil 7.45'te görülmektedir.

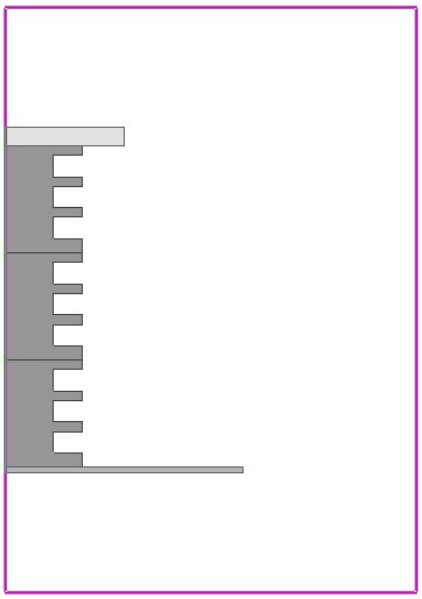


Şekil 7.45: Silindirik iki takoz ile yapılan deneyin Maxwell analizinde takoz üzerindeki elektrik alan değişimi grafiği.

Şekil 7.45'e göre takozun en üst noktasında 1,35e+06 V/m elektrik alan değeri, takoz yüzeyinde inildikçe kıvrımlarında elektrik alan değerinin yaklaşık 4e+06 V/m değerlerine kadar çıktığı gözlemlenmektedir. Takoz yüzeyinden aşağı inildikçe elektrik alan değeri her kıvrımda pik yaparak kademeli olarak azaldığı gözlemlenmektedir.

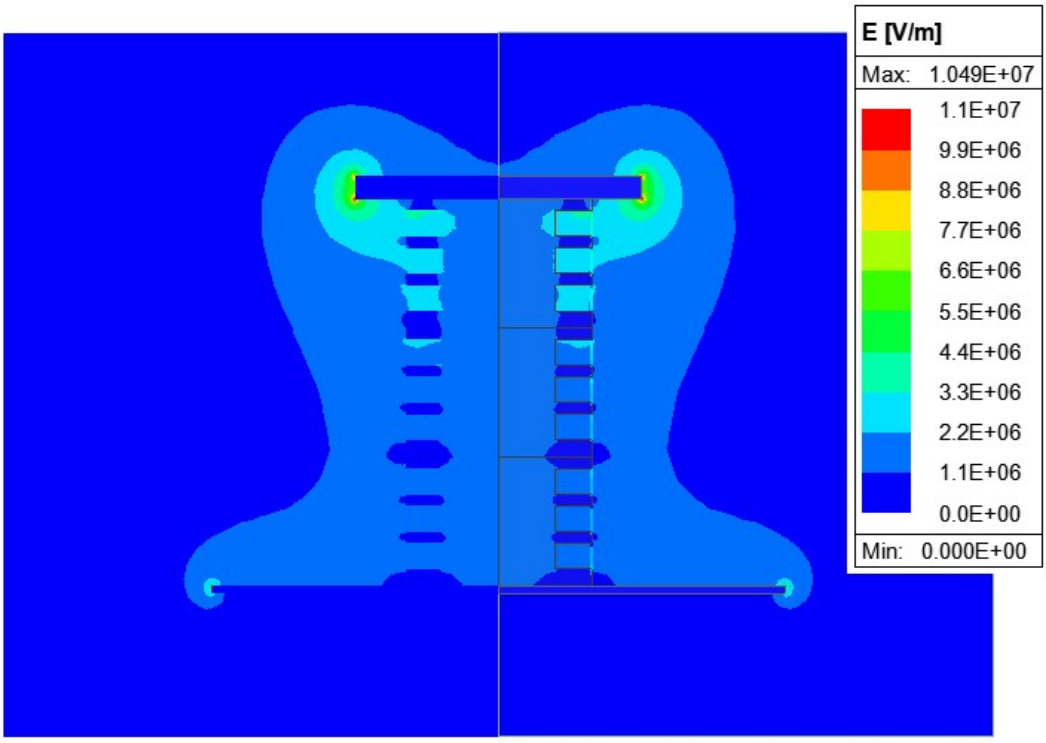
7.2.6 Kuru Hava Ortamında Silindirik Üç Takoz Deneyi Maxwell Analizi

Üç silindirik takozun üst üste konumlandırıldığı deneyin Maxwell çizimi Şekil 7.46'da görülmektedir.



