

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YENİ BİR İZOLATÖR VE KONDANSATÖR  
TASARIMI VE YAPIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Elektrik Müh. Özgür KARAHAN**

**Anabilim Dalı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ**

**Programı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ**

**OCAK 2008**

**YENİ BİR İZOLATÖR VE KONDANSATÖR  
TASARIMI VE YAPIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Elektrik Müh. Özgür KARAHAN  
(504041068)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Aralık 2007  
Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Ocak 2008**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ  
Diğer Jüri Üyeleri Yrd. Doç. Dr. Levent OVACIK (İ.T.Ü.)  
Yrd. Doç. Dr. Hasbi İSMAİLOĞLU (K.Ü.)**

**OCAK 2008**

## **ÖNSÖZ**

Yapmış olduğum bu çalışmada bana her konuda destek olan sayın hocam Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ'ye; yaptığım bilimsel çalışmalar konusunda beni teşvik eden sayın hocam Prof. Dr. Emin TACER'e; kondansatörler ve izolatörler konusunda daha ileri araştırmalar yapabilmemi sağlayan EDE Grup'tan eski ekip arkadaşlarıma ve bana her konuda sonsuz destek olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

**Aralık 2007**

**Özgür Karahan**

## İÇİNDEKİLER

<b>KISALTMALAR</b>	<b>vi</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>vii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>viii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b>	<b>xii</b>
<b>ÖZET</b>	<b>xiii</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>xv</b>
<b>KISIM 1</b>	
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
1.1. Tanım	1
1.2. Amaç	3
<b>2. GENEL TANIMLAMALAR</b>	<b>6</b>
2.1. Kondansatörlerin Fiziksel Tasarım Yöntemleri	8
2.1.1. Düzlemsel kondansatörler	8
2.2.2. Küresel kondansatörler	9
2.2.3. Silindirselsel kondansatörler	10
2.2. Kondansatörlerin Hesabı	12
2.3. Kondansatörlerin Bağlanması	13
2.4. Beyan Gerilimi Seçimi	14
2.5. Rezonans Frekansı	15
2.6. Güç Faktörü	15
2.7. Bir Kondansatörde Kayıp Açısı Faktörü	17
2.8. Harmoniklerin Kondansatör Üzerine Etkisi	21
<b>3. KONDANSATÖR ÜRÜN GRUPLARI</b>	<b>23</b>
3.1. Alçak Gerilim Güç Kondansatörleri	23
3.1.1. Standart tip alçak gerilim güç kondansatörleri	23
3.1.2. Silindirselsel tip alçak gerilim güç kondansatörleri	24
3.1.3. Yüksek performanslı alçak gerilim güç kondansatörleri	24
3.2. AA Daimi Devre Kondansatörleri	25
3.2.1. Motor kondansatörleri	25
3.2.2. Aydınlatma kondansatörleri	26
3.2.3. Motor ilk hareketi için kullanılan elektrolitik kondansatörler	27
<b>4. AŞIRI BASINÇ DÜZENEKLİ VE SİLİNDİRSEL METAL GÖVDELİ ÜÇ FAZLI ALÇAK GERİLİM MPPF GÜÇ KONDANSATÖRLERİ</b>	<b>28</b>
4.1. Temel Hammadde Genel Karakteristikleri	30
4.2. Temel Üretim Süreçleri	35
4.2.1. Sarım	35

4.2.2. Metal püskürtme (dış elektrotların oluşturulması)	41
4.2.3. Emprenye etme	42
4.3. Süreç Kontrolü	45
4.4. Kalite Kontrolü	48
4.5. Malzeme Seçimi	50
4.6. Üretim Teknolojileri	51
4.6.1. PPM/MKP teknolojisi	51
4.6.2. Kendi kendini yenileme olayı (otojenerasyon)	52
4.6.3. Koruma önlemleri	54
4.7. Tasarım Tekniği	55
4.8. Montaj	57
<b>5. YENİ BİR GÜÇ KONDANSATÖRÜ TASARIMI</b>	<b>58</b>
5.1. Tasarımın Yenilikleri	58
5.2. Problemler ve Alternatif Çözüm Önerileri	59
5.3. Tasarım Modelleri	61
5.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi Analizleri	62
5.4.1. Metalize polipropilen film kondansatörlerin ısıl benzetimle geometrik optimizasyonu	62
5.4.2. Metalize polipropilen film kondansatörlerde sıvı dielektriğin etkisi ve elektrostatik optimizasyon	78
<b>6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA</b>	<b>85</b>
<b>KISIM 2</b>	
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>87</b>
1.1. Tanım	87
1.2. Amaç	91
<b>2. GENEL TANIMLAMALAR</b>	<b>93</b>
2.1. İzolatörlerin Seçimi	93
2.2. İzolatör Arızaları	95
2.3. İzolatörlerin Bakım Yöntemi	99
<b>3. İZOLATÖR ÜRÜN GRUBU</b>	<b>100</b>
3.1. Yapıldıkları Malzemelere Göre İzolatör Çeşitleri	100
3.1.1. Porselen izolatörler	100
3.1.2. Cam izolatörler	101
3.1.3. Epoksi izolatörler	102
3.2. Yapılış Türlerine Göre İzolatör Çeşitleri	102
3.2.1. Mesnet izolatörler	102
3.2.2. Zincir izolatörler	104
3.3.3. Geçit izolatörleri	105
<b>4. EPOKSİ REÇİNELİ ORTA GERİLİM FİŞ TİPİ GEÇİT İZOLATÖRLERİ (PLUG-IN TYPE BUSHING)</b>	<b>107</b>
4.1. Temel Hammadde Genel Karakteristikleri	107

4.1.1. Epoxy (epoksi) tarihçesi	107
4.1.2. Epoksi sistemi	109
4.1.3. Epoksi reçinelerin kimyasal yapısı	112
4.1.4. Epoksi reçine kullanımı	113
4.2. Sentetik Yalıtım Maddelerinin Bina Dışı Yalıtım Uygulamalarında Sağladığı Avantajlar ve Dezavantajlar	116
4.3. Sentetik Yalıtım Maddeleri ve Dış Yalıtımlarda Uygulanması	120
<b>5. YENİ BİR FİŞ TİPİ GEÇİT İZOLATÖRÜ TASARIMI</b>	<b>123</b>
5.1. Tasarımın Yenilikleri	123
5.2. Problemler ve Alternatif Çözüm Önerileri	124
5.3. Tasarım Modelleri	124
5.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi Analizleri	126
5.4.1. Orta gerilim bina içi metal mahfazalı modüler hücre uygulamalarında kullanılan fiş tipi geçit izolatörlerinde SF <sub>6</sub> gazının etkisi ve elektrostatik optimizasyon	126
5.4.2. Yağ daldırmalı transformatör uygulamaları için fiş tipi geçit izolatörlerinin ısı benzetimle sıcaklık artışı optimizasyonu	137
<b>6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA</b>	<b>145</b>
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>147</b>
<b>EKLER</b>	<b>154</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	<b>181</b>

## KISALTMALAR

<b>AG</b>	: Alçak Gerilim (Low Voltage)
<b>OG</b>	: Orta Gerilim (Middle Voltage)
<b>YG</b>	: Yüksek Gerilim (High Voltage)
<b>PP</b>	: Polypropylene (Polipropilen)
<b>MPP</b>	: Metallized Polypropylene (Metalize Polipropilen)
<b>PMM/MKP</b>	: Metallized Polypropylene Technology (Standart Life)
<b>PPMh/MKPh</b>	: Metallized Polypropylene Technology (Heavy Duty)
<b>MPPF</b>	: Metallized Polypropylene Film (Metalize Polipropilen Film)
<b>BOPP</b>	: Biaxially Oriented Polypropylene Film
<b>2D</b>	: 2 Dimensional (2 Boyutlu)
<b>3D</b>	: 3 Dimensional (3 Boyutlu)
<b>TS</b>	: Türk Standartı
<b>TSE</b>	: Türk Standartları Enstitüsü
<b>EN</b>	: European Norm
<b>IEC</b>	: International Electrotechnical Commission
<b>AA</b>	: Alternatif Akım
<b>DA</b>	: Doğru Akım
<b>RMS</b>	: Root Mean Square (Karesel Ortalama Değer)
<b>UPS</b>	: Uninterruptable Power Supply (Kesintisiz Güç Kaynağı)
<b>PCB</b>	: Poliklorlu Bifenil
<b>PDIV</b>	: PD Inception Voltage (Kısmi Boşalma Başlangıç Gerilimi)
<b>GFD</b>	: Güç Faktörü Düzeltme
<b>KAF</b>	: Kayıp Açısı Faktörü
<b>ESR</b>	: Equivalent Series Resistance (Seri Eşdeğer Direnç)
<b>ESL</b>	: Equivalent Series Inductance (Seri Eşdeğer Endüktans)
<b>FEM</b>	: Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
<b>FEMM</b>	: Finite Element Method Magnetics
<b>SCADA</b>	: Supervisory Control and Data
<b>LED</b>	: Light Emitting Diode (Işık Yayan Diyot)
<b>SF<sub>6</sub></b>	: Sulphur Hexafluoride (Kükürt Heksaflorür)
<b>CO<sub>2</sub></b>	: Karbon Dioksit
<b>MMMH</b>	: Metal Mahfazalı Modüler Hücre
<b>GIS</b>	: Gas Insulated Switchgear (Gaz Yalıtımlı Hücre)
<b>IEEE</b>	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>TEİAŞ</b>	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
<b>EÜAŞ</b>	: Elektrik Üretim Anonim Şirketi
<b>TETAŞ</b>	: Türkiye Elektrik Ticaret ve Taahhüt Anonim Şirketi
<b>TEDAŞ</b>	: Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi

## TABLO LİSTESİ

KISIM 1		<u>Sayfa No</u>
<b>Tablo 3.1</b>	Kullanım alanlarına göre kondansatörler.....	23
<b>Tablo 4.1</b>	Temel hammadde özellikleri.....	33
<b>Tablo 4.2</b>	Yalıtkan cinsine göre elektriksel değerler.....	39
<b>Tablo 4.3</b>	Güç kondansatörleri için sıcaklık sınıfı kategorileri.....	42
<b>Tablo 5.1</b>	Temel teknolojik üstünlükler ve bu üstünlüklere ulaşma yöntemleri.....	60
<b>Tablo 5.2</b>	Genel kabul gören ve tasarım aşamasında uyulması gereken standartlar.....	61
<b>Tablo 5.3</b>	Tasarım modelleri karakteristik değerleri.....	63
<b>Tablo 5.4</b>	Tasarım modeli karakteristik değerleri.....	80
<b>Tablo 5.5</b>	FEMM 4.2’de elde edilen elektrik alan şiddeti değerleri.....	83
<b>Tablo C.1</b>	k faktörü cetveli.....	170
KISIM 2		
<b>Tablo 1.1</b>	Kullanılış amaçlarına ve gerilimlerine göre izolatörler.....	88
<b>Tablo 2.1</b>	Yüzeylerin kirlenme düzeylerine göre ortamları.....	94
<b>Tablo 4.1</b>	Yönlendirilmemiş bazı sıvı reçineler.....	110
<b>Tablo 4.2</b>	Yönlendirilmemiş bazı katı reçineler.....	110
<b>Tablo 4.3</b>	Çok kullanılan üç ayrı reçinenin karakteristikleri.....	111
<b>Tablo 4.4</b>	Bazı katkı maddeleri ve karakteristikleri.....	112
<b>Tablo 5.1</b>	Genel kabul gören ve tasarım aşamasında uyulması gereken standartlar.....	123
<b>Tablo 5.2</b>	FEMM 4.2’de elde edilen elektrik alan şiddeti değerleri.....	134
<b>Tablo 5.3</b>	FEMM 4.2’de izolatörlerin üst bölümü yüzeyi boyunca elde edilen teğetsel elektrik alan şiddeti değerleri.....	136
<b>Tablo 5.4</b>	FEMM 4.2’de izolatörlerin alt bölümü yüzeyi boyunca elde edilen teğetsel elektrik alan şiddeti değerleri.....	136
<b>Tablo 5.5</b>	Gerilim kademesine bağlı tasarım karakteristikleri.....	139
<b>Tablo A.1</b>	Dışa konik biçimli fiş tipi geçit izolatörlerinin boyutları.....	172
<b>Tablo A.2</b>	Dışa konik biçimli fiş tipi geçit izolatörlerinin arayüz boyutları.....	173
<b>Tablo A.3</b>	İçe konik biçimli fiş tipi geçit izolatörlerinin boyutları.....	174
<b>Tablo A.4</b>	İçe konik biçimli fiş tipi geçit izolatörlerinin arayüz boyutları.....	175