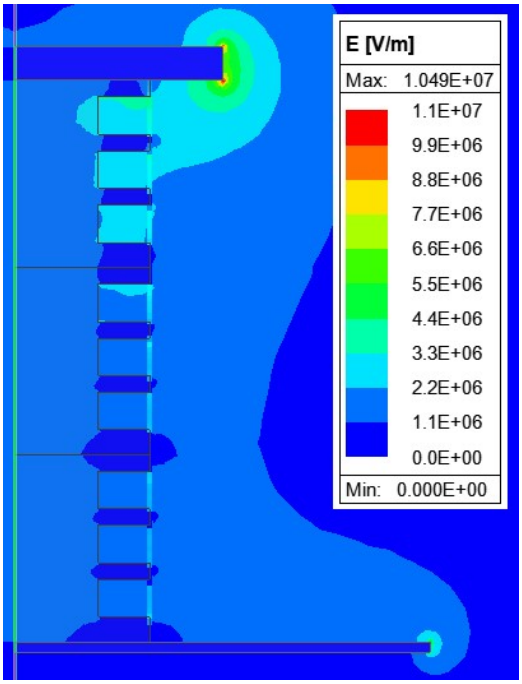
Şekil 7.46: Silindirik üç takoz ile yapılan deneyin Maxwell programında çizimi.

Üç silindirik takoz üst üste konumlandırıldığında 135mm mesafe elde edilmektedir. Bu mesafede iki elektrot arasında kalan takozun delinme gerilimi deneylerle 206,638kV tespit edilmişti. Bu değeri doğrulamak için yapılan analizin sonucu Şekil 7.47'de görülmektedir. Her renk tonu ayrı bir elektrik alan değerini ifade edecek şekilde maksimum elektrik alan değeri 1,049e+07 V/m, minimum elektrik alan düzeneğin en uzak noktaları olarak 0 V/m olarak görülmektedir. Havanın delinme gerilimi yaklaşık 3e+06 V/m alındığında, bu değere karşılık gelen ve üzerinde olan renk tonlarında delinmenin gerçekleştiği düşünülmektedir.



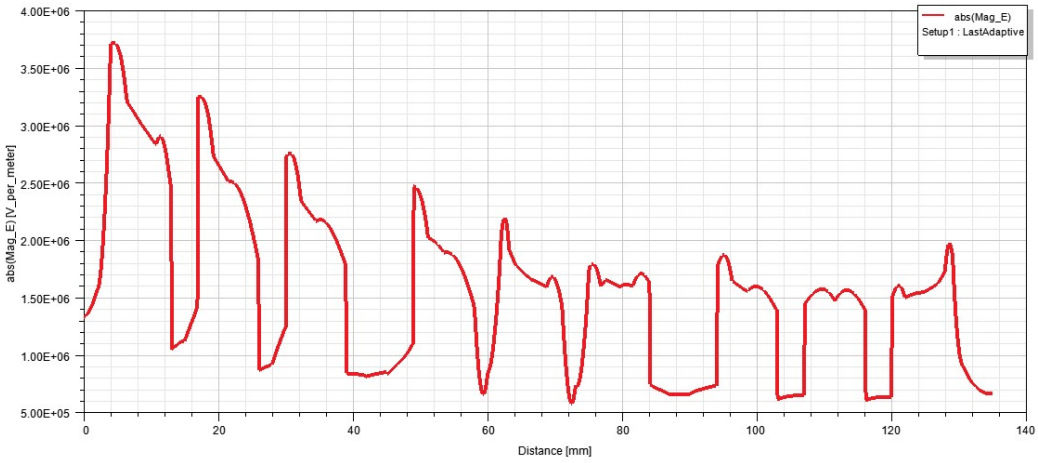
Şekil 7.47: Silindirik üç takoz ile yapılan deneyin elektrik alan analiz görseli.

Şekil 7.47'de en yüksek elektrik alan değerleri takoz kıvrımlarında ve elektrot köşe noktalarında görülmektedir. Takoz kıvrımlarının ve elektrot köşe noktalarının elektrik alan renk yoğunluğu yakınlaştırılarak Şekil 7.48'de gösterilmektedir.



Şekil 7.48: Elektrotların köşe noktalarındaki ve yüzey kıvrımları arasında elektrik alan değişimi.

İki elektrot arasında takozların dış yüzeyine temas halinde çizgi çizilerek elektrik alan değişimi grafiği Şekil 7.49'da incelenmektedir.



Şekil 7.49: Silindirik üç takoz ile yapılan deneyin Maxwell analizinde takoz üzerindeki elektrik alan değişimi grafiği.

Şekil 7.49'daki verilen grafiğe göre takozun en üst noktasında 1,35e+06 V/m elektrik alan değeri görülmektedir. Takoz kıvrımlarında bu değer yaklaşık 3,75e+06 değerine

çıkmaktadır. Elektrik alan değeri her kıvrımda pik yaparak gerilim kaynağından uzaklaştıkça elektrik alan değerinin azaldığı görülmektedir.

7.3 Deney Sonuçlarına Göre Delinme Gerilimi Tahmini

Tez çalışmasının amacı, kuru tip transformatörlerde faz-toprak arası mesafede delinme gerilimi hakkında yorum yapabilmek, delinme gerilimi hakkında tahmini değerler yürütebilmekti. Faz-toprak arası mesafenin değerlendirilebilmesi mevcutta kullanılan katı yalıtkan ve alternatif katı yalıtkan ile deneyler yapılmıştı. Deney sonuçları FEMM programı üzerinde doğrulanarak delinme gerilimine etki eden bileşenler tespit edilmiş ve ne kadar etki ettiği tespit edilmiştir. Delinme gerilimine etki edebilecek faktörlerin incelenebilmesi için nemli ve kuru hava koşullarında iki farklı fiziksel yapıda takozlar ile deneyler yapılmıştır. Her transformatör tasarımı için faz-toprak arası mesafede farklı açıklık değerlerine ihtiyaç olduğundan farklı mesafelerde deney koşulları sağlanmıştır. Farklı mesafe koşullarını sağlamak için transformatör montajında standart olarak uygunlandığı için tek takoz, iki takoz, üç takoz gibi varyasyonlarla çalışmalar yürütülmüştür. Yapılan tüm deneyler, deneysel yönteme göre tespit edilen dayanma gerilimi (kV) ve hesaplanarak sonlu elemanlar yöntemi ile doğrulanan elektrik alan şiddeti (kV/mm) ile Tablo 7.3'te verilmektedir.

Tablo 7.3: Tüm deneylerin delinme gerilimi ve delinme anındaki elektrik alan şiddeti değerleri.

	Deney No	Malzeme	Mesafe(mm)	Açıklama	Ortam	Delinme Gerilimi (kV)
KURU	1	Leplast	38	Tek malzeme	Kuru Hava	51,298
	2	Leplast	76	İki malzeme	Kuru Hava	92,582
	3	Leplast	114	Üç malzeme	Kuru Hava	131,296
	4	Silindirik	45	Tek malzeme	Kuru Hava	93,609
	5	Silindirik	90	İki malzeme	Kuru Hava	162,500
	6	Silindirik	135	Üç malzeme	Kuru Hava	206,638

Deneyler, ortak özelliklerine göre 6 farklı gruba ayrılarak 6 kategoride düşünülebilir. Kategoriler, leplast takoz kuru ortamdaki deneyler, leplast takoz nemli ortamdaki deneyler, leplast takoz izolasyon ekleriyle kuru ortamdaki deneyler, leplast takoz izolasyon ekleriyle nemli ortamdaki deneyler, silindirik takoz kuru ortamdaki deneyler ve silindirik takoz nemli ortamdaki deneyler olarak gruplandırılabilmektedir.