## ŞEKİL LİSTESİ

KISIM 1		<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1	: İlk kondansatörü tasarlayan Pieter van Musschenbroek.....	2
Şekil 1.2	: Leiden şisesi.....	2
Şekil 2.1	: Kondansatörün genel yapısı.....	7
Şekil 2.2	: Düzlemsel kondansatörün genel yapısı.....	8
Şekil 2.3	: Düzlemsel kondansatör elektrot sistemi.....	9
Şekil 2.4	: Küresel kondansatör.....	10
Şekil 2.5	: Silindirsel kondansatör.....	11
Şekil 2.6	: Bir fazlı kondansatörün bağlanması.....	12
Şekil 2.7	: Üç fazlı kondansatörlerin bağlanması.....	14
Şekil 2.8	: Güç üçgeni.....	17
Şekil 2.9	: Kondansatör akım ve gerilimleri arasındaki faz açısı.....	17
Şekil 2.10	: Gerçek kondansatörün eşdeğer devreleri.....	18
Şekil 2.11	: Paralel eşdeğer devrenin fazör diyagramı.....	18
Şekil 3.1	: Daimi devre kondansatörü uygulamaları.....	25
Şekil 3.2	: Aydınlatma kondansatörü uygulamaları.....	26
Şekil 3.3	: Üç fazlı motor kompanzasyonu.....	26
Şekil 3.4	: Motor ilk hareketi için kullanılan elektrolitik kondansatörler.....	27
Şekil 4.1	: Bir MPP film güç kondansatörünün genel görünümü.....	28
Şekil 4.2	: Reçine dolum sistemi.....	34
Şekil 4.3	: Reçine dolum sistemine sahip bir tesis uygulaması.....	35
Şekil 4.4	: Sarım makinasının şematik diagramı.....	35
Şekil 4.5	: Tipik bir sarım makinası.....	36
Şekil 4.6	: Kondansatör bobini yatay görünümü.....	37
Şekil 4.7	: MPP film temas yüzeyleri.....	38
Şekil 4.8	: Metalize sarımların üç boyutlu (3D) görünümü.....	40
Şekil 4.9	: Metal iletkenli sarımlar.....	41
Şekil 4.10	: Kondansatör bobini üzerine metal püskürtme işlemi.....	41
Şekil 4.11	: Tipik bir vakumla emprenye etme sistemi.....	44
Şekil 4.12	: Üretim aşamaları.....	46
Şekil 4.13	: Kompanzasyon ünitesi.....	46
Şekil 4.14	: Kendi kendini yenileme olayı (otojenerasyon).....	53
Şekil 4.15	: Aşırı yüklere karşı koruma sistemi.....	55
Şekil 4.16	: Güvenilir montaj yapısı.....	57
Şekil 5.1	: Şiddetli bir patlamadan hasar görmüş klasik tip kondansatörler.....	58
Şekil 5.2	: Termo mekanik kararlılığı sağlanmış yapı.....	60
Şekil 5.3	: Uygun tasarım modelleri.....	62
Şekil 5.4	: MPPF kondansatörün iki ve üç boyutlu modeli.....	63
Şekil 5.5	: Çok tabakalı silindirsel elektrot sistemi.....	63
Şekil 5.6	: Kondansatör bobininin iç yapısı.....	64
Şekil 5.7	: Tur hesabında kullanılan excel algoritmasının giriş bölümü.....	65
Şekil 5.8	: Isıl iletkenlik hesabı için kullanılan model.....	65

<b>Şekil 5.9</b>	: Modelin çift taraflı iki eksenli görünümü.....	66
<b>Şekil 5.10</b>	: Simülasyon modeli.....	69
<b>Şekil 5.11</b>	: Kondansatör bobininin temel bir parçasının görünümü.....	70
<b>Şekil 5.12</b>	: Seri eşdeğer devre.....	73
<b>Şekil 5.13</b>	: Kondansatör bobinin FEMM 4.2’de ısı analiz için eksenel simetriden yararlanarak bir yarısı ile tanımlanması.....	75
<b>Şekil 5.14</b>	: Kondansatör kutusundaki iç ve dış ısı akışı.....	76
<b>Şekil 5.15</b>	: Kondansatör bobinleri için FEMM 4.2’de elde edilen sıcaklık dağılımları.....	77
<b>Şekil 5.16</b>	: Kondansatör bobinleri için sıcaklık dağılım eğrisi.....	78
<b>Şekil 5.17</b>	: Kondansatör bobininin çift eksenli görünümü.....	79
<b>Şekil 5.18</b>	: Simülasyon modeli.....	80
<b>Şekil 5.19</b>	: Kondansatör bobinlerinin FEMM 4.2’de elektrostatik analiz için eksenel simetriden yararlanarak bir yarısı ile tanımlanması.....	81
<b>Şekil 5.20</b>	: Üçgen sonlu elemanlardan oluşturulan sonlu elemanlar ağı.....	82
<b>Şekil 5.21</b>	: $10^{-8}$ doğrulukla elde edilen potansiyel dağılımları.....	82
<b>Şekil 5.22</b>	: Eşpotansiyel çizgiler.....	82
<b>Şekil 5.23</b>	: Elektrik alan dağılımları.....	83
<b>Şekil 5.24</b>	: Karşılaştırma analizi için örnek bir model.....	83
<b>Şekil 5.25</b>	: Elektrik alan vektörleri.....	84
<b>Şekil A.1</b>	: Seri kondansatör.....	157
<b>Şekil A.2</b>	: İki tabanlı sistem.....	157
<b>Şekil A.3</b>	: Paralel kondansatör.....	158
<b>Şekil A.4</b>	: Paralel düzende iki tabakalı sistem.....	158
<b>Şekil A.5</b>	: $\tan\delta$ (Watt/kVAr).....	159
<b>Şekil A.6</b>	: Dielektrik Malzeme.....	160
<b>Şekil B.1</b>	: Kondansatör birimlerinde bulunan dirençlerin bağlanması yönteminde esas alınan k değerleri.....	163
<b>Şekil B.2</b>	: Elektriksel eşdeğer model bağlantı biçimleri.....	164
<b>Şekil B.3</b>	: Isıl eşdeğer modeller.....	165
<b>Şekil B.4</b>	: Elektrostatik alan çizgileri.....	166
<b>Şekil B.5</b>	: Kondansatör bobini içerisindeki şematik akım yolu.....	167
<b>Şekil B.6</b>	: Aşırı basınç sistemi.....	169

## KISIM 2

<b>Şekil 1.1</b>	: David Brooks patentiyle anılan ilk izolatör.....	87
<b>Şekil 2.1</b>	: Kir tabakasıyla kaplı izolatör.....	95
<b>Şekil 2.2</b>	: Hasara uğramış bir porselen izolatör.....	95
<b>Şekil 2.3</b>	: Atlama modeli.....	96
<b>Şekil 2.4</b>	: Geçit izolatörü yüzeyinde oluşan kirlenme atlaması.....	98
<b>Şekil 3.1</b>	: Porselen izolatörler ve uygulamaları.....	100
<b>Şekil 3.2</b>	: Cam izolatörler ve uygulamaları.....	101
<b>Şekil 3.3</b>	: Yüzeye uygun sayıda ve biçimde çıkıntılar eklenmiş izolatör.....	101
<b>Şekil 3.4</b>	: Epoksi izolatörler.....	102
<b>Şekil 3.5</b>	: Pin tipi porselen mesnet izolatörleri.....	103
<b>Şekil 3.6</b>	: Dahili tip epoksi reçineli mesnet izolatörleri.....	103
<b>Şekil 3.7</b>	: Harici tip epoksi reçineli mesnet izolatörleri.....	103
<b>Şekil 3.8</b>	: Kapasitif gerilim bölücülü epoksi reçineli mesnet izolatörleri.....	104
<b>Şekil 3.9</b>	: Porselen zincir izolatörleri.....	105
<b>Şekil 3.10</b>	: Dahili uygulamalar için epoksi reçineli geçit izolatörleri.....	105

<b>Şekil 3.11</b>	: Porselen yapılı duvar ve transformatör geçit izolatörleri.....	105
<b>Şekil 3.12</b>	: Dahili-harici uygulamalar için epoksi reçineli geçit izolatörleri....	106
<b>Şekil 3.13</b>	: Fiş tipi epoksi reçineli (dökme yalıtımlı) geçit izolatörleri.....	106
<b>Şekil 4.1</b>	: Epoksi reçinenin moleküler yapısı.....	112
<b>Şekil 4.2</b>	: Otomatik baskı işlemi.....	113
<b>Şekil 4.3</b>	: Sentetik yapılı yalıtkan bir yüzeyde karbonlaşma olayı.....	118
<b>Şekil 4.4</b>	: Siklo-alifatik reçinenin moleküler yapısı.....	119
<b>Şekil 4.5</b>	: Sentetik reçinenin direk tasarımında uygulaması.....	121
<b>Şekil 4.6</b>	: Tipik bir sentetik askı izolatörü.....	122
<b>Şekil 5.1</b>	: Uygun tasarım modeli.....	125
<b>Şekil 5.2</b>	: Metal mahfazalı modüler hücre (MMMH)'ler.....	127
<b>Şekil 5.3</b>	: SF <sub>6</sub> gazının yapısı.....	128
<b>Şekil 5.4</b>	: Gaz yalıtımlı hücre (GIS) sistemi.....	131
<b>Şekil 5.5</b>	: Geçit izolatörünün elektrostatik analiz için aksel simetriden yararlanarak bir yarısı ile tanımlanması.....	131
<b>Şekil 5.6</b>	: 36 kV, 24 kV ve 12 kV fiş tipi geçit izolatörleri için $\epsilon_0$ (vakum) = $8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m olarak $10^{-8}$ doğrulukla elde edilen potansiyel dağılımları.....	133
<b>Şekil 5.7</b>	: 36 kV, 24 kV ve 12 kV fiş tipi geçit izolatörleri için elde edilen eşpotansiyel çizgiler.....	134
<b>Şekil 5.8</b>	: 36 kV, 24 kV ve 12 kV fiş tipi geçit izolatörleri için elde edilen elektrik alan dağılımları.....	134
<b>Şekil 5.9</b>	: 36 kV, 24 kV ve 12 kV fiş tipi geçit izolatörleri için elde edilen elektrik alan vektörleri.....	135
<b>Şekil 5.10</b>	: 36 kV, 24 kV ve 12kV fiş tipi geçit izolatörlerin üst bölümü yüzeyi boyunca elde edilen teğetsel elektrik alan şiddetinin değişimi.....	135
<b>Şekil 5.11</b>	: 36 kV, 24 kV ve 12 kV fiş tipi geçit izolatörlerin alt bölümü yüzeyi boyunca elde edilen teğetsel elektrik alan şiddetinin değişimi.....	136
<b>Şekil 5.12</b>	: Örnek bir transformatör montajı.....	137
<b>Şekil 5.13</b>	: Transformatör montajı şematik gösterimi.....	138
<b>Şekil 5.14</b>	: Gerilim kademesine bağlı yağ seviyesi yüksekliği.....	139
<b>Şekil 5.15</b>	: 36 kV, 24 kV ve 12 kV fiş tipi geçit izolatörleri için AutoCAD modelleri.....	141
<b>Şekil 5.16</b>	: 36 kV, 24 kV ve 12 kV geçit izolatörlerinin FEMM 4.2'de elektrostatik analiz için aksel simetriden yararlanarak bir yarısı ile tanımlanması.....	141
<b>Şekil 5.17</b>	: Üçgen sonlu elemanlardan oluşturulan sonlu elemanlar ağı.....	143
<b>Şekil 5.18</b>	: 36 kV, 24 kV ve 12 kV geçit izolatörlerinin FEMM 4.2'de elde edilen sıcaklık dağılımları.....	144
<b>Şekil 5.19</b>	: 36 kV, 24 kV ve 12 kV geçit izolatörlerinin sıcaklık dağılım eğrisi.....	144
<b>Şekil A.1</b>	: Dışa konik biçimli fiş tipi geçit izolatörlerinin dış boyutları.....	172
<b>Şekil A.2</b>	: Dışa konik biçimli fiş tipi geçit izolatörlerinin arayüz ayrıntıları.....	173
<b>Şekil A.3</b>	: İçe konik biçimli fiş tipi geçit izolatörlerin dış boyutları.....	174
<b>Şekil A.4</b>	: İçe konik biçimli fiş tipi geçit izolatörlerinin arayüz ayrıntıları.....	175
<b>Şekil B.1</b>	: Transformatör montaj modelleri.....	176