Kuru tip transformatör faz-toprak arasını modellemek için yapılan deneylerde iki elektrot arasında katı yalıtkan kullanılarak delinme gerilimi tahmini için ön çalışmalar yapılmıştı. Katı yalıtkan delinme süreçleri, delinme gerilimi tahmini için önemli bir aşamayı oluşturmaktadır, katı yalıtkanlarda delinme süreçleri Bölüm 6.3'te anlatılmaktadır. Yalıtkanın birden fazla delinme sebebi vardır. Delinme geriliminin hangi sebepten kaynaklandığını çözmek, ona göre bir yol izlemek gerekebilir. Fakat katı yalıtkanın delinme sebebi birden fazla olabileceği gibi, hangi sebepten kaynaklandığına net olarak karar vermek uygun değildir. Bu nedenle katı yalıtkanın delinme gerilimi tahmini için Bölüm 6.5'te anlatılan metod kullanılmıştır. Yapılan deneylerde çıkan sonuçlara göre delinmenin logaritmik bir denkleme sahip olduğu saptanmıştır. Dolayısıyla aynı özelliklerde olacak şekilde 6 kategoriye ayrılan deney değerleri için bir grafik oluşturularak logaritmik bir denklem çıkarılacaktır. Çıkarılan denklemde uygulanan gerilim yerine konulduğunda açıklık (mesafe) yerine konulduğunda delinme gerilimi tahmini yapılabilecektir.

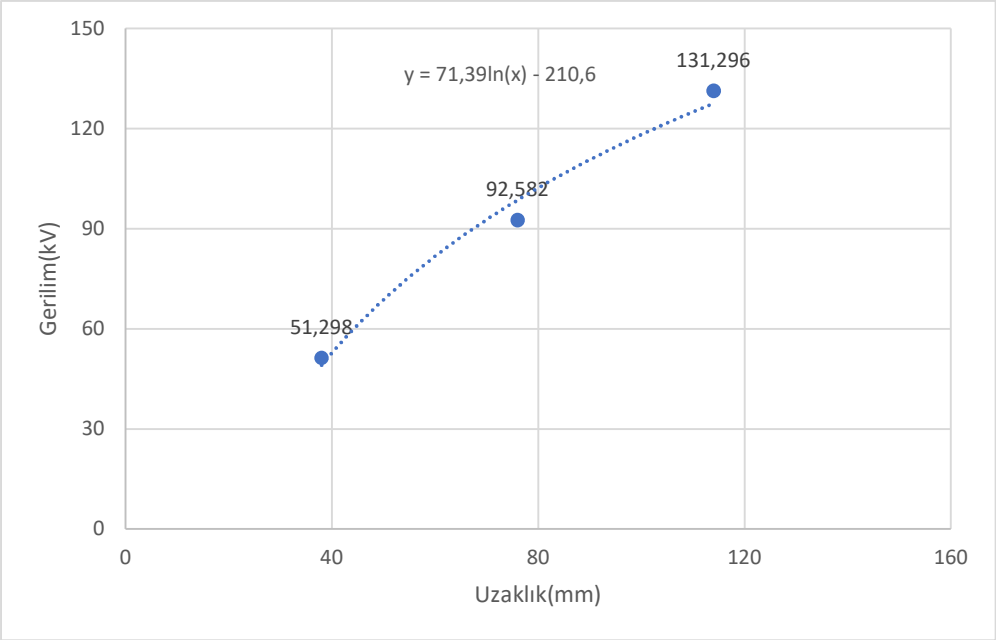
7.3.1 Kuru Hava Ortamında Leplast Takoz Delinme Gerilimi Tahmini

Leplast takozun kuru hava koşullarında yapılan deneylerde tespit edilen delinme gerilimi değerleri Tablo 7.4'te verilmektedir.

Tablo 7.4: Kuru hava ortamında leplast takoz deney sonuçları.

Uzaklık(mm)	Gerilim(kV)
38	51,298
76	92,582
114	131,296

Bölüm 6.5'te bahsedilen metoda göre Tablo 7.4'te verilen deney sonuçları grafik haline getirildikten sonra logaritmik bir denklem haline getirilmiştir. Deney sonuçlarına göre oluşturulan grafik ve denklemi Şekil 7.64'te gösterilmektedir.



Şekil 7.50: Kuru hava ortamında leplast takoz deney sonuçlarına göre oluşturulan grafik ve denklemi.

Grafiğin denklemi Eşitlik (7.1)'de verilmektedir.

$$Y = 71{,}39\ln(x) - 210{,}6 \tag{7.1}$$

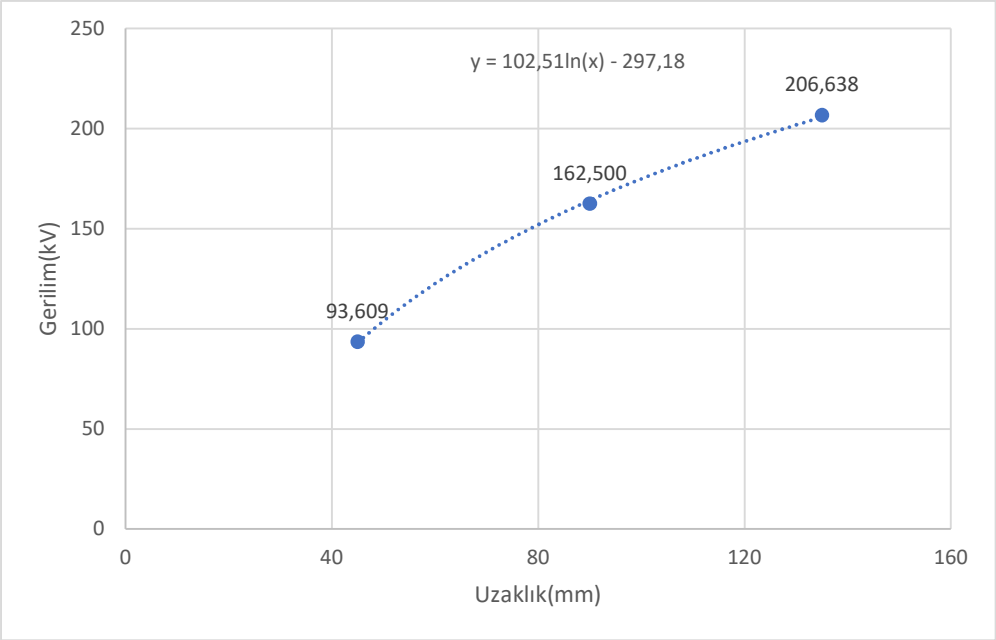
7.3.2 Kuru Hava Ortamında Silindirik Takoz Delinme Gerilimi Tahmini

Silindirik takozun kuru hava koşullarında yapılan deneylerinde tespit edilen delinme gerilimi değerleri Tablo 7.8'de verilmektedir.

Tablo 7.5: Kuru hava ortamında silindirik takoz deney sonuçları.

Uzaklık(mm)	Gerilim(kV)
45	93,609
90	162,500
135	206,638

Deney sonuçlarından delinme gerilimi tahmni için logaritmik denklem çıkarmak üzere grafik oluşturulmuştur ve Şekil 7.66'da gösterilmektedir.



Şekil 7.51: Kuru hava ortamında silindirik takoz deney sonuçlarına göre oluşturulan grafik ve denklemi.