<b>Şekil C.1</b>	: Kablo başlıkları için örnek resimler.....	177
<b>Şekil C.2</b>	: Kablo başlıklarının kullanım yöntemi.....	177
<b>Şekil D.1</b>	: Yüksek frekanslı gerilim deneyi.....	179
<b>Şekil D.2</b>	: Mekanik çekme deneyi.....	179
<b>Şekil D.3</b>	: Mekanik eğme deneyi.....	179
<b>Şekil D.4</b>	: Endüstriyel frekanslı yüksek gerilim deneyi.....	179
<b>Şekil D.5</b>	: Yaşta endüstriyel frekanslı gerilim deneyi.....	179

## SEMBOL LİSTESİ

<b>V</b>	: Volt
<b>A</b>	: Amper
<b>kVAr</b>	: Kilo volt amper reaktif
<b><math>C_{\Delta}</math></b>	: Üçgen bağlamada her iki hat arasındaki kondansatörün kapasitesi
<b><math>C_Y</math></b>	: Yıldız bağlamada her faza bağlanan kondansatörün kapasitesi
<b>f</b>	: Şebeke frekansı
<b><math>\varphi</math></b>	: Faz açısı
<b>P</b>	: Aktif güç
<b>Q</b>	: Reaktif güç
<b><math>Q_C</math></b>	: Kondansatör gücü
<b>S</b>	: Görünür güç
<b>U</b>	: Faz gerilimi
<b><math>U_h</math></b>	: Fazlar arası gerilim
<b><math>U_n</math></b>	: Anma (beyan) gerilimi
<b>Z</b>	: Empedans
<b>R</b>	: Direnç
<b><math>\omega</math></b>	: Açısal frekans
<b><math>\omega_0</math></b>	: Açısal rezonans frekansı
<b><math>\Omega</math></b>	: Ohm
<b>W</b>	: Watt
<b><math>\mu</math></b>	: Mikro
<b>°</b>	: Derece
<b>C</b>	: Celcius
<b>K</b>	: Kelvin
<b><math>\epsilon</math></b>	: Dielektrik sabiti (permitivite)
<b><math>\epsilon_r</math></b>	: Bağlı dielektrik sabiti
<b><math>\epsilon_0</math></b>	: Boşluğun dielektrik sabiti
<b><math>\lambda</math></b>	: Isıl iletkenlik katsayısı
<b><math>\rho</math></b>	: Öz direnç
<b>Hz</b>	: Hertz
<b>s</b>	: Saniye
<b>F</b>	: Farad
<b>q, Q</b>	: Elektrik yükü (birimi: Coulomb)
<b><math>I_C</math></b>	: Kapasitif akım
<b><math>I_n</math></b>	: Anma (beyan) akımı
<b><math>f_r, f_0</math></b>	: Rezonans frekansı
<b><math>\cos\varphi</math></b>	: Güç katsayısı
<b><math>\tan\delta</math></b>	: Dielektrik kayıp katsayısı (dielektrik kayıp faktörü)
<b><math>E_d</math></b>	: Delinme dayanımı (delinme elektrik alan şiddeti)
<b><math>U_{max}</math></b>	: Maksimum gerilim
<b><math>E_{max}</math></b>	: Maksimum elektrik alan şiddeti
<b><math>E_{min}</math></b>	: Minimum elektrik alan şiddeti

## YENİ BİR İZOLATÖR VE KONDANSATÖR TASARIMI VE YAPIMI

### ÖZET

Bu çalışmada, birinci kısımda, ülkemizde halen kullanılmakta olan mevcut klasik güç kondansatörlerinden teknolojik olarak daha üstün alçak gerilim üç fazlı metalize polipropilen film (MPPF) güç kondansatörlerinin tasarımları gerçekleştirilmiştir.

Alçak gerilim güç kondansatörleri, TS EN 60831-1 ve TS EN 60831-2’de tanımlanan ve kendini onaran tip, anma gerilimi 1000 V’a kadar (1000 V dahil) ve 15 Hz-60 Hz frekansı olan AA sistemlerinin özellikle güç faktörü düzeltmeleri için kullanılan “şönt güç kondansatörleri” olarak bilinen kondansatörlerdir.

Çalışmada, anma gerilimi 400 V olan üç fazlı metalize polipropilen film (MPPF) güç kondansatörlerinin tasarımları gerçekleştirilmiş ve farklı reaktif güç değerleri için fiziksel tasarım modelleri gösterilmiştir. Bu amaçla ilk önce; mekanik tasarım ile ilgili olarak aşırı basınçların oluşumu, hacimsel dağılımı ve diğer bazı etkenlerin yol açacağı zararlı etkileri için etkin mekanik önlemler önerilmiştir. Sonrasında ise, simülasyon modellerinin oluşturulabilmesi için simülasyon modelleriyle uyumlu prototiplerde kullanılacak ana hammaddelerin tasarım öncesinde belirlenen elektriksel, fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri incelenerek değerlendirilmiş ve gerekli donanımların tasarımları yapılmıştır.

Kondansatörlerin tüm davranışlarını içeren matematik ve devre modelleri çıkartıldıktan sonra simülasyon modelleri oluşturulmuştur. Isıl ve elektriksel olarak oluşturulan simülasyon modelleri ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bilgisayar ortamında FEMM 4.2 programı ile elektrostatik ve ısıl analizler yapılmıştır.

Isıl simülasyon modeliyle ilgili olarak, ısı dağılımları ve bunlara yol açan sebepler belirtilmiş ve ısıl benzetimle geometrik optimizasyona ulaşılmıştır. Elektriksel simülasyon modeliyle ilgili olarak ise, boyutlandırma ve biçimlendirme için gerekli olan elektriksel zorlanma ve ömür analizleri; elektrostatik yasalarına göre farklı koşullar altında elde edilen elektrik alan dağılımları, geçici rejimler, kendi kendini onarma reaksiyonları, kenar boşalmaları ve harmonik akımlarından dolayı oluşan yüzeysel, hacimsel akım-gerilim dağılımları dikkate alınarak karşılaştırmalı analizler ile gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında, aygıtların (transformatör, kesici, motor gibi) kablolarına bağlantılarında kullanılan kablo başlıklarının, gelişmiş ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de kullanılması için, resmi elektrik iletim ve dağıtım şirketlerinin (TEİAŞ, EÜAŞ, TETAŞ, TEDAŞ) şartnamelere koyduğu koşul nedeniyle talep miktarı gün geçtikçe artan dökme veya kalıplanmış reçine yalıtımlı (epoksi reçineli) orta gerilim fiş tipi geçit izolatörlerinin tasarımları gerçekleştirilmiştir.

Organik reçineli geçit izolatörleri, TS 595 EN 60137’de tanımlanan “Dökme veya Kalıplanmış Reçine Yalıtımlı Geçit İzolatörü” kapsamında olan “Bina İçi Geçit İzolatörü” ve “Bina Dışından Bina İçine Geçit İzolatörü” olarak bilinen izolatörlerdir. TS EN 50181’de tanımlanan ve ülkemizde üretimi sınırlı sayıda

yapılan fiş tipi geçit izolatörleri ise, sıvı ile doldurulmuş transformatörlerin dışında kalan donanım için kullanılan, gerilimi 1 kV'un üstünde 36 kV'a kadar (36 kV dahil) ve akımı 250 A'den 1,25 kA'e kadar olan geçmeli tip izolatörlerdir.

Çalışmada, anma gerilimi 12 kV, 24 kV ve 36 kV ve anma akımları üç gerilim kademesi için de 400 A olan fiş tipi geçit izolatörlerinin tasarımları gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla ilk önce, mekanik tasarımla ilgili olarak ana yalıtkan malzeme özellikleri ile bağlantıların getireceği elektriksel ve mekanik sorunlar için etkin ve kalıcı mekanik önlemler önerilmiştir. Sonrasında ise, kondansatör tasarımındaki gibi simülasyon modellerinin oluşturulabilmesi için simülasyon modelleriyle uyumlu prototiplerde kullanılacak ana hammaddelerin tasarım öncesinde belirlenen elektriksel, fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri incelenerek değerlendirilmiş ve gerekli teçhizatların tasarımları yapılmıştır.

İzolatörlerin tüm bağlantılarını içeren montaj modelleri çıkartıldıktan sonra simülasyon modelleri oluşturulmuştur. Isıl ve elektriksel olarak oluşturulan simülasyon modelleri ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bilgisayar ortamında FEMM 4.2 programı ile elektrostatik ve ısıl analizler yapılmıştır.

Isıl simülasyon modeliyle ilgili olarak ısı dağılımları ve bunlara yol açan sebepler belirtilmiş ve TSE 595 EN 60137 Md. 8.5'de geçen sıcaklık artış deneyi referans alınarak ısıl benzetimle sıcaklık artışında optimizasyonuna ulaşılmıştır. Elektriksel simülasyon modeliyle ilgili olarak ise, boyutlandırma ve biçimlendirme için gerekli olan elektriksel zorlanma ve ömür analizleri; elektrostatik yasalarına göre farklı koşullar altında elde edilen elektrik alan dağılımları, geçici rejimler ve harmonik akımlarından dolayı oluşan yüzeysel, hacimsel akım gerilim dağılımları çıkarılarak karşılaştırmalı analizler ile gerçekleştirilmiştir.

Kondansatörleri ve izolatörleri birlikte düşünürsek, çok fazla ortak özelliğini bulamayız; fakat her ikisinin de günümüz teknolojisinde günlük yaşamımıza doğrudan olmasa da dolaylı olarak etkisi yadsınmaz. Özellikle uzun süreli enerji kesilmelerinin yakın zamanda birçok ülkede yaşanmasının nedeni olarak kompanzasyon sistemlerinde meydana gelen arızalardan kaynaklandığı açıklanmıştır. Her ne kadar çevremizde eskiye oranla daha az elektrik direği görüyor olsak bile, direk uygulamalarında izolatörler mükemmele yakın yalıtım sağlarlar. Fiş tipi geçit izolatörleri ise ancak bina içi metal mahfazalı gaz yalıtımlı hücre veya yağ daldırmalı transformatör uygulamalarında karşılaşılabilen; fakat barındırdığı teknolojik üstünlükler nedeniyle gelecekte en az güç kondansatörleri kadar etkin bir pazar alanına sahip olacağı düşünülen malzemelerdir.

## **DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A NEW INSULATOR AND CAPACITOR**

### **SUMMARY**

In this study, at the first section, design of a low voltage three-phase metallized polypropylene film (MPPF) power capacitors more technological than classic power capacitors used at the present time at our country have been presented.

Low voltage power capacitors of self healing type defined according to TS EN 60831-1 and TS EN 60831-2 and used for power factor correction for AC systems having a rated nominal voltage up to and including 1000 V and a frequency range of 15-60 Hz especially are capacitors informed as shunt power capacitors.

In study, low voltage three-phase metallized polypropylene film (MPPF) power capacitors having rated nominal voltage of 400 V have been considered and physical models have been designed for their different reactive power values. Firstly for this aim, effective mechanical measures has been proposed for the formation of extreme pressures, volumetric distribution and other some factors making up harmful effects while becoming related with the mechanical design. After these, electrical, physical, chemical and mechanical qualities of main problems assigned before design to be used at the harmonious prototypes with simulation models in order that simulation models can be formed has been evaluated after examined and the necessary equipment designs have been carried out.

Mathematical and circuit models including all behaviours of the capacitors are obtained and simulation models are designed. Electrostatic and thermal analysis of the capacitor models have been performed at a computer with FEMM 4.2 program by using electrical and thermal simulation models and finite element method.

Heat distribution and their reasons have been explained while becoming related with the thermal simulation model and has been reached to the geometric optimization with thermal imitation. However, electrical stress and life-span analysis with respect to dimension and modelling have been confirmed with comparative analysis by considering electrical field distributions obtained under different conditions according to the electrostatic laws, transient regimes, reactions of self healing, edge discharge, distributions of superficial, volumetric current, potential consisting due to the harmonic currents while becoming related with the electrical simulation model.

At second section of this study, design of medium voltage epoxy resin plug-in type bushings pouring or stereotyped resin insulation whose request quantity increases as long as passes day because legal electric transmission and distribution companies (TEİAŞ, EÜAŞ, TETAŞ, TEDAŞ) point out specifications a clause in order to use of tee connector using at the cable connections of apparatuses (transformer, breaker, motor etc.) as advanced countries at our country too have been presented.

Organic resin bushings range of pouring or stereotyped resin insulation bushings defined at the TS 595 EN 60137 are insulators informed as indoor bushing and indoor-outdoor bushing. However, plug-in type bushings defined TS EN 50181 and



produced limited quantity at our country having a rated voltage above 1 kV up to and including 36 kV and rated current from 250 A to 1,25 kA used for equipment other than liquid filled transformers are tongued type insulators.

In study, design of plug-in type bushings having rated nominal voltages of 12 kV, 24 kV and 36 kV and rated nominal current which is 400 A for rank of three voltages have been investigated. First this aim, effective and mechanical permanent measures has been proposed for the main dielectric materials and connections constituting electrical and mechanical problems while becoming related with the mechanical design. After that, electrical, physical, chemical and mechanical qualities of main staples assigned before design to be used at the harmonious prototypes with simulation models so that simulation models can be formed has been evaluated after examined and the necessary equipment designs have been done as at the capacitor design.

Designed models including all connections of insulators, simulation models have been constituted. Electrostatic and thermal analysis have been performed at a computer with FEMM 4.2 program by using the simulation models formed as electrical and thermal and finite element method.

Heat distribution and their reasons have been explained while becoming related with the thermal simulation model and has been reached the optimization at heat rising with thermal imitation by utilizing TS 595 EN 60137 (Clause 8.5) including experiment of heat rising. However, necessary electrical stress and life-span analysis for dimension and modelling have been confirmed with comparative analysis by considering electrical field distributions obtained under different conditions according to the electrostatic laws, temporary regimes, distributions of superficial, volumetric current, potential consisting due to the harmonic currents while becoming related with the electrical simulation model.

If together we think capacitors and insulators we don't find very much common quality; however both of which affect our daily life directly or indirectly at technology of nowadays. Especially, the reason why energy interruptions becoming longtime, met at many countries newly is due to faults becoming at compensation systems, which was declared. An insulator provides inlaying insulation at post applications even if we can see electrical post whose numbers are less than old at our environment. However, plug-in type bushings can be met only at indoor metal-clad gas insulated switchgear (GIS) and oil immersed transformer applications, but because they have many technological advantages, this materials will have a marketing area as active as power capacitors in the future, which is considered.

## **KISIM 1**

### **1. GİRİŞ**

#### **1.1 Tanım**

Kondansatör, temel elektrik ve elektronik devre elemanlarından biri olup, piyasada kapasite, kapasitör, sığaç gibi isimlerle de anılmaktadır. 18. yüzyılda icat edilip geliştirilmeye başlanan kondansatör, günümüzde teknolojinin ilerlemesinde büyük önemi olan elektrik ve elektronik dallarının en vazgeçilmez unsurlarındandır. İki plaka arasında bir yalıtkan malzeme yerleştirilmesiyle elde edilen bu eleman, elektrik enerjisini ve yükünü depolayabilme özelliğine sahiptir. Aradaki yalıtkan malzemenin elektronlarının kutuplanmasını sağlayarak yaptığı depolama sayesinde kondansatörler, elektrik yükünü depolama, reaktif gücü kontrol, bilgi kaybını engelleme, AA-DA arasında dönüşüm yapmada kullanılırlar ve tüm elektronik devrelerinin vazgeçilmez elemanıdırlar.

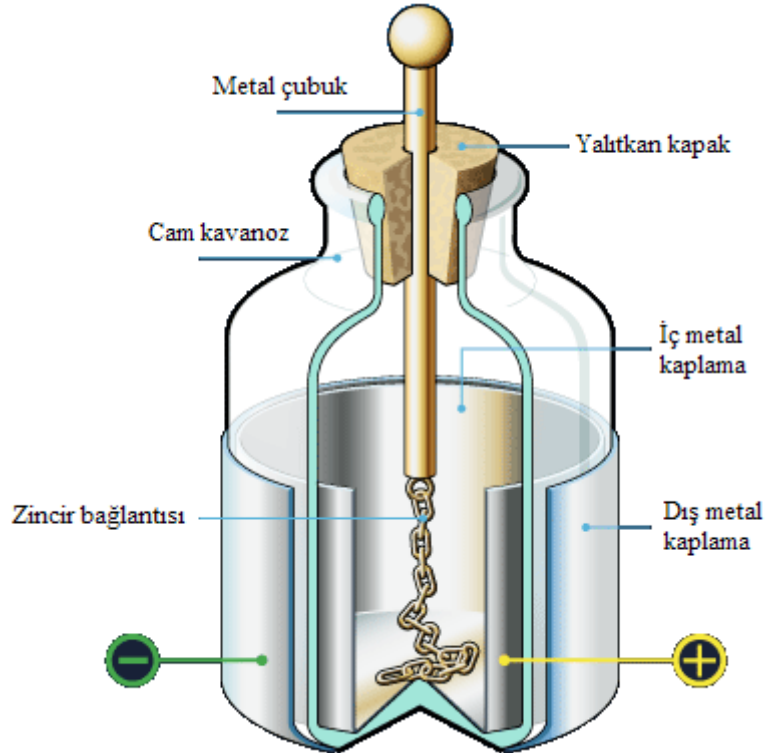
Elektrik konusunun gelişmesi 18. yüzyılda statik (durgun) elektriğin incelenmesiyle başlamıştır. Statik elektriğin bir ip boyunca iletilebilmesi, yanındaki cisimlerle paylaşılabilmesi ve depolanabilmesi özellikleri araştırmacı bilim adamları tarafından keşfedilmeye başlanmıştır. 1745 yılında Evalt von Kleist küçük metal bir şişede depolamayı başarmıştı. Ancak kondansatörün asıl gelişmesi, Leiden'de elektrik üzerinde deneyler yapan Pieter van Musschenbroek'in çalışmaları sonucu gerçekleşmiştir (Şekil 1.1). Musschenbroek bir rastlantı sonucu Kleist'in çalışmalarını doğrular nitelikte sonuçlara erişti. Musschenbroek içi ve dışı metalle kaplı cam bir şişe tasarımıladı. Bu şişeler elektrik yükünü depolayabiliyordu ve Leyden şişesi olarak anılacaktı (Şekil 1.2). Bu şişeler aynı zamanda ilk kondansatördü.



**Şekil 1.1:** İlk Kondansatörü Tasarlayan Pieter van Musschenbroek

Denemeler sonucunda metal kaplamalar arasındaki cam incelikle yayılan kıvılcımın büyüdüğü gözlemlendi. Leiden şişelerinde depolanan yük büyük değerler alabiliyordu ve birbirine tellerle bağlanmış Leiden şişelerinden boşalan elektriğin hayvanları öldürebileceği gözlemlenmişti. Kondansatörler, Leiden şişelerinin gelişmiş halleridir ve aynı mantıkla çalışmaktadır.

Bu ilginç alet Ewald von Kleist'in keşfi, Pieter van Musschenbroek'in geliştirmesi ile günümüzdeki şeklini almıştır. Kapasite birimi olarak ise İngiliz bilim adamı Michael Faraday'ın isminden hareketle Farad seçilmiştir [1, 2].



**Şekil 1.2:** Leiden Şişesi

Ülkemizde yıldan yıla artmakta olan elektrik enerjisi ihtiyacının yeni yatırımlarla karşılanmasının yanı sıra, mevcut kaynakların en ekonomik bir şekilde işletilmesi

gerektiği de açıktır. Alınacak nlemler arasında, enerjinin bilinçli bir Şekilde iletimi ve tüketimi ile bunun tasarrufu hiç kuşkusuz en baŐta gelmektedir. Tasarruf kelimesini açacak olursak; birincisi elektrik enerjisinin gereken miktar ve zamanda tüketilmesi, ikincisi, bu enerjinin üretim, dağıtım ve tüketim noktalarından ilave yükler için olanak sağlanması, bir diğer deyişle güç katsayısının dztilmesi, üçüncüsü ise, tasarrufa süreklilik kazandıracak olan cihaz ve makinaların kalitesi ve teknolojik yapılarıdır. Zira bu cihaz ve makinalar, elektrik enerjisinin ekonomisini etkilemektedir [1, 3].

Kompanzasyon kondansatörlerinin yapısal özellikleri, kaliteleri ve kullanılma sahalarna uygunluğu hiç kuşkusuz tasarrufa süreklilik kazandırmak konusunda baŐta gelen faktörü oluŐturmaktadır. Kompanzasyon kondansatörleri, g kondansatörleri gibi çeşitli Şekillerde isimlendirilen kVAr kondansatörlerini temelde g kondansatörleri Şeklinde isimlendirebiliriz [3].

## 1.2 AMAÇ

Çalışmada TS EN 60831-1 ve TS EN 60831-2’de tanımlanan AA güç sistemlerinin özellikle g faktörü düzeltmeleri için kullanılması öngörülen beyan gerilimi 1000 V’a kadar (1000 V dahil) ve 15 Hz-60 Hz frekansı olan dahili otomatik aşırı basınç düzenekli, küçük boyutlu, düşük aktif kayıplı, daha uzun ömürlü üç fazlı alçak gerilim güç kondansatörlerinin tasarımı ve yapım sürecine değinilecektir [4, 5].

Elektriksel ve fiziksel modelin oluşturulup bu modele yönelik temel verilerin elde edilmesi sürecinde tasarım aşamasında aşağıdaki sıra izlenecektir.

- Kullanılacak ana hammaddelerin;
  - Fiziksel, kimyasal ve mekanik zelliklerinin,
  - Dielektrik sabitlerinin,
  - Çalışma ve delinme gerilimlerinin,
  - Diğer tüm elektriksel özelliklerinin,

incelenmesi, değerlendirilmesi.