Grafiğin denklemi Eşitlik (7.5)'te verilmektedir.

$$Y = 102{,}51\ln(x) - 297{,}18 \tag{7.5}$$

8. SONUÇLAR

Kuru tip transformatörlerde faz-toprak arası açıklığın tayini, dayanması gereken maksimum gerilim değerine göre yapılmaktadır. Maksimum gerilim değeri, nominal gerilim değerine göre IEC 60076-11 standardında belirtilen izolasyon seviyeleridir [20]. Kuru tip transformatörde izolasyon seviyelerine dayanması gereken faz-toprak arası açıklık, nüve-bobin arası mesafe ile bobin-klemp arası mesafedir. Bobin-klemp arasında yer alan takozlar üzerinden yüzey deşarjı olması ve delinmeye yol açması ihtimali yüksektir. Bu nedenle yapılan çalışmada, faz-toprak arası mesafe delinme dayanımı kontrolü için riskli bölge olduğu düşünülen bobin-klemp arası mesafe üzerinden çalışma yapılmıştır. Faz-toprak arası açıklığı temsilen iki elektrotlu basit model oluşturularak mesafeye göre dayanabileceği maksimum gerilim tespiti deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda, farklı takoz yapısı ve farklı takoz yüksekliğinde delinme geriliminin değişkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir. İki elektrot arası mesafe arttıkça delinme geriliminin logaritmik olarak arttığı her iki takoz yapısında da görülmektedir.

Deneysel olarak belirlenen delinme gerilimleri, sonlu elemanlar yöntemi tabanlı Maxwell programında incelenmiştir. Analiz yorumları ile deney sonuçları kıyaslandığında, deneyler ile analiz yorumları örtüşmektedir. Yapılan elektromanyetik analizlerde deneysel olarak delindiği tespit edilen takozların, simülasyon üzerinde de delindiği gözlemlenmektedir. Analiz çalışmaları neticesinde takozun delinme bakımından zayıf olduğu bölgeler tespit edilmiştir. Yük yoğunluğunun çok olduğu elektrik alanın yüksek olduğu elektrot köşe noktaları ve takoz-elektrot dar alanlarının dayanma gerilimi bakımından zayıf olduğu gözlemlenmiştir.

Deney sonuçları, her iki takoz yapısı için de grafik üzerinde gösterilmiş, sonuçlar arasındaki bağıntıdan ampirik formül oluşturulmuştur. Formülde mesafe-gerilim arası ilişkisi verilmektedir. Kullanılmak istenen mesafe, formülde yerine yazıldığında dayanabileceği gerilim değeri yaklaşık olarak tespit edilebilmektedir. Tasarım aşamasında dayanması gereken gerilim değerleri IEC 60076-11'de belirtildiğine göre, belirtilen gerilim değerine uygun minimum mesafe de tespit etmek mümkündür. Minimum mesafenin tespiti, tasarımın devamında diğer parametrelerin de minimum değerde olmasına, daha az malzeme kullanılmasına dolayısıyla uygun maliyetli tasarıma olanak sağlamaktadır.

9. KAYNAKLAR

[1] J. M. Villanueva-Ramirez, "Optimized Insulation Design of Power Transformer Windings under Fast Voltage Pulses under Fast Voltage Pulses," Ph.D Thesis, Western Michigan University, Kalamazoo, 2021.

[2] S. V Kulkarni and S. A. Khaparde, *Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics*. USA: CRC Press, 2013.

[3] E. TASLAK and Ö. Kalenderli, "Electric field analysis of different electrode systems used for breakdown tests of insulating liquids with FEM," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 2018, no. 2018, pp. 821–831, Apr. 2018, [Online]. Available: https://dergipark.org.tr/tr/doi/10.17341/gazimmfd.416384

[4] Y. Aslan, "VHD-35 İzolatörde Kısmi Deşarj Analizi," Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, 2020.

[5] A. Masood, M. U. Zuberi, and E. Husain, "Breakdown Strength of Solid Dielectrics in Liquid Nitrogen," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 4, 2008.

[6] K. Arıkan, "Elektriksel Boşalmanın Bulanık Mantık İle Benzetimi," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2013.

[7] R. Murillo, J. Smajic, J. Tepper, A. Nogués, and T. Steinmetz, "Electromagnetic simulations supporting the development of dry-type transformers for subtransmission voltage levels," in *Cigre 2012*, 21, rue d'Artois, F-75008 Paris, 2012, pp. A2-208.