- Isıl (Termal) Tasarım
  - Anma gücü, gerilimi ve frekansına bağlı olarak saptanan boyutlandırma ve biçimlendirmenin ısı kararlılığının analizi,
  - Uzun ömürlü ünitelerin belirlenmesi.
- Elektriksel Tasarım
  - Anma gücü, gerilimi ve frekansına bağlı olarak boyutlandırma ve biçimlendirme,
  - Aşırı basıncın oluşumuna ve aşırı ısı artışına sebep olan etkileri azaltıcı niteliklere sahip malzemelerin belirlenmesi,
  - Daha yüksek gerilimlerde çalışmaya uygun malzemelerin belirlenmesi ve dolayısıyla eşdeğer anma gücü ve gerilimi bakımından daha küçük boyutlarda ünitelerin tasarımı,
  - Yüksek korona başlangıç gerilimi seviyesine sahip malzeme şeklinin ve üretim tekniklerinin belirlenmesi.
- Elektriksel zorlama analizleri
- Mekanik Tasarım
  - Tasarımlanan kondansatörün yerleştirileceği gövdenin basınca karşı dayanımının belirlenmesi
  - Aşırı basınç seviyelerinin ve buna uygun tahliye ve koruma düzeneğinin belirlenmesi.

Temel verilerin elde edilebilmesi için uygulanacak yöntemler:

Elektriksel tasarım ile ilgili olarak; atlama ve delinme bakımından boyutlandırma ve biçimlendirme için elektriksel zorlanma analizi yapılacak, statik analiz için Maxwell'in elektromanyetik yasalarına (denklemlerine) göre elektrostatik analizler yapılacak ve bu amaçla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, yüzeysel elektrik alan dağılımları farklı boyut ve biçimler için çıkartılacaktır.

Isıl (termal) tasarım ile ilgili olarak; ısı şok davranışı incelenecek ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ısı dayanım deneyi uygulanacaktır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, kondansatörler hakkında genel tanımlamalar verilmiştir. Kondansatörlerin yapısal çeşitleriyle, hesap ve bağlantı yöntemlerine de bu bölümde değinilmiştir. Ek A'da kondansatörlerin hesabında kullanılan matematiksel denklemler verilmiş ve elektrostatik alan formülleri,  $\omega$  domeninde kondansatör büyüklükleri ve paralel sarımlı kondansatör formülleri başlıkları altında gösterilmiştir.

Üçüncü bölümde, kondansatör ürün grubu tanıtılmıştır. Tasarımı yapılacak olan silindrsel gövdeli alçak gerilim güç kondansatörleri de bu bölümde ilk olarak işlenmiştir.

Dördüncü bölümde, çalışmanın ana konusu olan aşırı basınç düzenekli ve silindrsel metal gövdeli alçak gerilim üç fazlı güç kondansatörleri her yönüyle incelenmiştir. Temel hammadde karakteristikleri ve teknolojik üstünlükler bu bölümde detaylı olarak ele alınmıştır Ek B'de güç kondansatörlerin eşdeğer devreleri verilmiş ve direnç bağlama modelleri, elektriksel eşdeğer modeli, ısıl eşdeğer devre modeli, şematik elektrostatik alan modeli, şematik akım modeli ve şematik aşırı basınç sistemi modeli gösterilmiştir. Ek C'de ise güç kondansatörlerinde kompanzasyon gücünün hesabında kullanılan k faktörü cetveli verilmiştir.

Beşinci bölümde, yeni güç kondansatörü tasarım modelleri ele alınmış ve sonlu elemanlar yöntemi analizleri gösterilmiştir. Ek D'de bir güç kondansatörünün üretiminde TS EN 60831-1 standartında belirtilen ve üretime geçmeden önce prototiplere uygulanması gereken deneyler verilmiştir [4].

## 2. GENEL TANIMLAMALAR

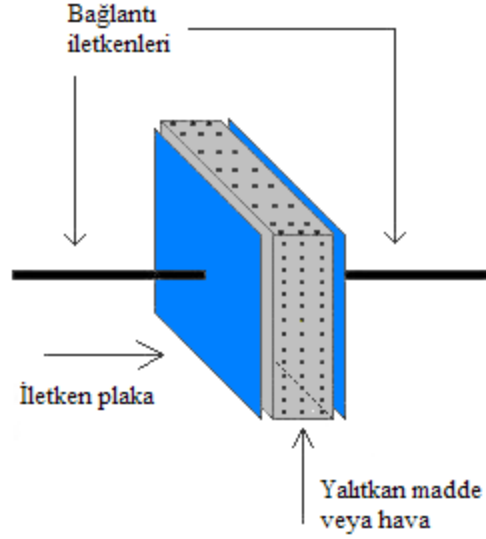
Sözlük anlamı ile kondansatör, alternatif akım devrelerinde, elektrik yükünü biriktirmek, kapasitif reaktans sağlamak amacıyla kullanılan ve DA akımı geçirmeyip AA akımı geçiren devre elemanıdır.

İki iletken plakanın arasına katı veya sıvı yalıtkan bir maddenin yerleştirilmesi veya hava gibi gaz yalıtkanların kullanılması ile oluşturulur (Şekil 2.1). Kondansatörler yalıtkan maddenin cinsine göre adlandırılır. Yalıtkan cinsine göre belli başlı kondansatör çeşitleri şunlardır [2]:

- |                             |   |
|-----------------------------|---|
| 1. Vakumlu kondansatör      | 7. Seramik kondansatör                                    |
| 2. Havalı kondansatör       | 8. Alüminyum elektrolitik kondansatör                     |
| 3. Plastik film kondansatör | 9. Tantal elektrolitik kondansatör                        |
| 4. Mika kondansatör         | 10. OSCON (organik yarı iletken elektrolitik) kondansatör |
| 5. Kağıt kondansatör        | 11. Süper kondansatör                                     |
| 6. Cam kondansatör          | 12. Gimmick (burgu) kondansatör                           |

Kimi kondansatörler kapasiteleri değiştirilemez (sabit) olarak üretilirken, kimi kondansatörlerin kapasiteleri üzerinde oynama, değişikliğe gitme olanağı vardır. Kapasite değerine göre kondansatörler sabit ve ayarlanabilir kondansatörler olarak iki ayrı grupta toplanırken; ayarlanabilir kondansatörler, değişken (varyable), trimer ve varaktör (varactor: variable capacitor, ayarlı kondansatör) olarak üç ayrı alt gruba ayrılır.

Kondansatörler üretim aşamasında kutupları belirlenmiş olarak da tasarlanabilirler. Bu durumda kondansatörler kutupsuz ve kutuplu kondansatörler olarak iki ayrı gruba ayrılırlar. Kutupsuz kondansatörler üretim aşamasında kutuplanmamış ve devreye bağlama yönü önem taşımayan kondansatörlerken, kutuplu kondansatörler üretilirken kutuplu olarak (+ ve - uçlu) tasarlanırlar. Kutuplu kondansatörler devreye bağlanırken uçlarına dikkat edilmelidir; çünkü ters bağlama halinde bu kondansatörler patlarlar.



**Şekil 2.1:** Kondansatörün Genel Yapısı

Kondansatörler alternatif akım devrelerinde elektrik yükünü biriktirmek, kapasitif reaktans sağlamak amacıyla kullanılan gereçlerdir. Bir kondansatörün elektrik yükü taşıyabilme yeteneği yani kapasitesi  $C$  ile gösterilir ve levhalarda birikmiş elektrik yükünün ( $Q$ : Coulomb), levhalar arasındaki potansiyel farkına ( $U$ : Volt) oranına eşittir [1, 6].

$$C = Q/U \text{ (Farad)} \quad (2.1)$$

Elektrik yükünün zamanla değişimi elektrik akımını ( $I$ : Amper) yaratır:

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (2.2)$$

Bir kondansatörün yükü  $Q = C \times U$  olduğundan içinden geçen akım

$$I = C \frac{dV}{dt} = C \times 2\pi \cdot f \cdot U \text{ (Amper)} \quad (2.3)$$

olur.



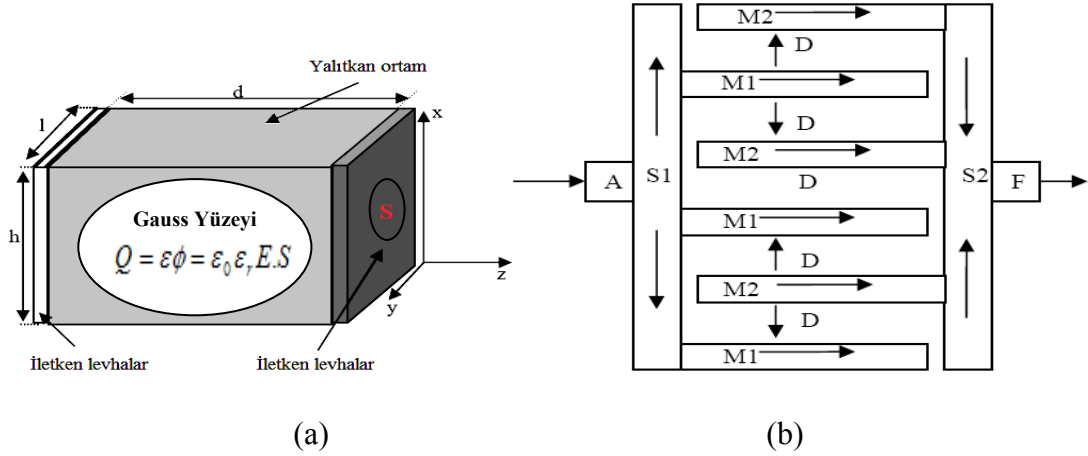
## 2.1 Kondansatörlerin Fiziksel Tasarım Yöntemleri

Uygulamada kondansatör tasarımlarını üç ayrı fiziksel yapıya ayırabiliriz [2, 6].

### 2.1.1 Düzlemsel Kondansatörler

Uygulamada oldukça fazla karşılaşılan bir kondansatör tipidir. Düzlemsel iki metal tabaka arasında belli bir dielektrik katsayısına sahip olan bir yalıtkanın kullanılmasıyla elde edilir. Bu yalıtkan malzeme hava, plastik, kağıt, mika vb. malzemeler olabilir. Aradaki malzeme tipi, kapasiteyi doğrudan etkiler.

Düzlemsel koordinatlarda gerilim değişimi sadece bir boyutta gerçekleşir. Bunu Şekil 2.2'den de görebiliyoruz. İki kalın çizgi metal tabakaları belirtirken, aradaki  $d$  kadar uzaklık içerisinde yalıtkan bir malzeme bulunmaktadır. Metal tabakaların alanları  $S$  olup, birinin gerilimi 0 iken diğer tabakaya  $U$  gerilimi uygulandığında elektrik alanı  $E$ , yüksek potansiyelden düşük potansiyele doğru olur [2].



Şekil 2.2: Düzlemsel Kondansatörün Genel Yapısı

a) Dielektrik eşdeğerinin görünümü; b) İç kapasitelerin dağılımı

Tabaka üzerinde herhangi bir noktada gerilim değeri değişmez. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi  $x$  ve  $y$  ekseninde gerilim değişmemektedir [8]. Aradaki yalıtkan malzeme gerilime karşı bir direnç göstereceğinden,  $z$  ekseninde gerilim düşümü olur, bir tabakadan diğerine geçerken gerilim  $U$  değerinden 0 değerine düşer. Kondansatörün gerilim yüklenmeyen plakasının  $z = 0$ , gerilim yüklü plakasının  $z = d$  konumlarında bulunduğu göz önüne alınırsa hesaplamalar sonucunda düzlemsel kondansatörün kapasitesinin değerinin nelere bağlı olduğu bulunacaktır. Plakalar arasından geçen bir Gauss yüzeyi düşünülür ve buraya Gauss yasası uygulanırsa ve

elektrik alan şiddetiyle potansiyel arasındaki  $U = E \cdot d$  ilişkisi de düşünülürse sığa için,

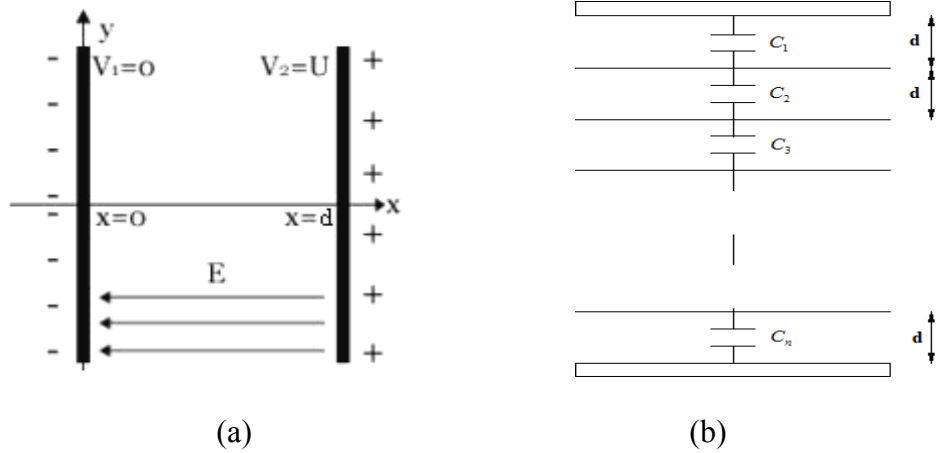
$$C_{\text{düzlemsel}} = \frac{Q}{U} = \frac{\epsilon S}{d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} \quad (2.4)$$

$$Q = \epsilon \phi = \epsilon_0 \epsilon_r \cdot E \cdot S \quad (2.4a)$$

elde edilir.

Burada,  $C$  (F) kapasite,  $\epsilon$  (F/m) yalıtkan ortamın dielektrik sabiti (PP film için bağıl dielektrik sabiti  $\epsilon_r = 2,2$ ),  $S = l \cdot h$  (m<sup>2</sup>) iletken levhanın yüzey alanı (sargı yöntemiyle elde edilen düzlemsel kondansatörlerde ise etkin genişlik ile film genişliğinin çarpımıdır),  $d$  (m) iletken levhalar arasındaki uzaklık (film kalınlığı) dır.

Bu ifadeye göre düzlemsel kondansatörlerde kapasiteyi değiştiren etmenler, aradaki malzemenin dielektrik katsayısı, malzemenin kalınlığı ve metal plakaların yüzey alanıdır. Yüzey alanı ve dielektrik katsayısı arttıkça, aradaki mesafe azaldıkça kapasite değeri artmaktadır (Şekil 2.3) [1-3, 6].



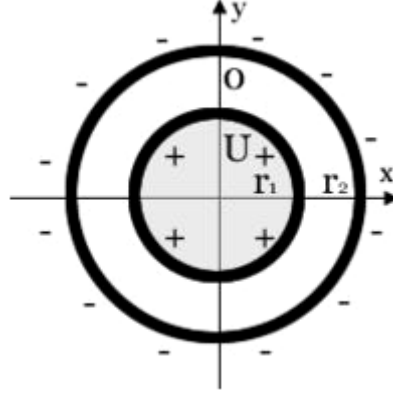
**Şekil 2.3:** Düzlemsel Kondansatör Elektrot Sistemi

a) Düzlemsel elektrot sistemi; b) Çok tabakalı düzlemsel elektrot sistemi

### 2.1.2 Küresel Kondansatörler

Küresel kondansatörler iki metal kürenin arasına bir yalıtkanın yerleştirilmesiyle oluşturulur. Günlük yaşamda çok da kullanım alanı yoktur, ancak özellikle yüksek gerilim tekniğinde benzetim yapmak için kullanılır ve kolaylık sağlar. Farklı çeşitleri mevcuttur. Küreler iç içe; fakat merkezleri birbirinden ayrık veya küreler karşılıklı

olabilir. Ancak kolaylık olması açısından eşmerkezli küresel kondansatörler kullanılabilir. Bu bize hesaplamada kolaylık sağlayacaktır [2].



**Şekil 2.4:** Küresel Kondansatör

Şekil 2.4'den de görüldüğü gibi iç kürenin yarıçapı  $r_1$ , dış kürenin yarıçapı  $r_2$ 'dir. Burada dış küre genellikle topraklanır ve potansiyeli  $U_{r_2} = 0$  olur. Kondansatör  $z$  ekseninde ise yine  $r_1$  ve  $r_2$  uzaklıkları arasında yer alır. İç küreye gerilim uygulanıp dış küre topraklandığında, sistem belli bir değerde yük depolama özelliğine sahip olur. Eşmerkezli küresel kondansatörlerde kapasite ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

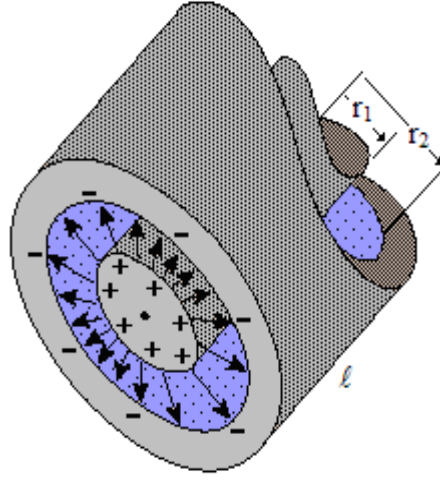
$$C_{k\u00fcresel} = \frac{Q}{U} = 4\pi\epsilon \frac{r_1 \cdot r_2}{r_2 - r_1} = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r \frac{r_1 \cdot r_2}{r_2 - r_1} \quad (2.5)$$

$$U = U_{r_1} - U_{r_2} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \left( \frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2} \right) \quad (2.5a)$$

Bu ifadeye göre aradaki malzemenin dielektrik katsayısı, kapasite değerini doğrudan etkiler,  $r_1$  ve  $r_2$  yarıçapları ise alacakları değerlere göre kapasite değerini etkilemektedir.

### 2.1.3 Silindrsel Kondansatörler

Silindrsel kondansatörler içi boş iki metal silindir tabakanın birbirinin içine yerleştirilmesi ve aralarına yalıtkan bir malzemenin koyulmasıyla tasarımlanır. Bu tip kondansatörlerin günlük hayatta kullanımı çoktur. Örneğin kablolar, yüksek gerilim hava hatları veya geçit izolatörleri kullanıldığı alanlardandır. Eşmerkezli silindrsel kondansatör kullanımı tasarım açısından da kolaylık sağlamaktadır.



**Şekil 2.5:** Silindirs el Kondansatör

Şekil 2.5’de görüldüğü gibi iç silindirin yarıçapı  $r_1$ , dış silindirin yarıçapı  $r_2$ ’dir. Silindir uzunlukları ise  $\ell$  olarak verilmiştir. Gerilim iç silindire uygulanır, dış silindir ise topraklanır. Bu durumda sistem yalıtkan malzeme üzerinde yük depolama özelliği gösterir. Bu kapasitenin değeri ise aşağıdaki gibidir [2, 6].

$$C_{\text{silindirs el}} = \frac{Q}{U} = \frac{2\pi\epsilon\ell}{\ln(r_2/r_1)} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r\ell}{\ln(r_2/r_1)} \quad (2.6)$$

Bu ifadede görüldüğü gibi kapasite değeri, yalıtkan malzemenin dielektrik sabitinden ve silindirlerin uzunluğundan doğru orantılı olarak etkilenmektedir. Dielektrik sabitinin artması ve kondansatör boyunun uzaması kapasite değerini artırmaktadır. Doğal logaritmanın içindeki yarıçapların oranı  $r_2/r_1$  ise ters orantılı bir etki yapmaktadır. Yarıçaplar arasındaki oranda oynama yapılarak çeşitli değerlerde silindirs el kondansatörler elde edilebilir.

## 2.2 Kondansatörlerin Hesabı

Kondansatörler alternatif akım şebekesinde bir reaktans gibi etki ederler, ohm cinsinden kapasitif reaktans:

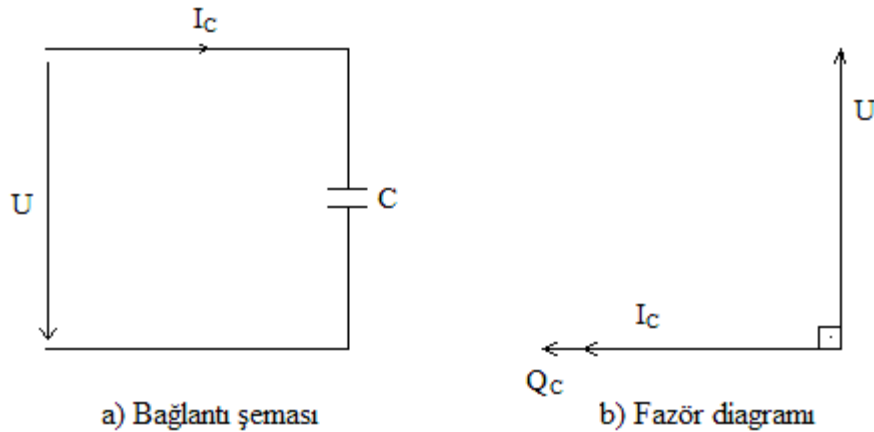
$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (2.7)$$

olup,  $C$  farad cinsinden kondansatörün kapasitesi ve  $\omega = 2\pi f$  açısal frekanstır.

Frekans  $f = 50$  Hz olan şebekelerde  $\omega \cong 314$  1/s alınır. Ohm kanununa göre  $U$  gerilimine bağlanan bir kondansatörün çektiği  $I_C$  kapasitif akım:

$$I_C = \frac{U}{X_C} = U \cdot \omega \cdot C \quad (2.8)$$

dir. Bu akım,  $U$  gerilimine göre  $90^\circ$  önde gider (Şekil 2.6). Şu halde şebekeye bağlı bir kondansatörün şebekeden kapasitif bir akım çekmesi, şebekeye endüktif akım vermesine eşdeğerdir.



**Şekil 2.6:** Bir Fazlı Kondansatörün Bağlanması

$U$ : Gerilim;  $I_C$ : Kapasitif akım;  $Q_C$ : Kondansatör gücü;  $C$ : Kapasite

Kondansatörün gücü için:

$$Q_C = U \cdot I_C \cdot 10^{-3} \text{ kVAr} \quad (2.9)$$

veya (2.8) ifadesi ile,

$$Q_C = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot 10^{-3} = \frac{I_C^2 \cdot 10^{-3}}{\omega \cdot C} \text{ kVAr} \quad (2.10)$$

elde edilir.  $Q_C$  reaktif güç, endüktif reaktif güce göre  $180^\circ$  ileridedir, yani her iki reaktif güç aynı doğrultuda ve ters yöndedirler. Böylece kapasitif gücün endüktif gücü götürerek kompanzasyon etkisi yaptığı kolayca anlaşılır [1].

### 2.3 Kondansatörlerin Bağlanması

AG de istenilen güçte kapasitif ünite elde etmek için kondansatör elemanları üçgen olarak bağlanırlar. Deneyimler sonunda görülmüştür ki silindir şeklinde imal edilen kondansatör elemanlarının çapları, yaklaşık boylarına eşit olacak şekilde seçilir.

Bu uygulama kondansatör ömrünü en az iki katına çıkarmakta, ısınmada akımın karesiyle orantılı olduğu için, 1/4'üne düşürmekte, sonuç olarak daha sıcak ortamlarda çalışabilen kondansatör imal edilmektedir.