[8] A. Masood and M. U. Zuberi, "Empirical Relation to Estimate Breakdown Strength of Solid Insulating Materials," *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, vol. 6, no. 3, pp. 21–26, Mar. 2016, [Online]. Available: www.ijmer.com

[9] H. İ. Üçkol, "Orta Gerilim Kablo Başlıklarında Evrişimli Sinir Ağları İle Kısmi Boşalma Örüntü Sınıflandırılması," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2020.

[10] A. F. Mergen, *Elektrik Makineleri I, Transformatörler*. İstanbul: Birsen Yayınevi, 2009.

[11] Vikipedi. "Transformatör" https://tr.wikipedia.org/wiki/Transformat%C3%B6r. Erişim tarihi: 25 Nisan 2023.

[12] İ. H. Teke, "Güç Transformatörlerinin Modellenmesi ve Elektromanyetik Alan Analizlerinin Gerçekleştirilmesi," Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya, 2019.

[13] Ulusoy Elektrik-Eaton, "Yağlı Tip Transformatör Eğitim Sunumu," Ankara, 2023.

[14] Kaplan Trafo Enerji. "Genleşme Depolu Transformatör". https://kaplantrafo.com.tr/genlesme-depolu-transformator. Erişim tarihi: 03 Haziran 2023.

[15] Ulusoy Elektrik-Eaton, *Dağıtım Transformatörleri Bakım, İşletme, Devreye Alma ve Kullanma Talimatı*. Ankara, 2020.

[16] BEST A.Ş., "Kuru Tip Transformatörler Genel Yapısı, Devreye Alma Öncesi Kontroller ve Röle Ayarları," Balıkesir, 2015.

[17] Ulusoy Elektrik-Eaton, *Kuru Tip Transformatör Kataloğu*. Ankara, 2020.

[18] B. Aydoğan, "Hekzatransformatör ve Üç Fazlı E Tipi Transformatörün Karşılaştırılması," Lisans Bitirme Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 2016.

[19] M. A. Habli, "Optimal Design of A Distribution Transformer Using Artificial Intelligence Techniques," Master's Thesis, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, 2016.

[20] *Power Transformers-Part-11: Dry Type Transformers, IEC 60076-11*. Geneva, Switzerland, 2018.

[21] M. Tören and M. Çelebi, "Kuru Tip Transformatörlerde Nüve Materyallerinin Verime Etkisi," in *ELECO'2016 Elektrik – Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı*, Bursa, Dec. 2016.

[22] Y. Özüpak, "Transformatörlerin Elektromanyetik Alan ve Isıl Analizlerinin Sonlu Elemanlar Kullanılarak Gerçekleştirilmesi," Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya, 2020.

[23] M. Tören and M. Çelebi, "Experimental and Simulating of Dry-Type Transformer Thermal Analysis With A New Approach For Outdoor Applications," *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, vol. 24, no. 2, pp. 103–114, Aug. 2019, doi: 10.17482/uumfd.459339.

[24] Ankara Üniversitesi. "Isı Transfer Mekanizmaları Sunum". https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/72277/mod_resource/content/0/HAFTA_2.pdf. Erişim tarihi: 05 Mart 2023.

[25] Erciyes Üniversitesi. "Isı Transferi (Taşınımı) Sunum". https://avesis.erciyes.edu.tr/resume/downloadfile/nkayatas?key=f3eb89ae-576d-4770-bdd5-764a36000bc7. Erişim tarihi: 05 Mart 2023.

[26] *Power Transformers-Part 1: General, IEC 60076-1*. Geneva, Switzerland, 2011.

[27] *Electrical Insulation – Thermal Evaluation And Designation, IEC 60085*. Geneva, Switzerland, 2007. [Online]. Available: www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm

[28] H. Odoğlu, *Transformatör ve Şönt Reaktör Deneyleri*, EMO yayın. Ankara: Elektrik Mühendisleri Odası, 2013.