Üç fazlı alternatif akım tesislerinde kondansatörler şebekeye veya tüketici uçlarına üçgen veya yıldız olarak bağlanabilirler (Şekil 2.7). Üçgen bağlamada her iki hat arasındaki kondansatörün kapasitesi  $C_{\Delta}$ , ile ve yıldız bağlamada her faza bağlanan kondansatörün kapasitesi  $C_Y$  ile gösterilirse, Her iki sistemde de  $Q_C$  gücünün eşit olduğu kabul olunursa  $C_Y = 3 C_{\Delta}$  olur.

Yıldız bağlamada her bir faza bağlanan kondansatörün kapasitesi, üçgen bağlamada ki kondansatör kapasitesinin üç katına eşittir. Bu yüzden faz ve hat gerilimleri arasında farkın yalıtım bakımından çok önemli olmadığı alçak gerilim tesislerinde üçgen bağlama yıldız bağlamaya göre 1/3 oranında daha ucuza mal olur. Ekonomik sebeplerden dolayı kondansatörlerin üçgen bağlamaları tercih edilir [1].

Üçgen bağlama için,

$$Q_C = 3 \cdot U_h^2 \cdot \omega \cdot C_{\Delta} \cdot 10^{-3} = \sqrt{3} \cdot U_h \cdot I_C \cdot 10^{-3} = \frac{I_C^2}{\omega \cdot C_{\Delta}} \cdot 10^{-3} (kVAr) \quad (2.11)$$

Yıldız bağlama için ise,

$$Q_C = U_h^2 \cdot \omega \cdot C_Y \cdot 10^{-3} = \sqrt{3} \cdot U_h \cdot I_C \cdot 10^{-3} = \frac{3 \cdot I_C^2}{\omega \cdot C_Y} \cdot 10^{-3} (kVAr) \quad (2.12)$$

yazılabilirler. Burada  $U_h$  volt cinsinden iki faz arası gerilimi,  $I_C$  amper cinsinden kapasitif hat akımını gösterir.



## 2.5 Rezonans Frekansı

Kondansatör,  $n$  tam sayı olarak aşağıdaki eşitliğe uygun olan bir harmonikle rezonansa olmalıdır. Kondansatör ve paralel bağlı alıcıdan aşırı akımlar geçerse (temel birinci harmoniğinin akımından) bunların yanmasına neden olabilir [1, 3].

$$n = \sqrt{\frac{S}{Q}} \quad (2.13)$$

Burada,  $S$ : Kondansatörün bağlı olduğu yerdeki kısa devre gücüdür (MVA),  $Q$ : Megavar (MVA<sub>r</sub>) olarak ifade edilir,  $n$ : Harmonik sayısı; bu rezonans harmonik (Hz) ve şebeke frekansı (Hz) arasındaki orandır.

Rezonans frekansı  $f_r$  (Hz) ise:

$$f_r = f_1 \cdot \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}} \quad (2.14)$$

Burada,  $S_{cc}$  : Sistemin kısa devre gücü;  $Q$ : Kurulu reaktif güç

Rezonans frekansında toplam reaktans sifıra eşit olduğundan ve kondansatörün iç direncinin çok küçük olması nedeniyle devreden büyük akımlar geçer.

## 2.6 Güç Faktörü

Yükün güç faktörü, görünürdeki güce aktif gücün oranı olarak tanımlanır.  $\cos\phi$ , 1.00'e yaklaştıkça, şebekeden çekilen güç değeri azalır. Eğer  $\cos\phi = 1$  olursa, 400 V üç fazlı ana hatlarda 500 kW'ın iletimi 722 A akıma ihtiyaç duyar.  $\cos\phi = 0.6$ 'da ki aynı etkin gücün iletimi çok daha yüksek akıma (yani 1203 A) ihtiyaç duyacaktır. Bundan dolayı besleme trafoları gibi dağıtım ve iletim elemanları da bu yüksek akım için boyutlandırılmak zorundadır.

Düşük güç faktörlü sistemler için mevcut standartlara uygun elektrik gücünün iletimi, hem tüketici hem de şebeke dağıtımı için daha masraflı olur. Daha fazla masrafın bir diğer nedeni ise trafo ve jeneratörlerin sargıları olduğu gibi, sistemin tüm akımının neden olduğu iletkenlerde oluşan ısıdan kaynaklanan kayıplardır [1].

Normal koşullarda bir üç fazlı sistemin güç faktörü düşerken akım artar. Sistemdeki ısı kaybı akım artışının karesine orantılı olarak artar.



Sonuç olarak;

1. Elektrik kayıplarında azalma, güç faktörünü düzeltmekle sağlanır.
2. Şebeke, genişleyen bir sistem için faydalı olabilecek ek yükü destekleyebilecektir.
3. Güç faktörü düzeltilmesiyle, dağıtımdaki yük düşecek ve bu da sistemdeki cihazların ömürlerinin uzamasını sağlayacaktır.

### **Güç faktörü düzeltme yöntemleri**

Kondansatörün sisteme sağladığı karşıt kapasiteli reaktif güç, elektrik yükünün ihtiyaç duyduğu endüktif reaktif güçle telafi edilebilir. Bu şebekeden çekilen reaktif güçte bir düşüşü sağlar ve Güç Faktörü Düzeltme (GFD) adını alır.

Güç faktörü düzeltmenin en yaygın yolları şunlardır [12]:

*Tek veya sabit GFD:* Her iki yükün reaktif gücünün telafisi veya besleme ucundaki yükün azaltılması (sabit ve/veya büyük güçle tek alıcı yükler için) için kullanılır.

*Grup GFD:* Bir sabitlenmiş kondansatörün bir grup eş zamanlı çalışan endüktif yüke bağlanması. (Örneğin Motor grubu, deşarj lambaları) için kullanılır

*Merkezi GFD:* Belli sayıda kondansatörün bir ana güç dağıtım istasyonu veya ikincil istasyona bağlanmasının yaygın olduğu değişen yüklerle geniş elektrik sistemleri için kullanılır.

Kondansatörler, sürekli olarak şebekedeki reaktif güç talebini izleyen, mikroişlemci temelli reaktif güç kontrol rölesi aracılığıyla kontrol edilirler. Röle, kondansatöre toplam yükün gerçek reaktif gücünü telafi etmek ve şebekedeki tüm talebi azaltmak için bağlanır [13].

Reaktif gücün düzeltilmesinde kondansatörlerin yanı sıra aşırı uyartılı senkron motorlarda kullanılır; fakat kondansatörlerin kullanılması, senkron motorlara oranla daha yaygındır.

### **Güç katsayısını düzeltmek için gerekli kondansatör kapasitesinin hesaplanması**

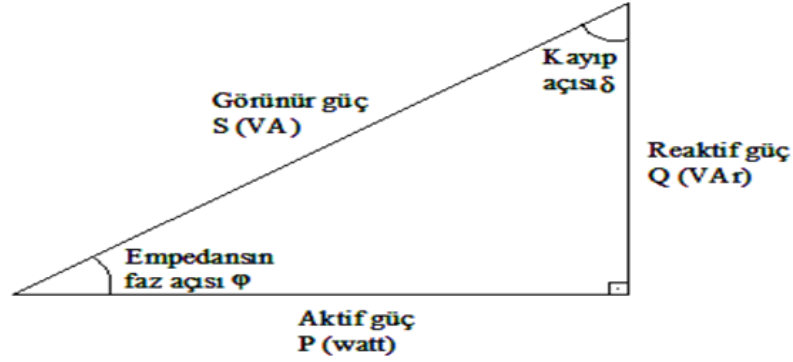
İstenilen güç faktörünü elde etmek için gerekli olan reaktif güç Şekil 2.8'in yardımıyla aşağıdaki gibi hesaplanır [1].

$$Q_C = P \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (2.15)$$

$P$ : Aktif güç;  $Q_C$ : Reaktif güç

$\cos \varphi_1$ : Mevcut güç katsayısı;  $\cos \varphi_2$ : Ulaşılmak istenen güç katsayısı

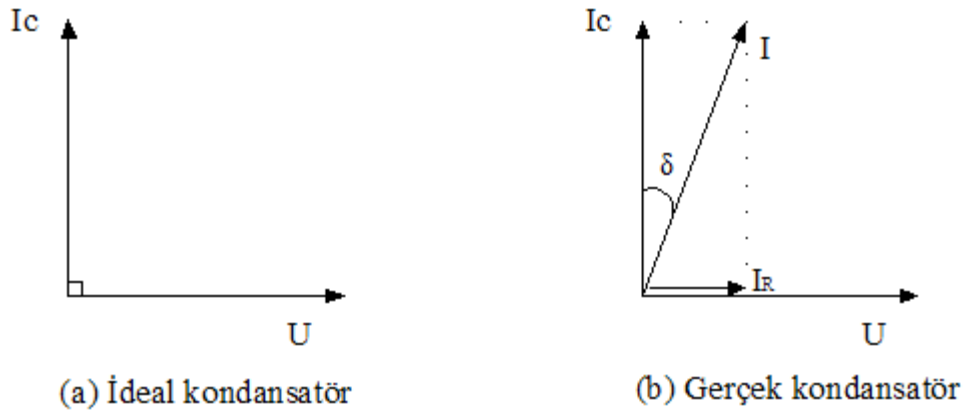
$(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$ : Çarpma faktörü (k) [EK C] olarak tanımlanır.



Şekil 2.8: Güç Üçgeni

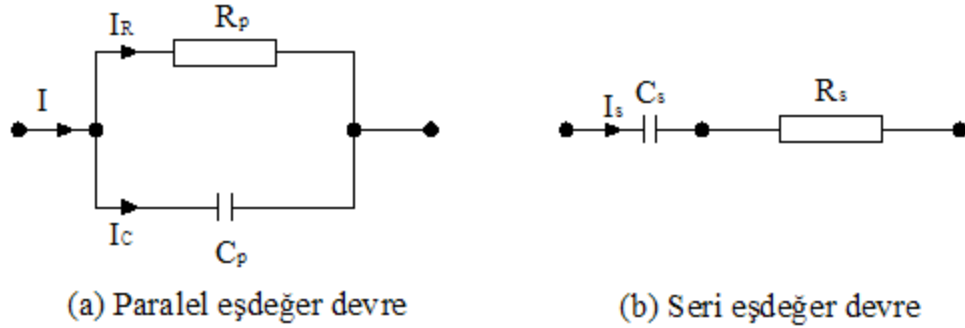
## 2.7 Bir Kondansatörde Kayıp Açısı Faktörü (KAF)

Dielektrik kaybın meydana gelişi elektriksel eşdeğer devrede bir ohmik direncin varlığı ile gösterilir. İdeal bir yalıtıkta (dielektrikte) bu direnç bulunmaz; ancak ideal olmayan gerçek dielektrikte ise ideal bir kondansatöre seri veya paralel eşdeğer devre ile gösterilir. Bu direnç, kayıp direnç olarak adlandırılır. İdeal kondansatörde akım ile gerilim arasında  $90^\circ$  faz farkı vardır (Şekil 2.9.a). Gerçek kondansatörde akım ile gerilim arasındaki faz farkı  $90^\circ$ 'nin altındadır (Şekil 2.9.b). Faz açısının  $90^\circ$ 'den sapma açısı  $\delta$  olarak gösterilir ve “kayıp açısı” olarak adlandırılır. Bu açının tanjantı ( $\tan \delta$ ) ise “dielektrik kayıp katsayısıdır (dielektrik kayıp faktörüdür)” [6].



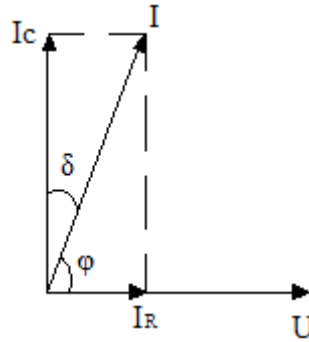
Şekil 2.9: Kondansatör Akım ve Gerilimleri Arasındaki Faz Açısı

Gerçek kondansatörde kayıp açısının meydana gelmesine neden olarak yukarıda da sözü edildiği gibi bir ohmik direncin varlığı gösterilir. Buna ilişkin seri ve paralel eşdeğer devreler ise aşağıdaki gibidir (Şekil 2.10).