[29] BEST A.Ş., "Transformer Tests," Jun. 03, 2023. [Online] Erişim adresi: https://kupdf.net/download/best-transformer-test-procedures-tr_59613189dc0d60ae4d2be30b_pdf

[30] *Power Transformers-Part 3: Insulation Levels, Dielectric Tests And External Clearances In Air, IEC 60076-3*. Geneva, Switzerland, 2013.

[31] N. H. Malik, A. A. Al-Arainy, and M. I. Qureshi, *Electrical Insulation in Power Systems*. New York, USA: Taylor & Francis, CRC Press, 1998.

[32] M. S. Naidu and V. Kamaraju, *High voltage engineering*. USA: McGraw-Hill, 1996.

[33] S. İlhan, "Katı Yalıtkanlardaki Elektriksel Zorlanmalar ve Ömür Saptaması," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2005.

[34] R. Arora and W. Mosch, *High Voltage And Electrical Insulation Engineering*. New Jersey, USA: IEEE Press, 2011.

[35] M. Marci and I. Kolcunová, “Electric breakdown strength measurement in liquid dielectrics,” in *2010 9th Conference on Environment and Electrical Engineering, EEEIC 2010*, Prague, Czech Republic, 2010, pp. 427–430. doi: 10.1109/EEEIC.2010.5489916.

[36] F. Akın, “Katı Yalıtkan Malzemelerin Farklı Çalışma Koşulları Altında Performans Analizi,” Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2021.

[37] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering : Fundamentals*. Oxford, UK: Newnes, 2000.

[38] J. R. Lucas, *High Voltage Engineering*. Sri Lanka: University of Moratuwa, 2001.

[39] DU B.X., GAO Z.L.MA Y, and T. HAN, “Effect of Temperature on Electrical Tree in Silicone Rubber,” in *2010 International Conference on Solid Dielectrics*, Potsdam, Germany, Jul. 2010. doi: 10.1109/ICSD.2010.5568226.

[40] L. Zhao, “Theoretical Calculation On Formative Time Lag In Polymer Breakdown On A Nanosecond Time Scale,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 27, no. 4, pp. 1051–1058, Aug. 2020, doi: 10.1109/TDEI.2019.008127.

[41] *Electric Strength Of Insulating Materials-Test Methods-Part 1: Tests At Power Frequencies, IEC 60243-1*. Geneva, Switzerland, 2013.

[42] A. Fenercioğlu and İ. Tarımer, “Bir Manyetik Sistemin Maxwell 3D Alan Simülatörü İle Statik Manyetik Analizinin Çözüm Süreçleri,” *Journal of Selcuk-Technic*, vol. 6, 2007.

[43] H. Balaban and U. Penekli, “Sonlu Elemanlar Yöntemlerinin Tasarım Süreçlerine Yararlı Etkileri,” *Mühendis ve Makina*, Nov. 2020, [Online]. Available: www.mmo.org.tr

[44] Ansys Inc., *User’s Guide-Maxwell 2D*. Pennsylvania, USA, 2010. [Online]. Available: http://www.ansys.com

[45] İ. G. Tekdemir, “Bir Elektrik Atölyesindeki Manyetik Alanın Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi,” Yüksek Lisans Seminer, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2011.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Berra AYDOĞAN

Doğum tarihi ve yeri : 17.08.1994 - Bandırma

e-posta : berra_aydogan@hotmail.com

Öğrenim Bilgileri

Derece	**Okul/Program**	**Yıl**
Y.Lisans	Balıkesir Üniversitesi / Elektrik ve Elektronik Mühendisliği	2019-2023
Lisans	Kocaeli Üniversitesi / Elektrik Mühendisliği	2012-2016
Lise	Bandırma Anadolu Lisesi	2008-2012

İş Tecrübeleri

Firma	**Pozisyon**	**Yıl**
Eltaş Transformatör	Kuru Tip Transformatör Elektrik Tasarım Mühendisi	2017-2019
Best Transformatör	Kuru Tip Transformatör Elektrik Tasarım Uzman Mühendisi	2019-2022
Eaton	Senior R&D Transformers Engineer	2022-….