**Şekil 2.10:** Gerçek Kondansatörün Eşdeğer Devreleri

İdeal bir dielektrikte güç faktörü değeri sıfır olacaktır. İdeal olmayanda ise bu değer sıfır olamaz. Paralel eşdeğer devreyi ve Şekil 2.11'deki fazör diyagramını göz önüne alarak kayıp güç faktörü hesap edilirse:



**Şekil 2.11:** Paralel Eşdeğer Devrenin Fazör Diyagramı

Kondansatörden geçen akım,

$$I_C = \omega \cdot c \cdot U \quad (2.16)$$

olacaktır. Toplam akım değeri  $I$  kullanılarak dielektrikteki aktif güç ise,

$$P_k = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (2.17)$$

ile hesaplanır. Burada kayıp açısı ( $\delta$ ) kullanılırsa

$$P_k = U \cdot I \cdot \sin \delta \quad (2.18)$$

olur.

Akımlar arasındaki,

$$I_C = I \cdot \cos \delta \quad (2.19)$$

$$I = I_C / \cos \delta \quad (2.20)$$

eşitliği kayıp güç ifadesinde yerine yazılırsa

$$P_k = U \cdot \frac{I_C}{\cos \delta} \cdot \sin \delta \quad (2.21)$$

elde edilir. Kondansatör akımı eşitliği yerine yazılarak kayıp güç

$$P_k = U \cdot \frac{\omega \cdot C \cdot U}{\cos \delta} \cdot \sin \delta \quad (2.22)$$

$$P_k = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \tan \delta \quad (2.23)$$

ile hesaplanabilir. Dielektrik kayıp güç paralel devrede aynı zamanda,

$$P_k = U \cdot I_R \quad (2.24)$$

ifadesi kullanılarak da,

$$P_k = \omega \cdot C_p \cdot U^2 \cdot \tan \delta \quad (2.25)$$

biçiminde elde edilir. Paralel devre için kayıp faktörü,

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega \cdot R_p \cdot C_p} \quad (2.26)$$

eşitliğinden bulunur. Seri devrede ise dielektrik kayıp

$$P_k = I^2 \cdot R_s \quad (2.27)$$

eşitliğinden,

$$P_k = U \cdot \frac{\omega \cdot C_s \cdot U}{1 + \tan^2 \delta} \cdot \tan \delta \quad (2.28)$$

ile belirlenir. Seri devre de kayıp faktörü,

$$tg\delta = \omega \cdot R_S \cdot C_S \quad (2.29)$$

bağıntısından bulunur. Her iki devrede kayıpların eşitliği kullanılarak,

$$C_S = C_P \cdot (1 + \tan^2 \delta) \quad (2.30)$$

elde edilir.

Dielektrik kayıp ifadelerinden de anlaşıldığı gibi kayıp değeri, kayıp açısı ile orantılı olup önemli bir bilgi vermektedir. Kayıp faktörünün ( $\tan\delta$ ) bilinmesi veya ölçülmesi çalışılan gerilimde kullanılan elemanlar veya dielektrik malzemesinin çalışma koşullarında iyi bir performans gösterip göstermeyeceği hakkında bize bilgi verir.

Kayıp faktörü ( $\tan\delta$ ) pratikte hiçbir zaman sıfır olamaz; çünkü kondansatörlerin aktif kayıpları (ısıya dönüşen enerjileri) hiçbir zaman sıfır olamaz.

Kompanzasyon tesislerine ait tesis malzemesini seçerken, açma ve kapama esnasında baş gösteren olayların tesirleri göz önünde bulundurulmalıdır. Kondansatörler devreye alınırken veya paralel bağlanırken meydana gelen geçici rejim esnasında kısa devre akımına benzer büyük akımlar çekerler. Bu akımların değeri ve süresi kondansatör gücüne, söz konusu şebeke parçasının endüktif direncine ve öz frekansına bağlıdır. Eğer anahtar, gerilimin en büyük değerinde kapanırsa akım darbeleri de en büyük değerini alır. Bu akımın etki süresi nadiren 1 veya 2 periyottan daha uzun olur.

Bu esnada kondansatörlerin meydana gelen bağlama aşırı gerilimlerine dayanabilmeleri için; madeni folyonun kondansatör mahfazasına karşı yalıtımının anma gerilimin en büyük değerinin üç buçuk katına eşit olması öngörülür.

Kondansatörler devreden çıkarken kapasitif akımın kesilmesinin daha zor olması sebebi ile büyük arklar meydana gelir. Onun için kompanzasyon tesislerinde kullanılan anahtar, sigorta ve hat gibi bağlama elemanlarının seçilmesi esnasında bu özellikler göz önünde bulundurulur. Bu yüzden kompanzasyon tesislerinde kullanılan bağlama elemanları normal tesislerde kullanılanlardan biraz farklıdır ve bunlar kondansatör gücüne karşılık gelen anma akımından daha büyük akımlara göre seçilirler [12]. Kompanzasyon anahtarlama sistemleri için özel kompanzasyon

kontaktörleri kullanılmalıdır. Kontaktörler, sahip oldukları akım sınırlayıcı kontak blokları sayesinde, kondansatörlerin kalkış akımlarını sınırlandırır. Böylece gerek kondansatörlerin gerekse devre koruyucu cihazların ömrü uzar. Kontaktör üzerinde ana kontaklara paralel bağlanan akım sınırlayıcı dirençlere sahip geçiş bloğu varsa kontaktörün ve kondansatörün ömrü iki katına çıkar [13].

Gerek motorların tek tek kompanzasyonunda gerekse merkezi kompanzasyonda bazı şartlarda rezonans olayı meydana gelip sigortaların atmasına, otomatik şalterleri açmasına şahit oluruz. Buna sebep olarak bir motor paralel kondansatör devresinin şebekenin harmoniklerinin bazı değerlerinde kapasitif durum göstermeleri ve bu kapasitenin de şebekeyi besleyen trafonun indüktivitesi ile bir rezonans olayı meydana getirmesidir. 50 Hz temel frekansta bu tehlike mevcut değildir. Zira genellikle motor kondansatör grubu  $\cos\phi = 1$  hatta  $\cos\phi = 0,90$  değerine ulaşacak şekilde kompanze edilirler ve şebekeden çekilen daima indüktif yükür. Bunun trafonun indüktivitesi ile bir rezonans olayı meydana getirmesi mümkün değildir.

## 2.8 Harmoniklerin Kondansatör Üzerine Etkisi

Bildiğimiz üç fazlı alternatif akım şebekelerinde kararlı durumda birinci temel harmoniklerden başka, yine sinüs şeklinde (ark ocakları hariç) yalnızca tek sayılı olmak üzere 3, 5, 7, 9, 11, 13, ... gibi mertebelerden yüksek harmonikler oluşabilir. Ancak üç ve üçün katı harmonikler simetrik bileşenlerin özelliği nedeniyle ihmal edilebilirler. Harmonik mertebesi yükseldikçe genlik değeri düşeceğinden 17. mertebeden yüksek harmonikler dikkate alınmayabilir.

Elektrik tesislerinde reaktif güç kompanzasyonu amacıyla tüketicilerin bağlı oldukları baralara kondansatörler paralel bağlanırlar. Eğer bu baradan paralel olarak beslenen cihazlar harmonik içeriyorlarsa, dolayısıyla kondansatörler de harmonik gerilimle besleneceklerdir. Kondansatörün çok küçük olan iç direnci ve sarımlar nedeniyle oluşan endüktansı ihmal edilirse;

$$Z_C = X_C = 1/\omega C \sim \omega = 2\pi f \quad (2.31)$$

olduğuna göre, harmoniklerin varlığı, yani frekansın yüksek olması  $Z_C$  empedansını küçülecek, dolayısıyla ohm kanunu gereğince bu durumda kondansatörün akımı yükselecektir. Gerilimdeki harmoniklerle kondansatörün gücü de artar.

Kondansatörün toplam gücü, gerilimin ve akımın etkin değerlerinin çarpılması ile elde edilmez ve normal vatmetre ile ölçülemez. Toplam gücün tam olarak bulunması için gerilimin ve akımın temel ve harmonik değerlerini ayırdıktan sonra ayrı ayrı temel ve harmonik güçleri hesaplanır ve bunların toplamı alınır. TS EN 60831-1 ve 60831-2 standartlarına göre kondansatörlerin sürekli olarak anma güçlerinin % 135'i ile yüklenmelerine izin verilir [4, 5]. Aslında önemli olan kondansatör gücünün tam olarak tespit edilip edilmemesi değil, izin verilen sınır değerini aşp aşmadığının bilinmesidir. Bu nedenle harmoniklerin kondansatörleri ne derecede yüklediklerinin bilinmesinde yarar vardır [12].

Yüksek harmonikler, güç kondansatörlerini bu şekilde etkilemelerinin yanı sıra rezonans olaylarının oluşmasına da neden olurlar. Rezonans, bağlantı durumuna göre paralel rezonans olayı ve seri rezonans olayı olarak iki şekilde gerçekleşir.

Paralel rezonans olayı isminden de anlaşılacağı gibi bir bobinle bir kondansatörün paralel bağlanmasıdır.  $X_L = X_C$  koşulunun sağlanması halinde paralel rezonans olayı ortaya çıkar. Rezonans frekansı (2.14) ifadesinden farklı olarak,

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.32)$$

şeklinde ifade edilebilir. Rezonans durumunda, reaktif direnç toplamı sıfır olacağından, eşdeğer empedans devredeki ohmik dirence eşittir. Bu durumda şebekeden çekilen akım çok küçük değerde kalır.

Seri rezonans ise elektrik enerjisi üreten jeneratörden başlamak üzere iletim hatları, transformatör ve dağıtım hatlarıyla birlikte güç kondansatörlerine kadar tüm sistem rezonans devresini teşkil ederler. Rezonans koşulu paralel rezonans olduğu gibidir. Kondansatör üzerindeki gerilim, rezonans frekansında;

$$U_C = \frac{I_r}{\omega \cdot r \cdot C} = \frac{U}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.33)$$

bağıntısına göre artar. Bu gerilim de kondansatörün sürekli çalışabilme gerilimi olan  $1,1 \times U_n$  değerini aşarak dielektrik malzemeyi aşırı zorlayarak delinmesine sebep olacaktır. Bu nedenlerden dolayı seri rezonans olayı, kondansatör dahil tüm sistemi tahrip edecek nitelikte olup kesinlikle kaçınılması gereken bir olaydır [3].

### 3. KONDANSATÖR ÜRÜN GRUPLARI

Kondansatörler sanayide kullanım alanlarına göre çeşitli gruplara ayrılır. Tablo 3.1’de ayrıntılı olarak gösterilen kondansatör ürünleri çeşitli sanayi dallarında ve cihazlarında sıklıkla kullanılmaktadır [9, 10].

**Tablo 3.1:** Kullanım Alanlarına Göre Kondansatörler

ÜRÜN	KULLANIM ALANLARI
Alçak Gerilim Güç Kondansatörleri <ul style="list-style-type: none"><li>• Standart tip</li><li>• Silindirselsel tip</li><li>• Yüksek performanslı</li></ul>	Sanayi tesislerinin, atölyelerin ve işletmelerin kompanzasyonunda
Daimi Devre Kondansatörleri <ul style="list-style-type: none"><li>• Motor daimi devre kondansatörleri</li><li>• Aydınlatma Kondansatörleri</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Beyaz eşya, klima ve kesintisiz güç kaynaklarında</li><li>• Aydınlatma armatürlerinde, yol ve endüstriyel aydınlatmalarında</li></ul>
Motor İlk Hareketi İçin Kullanılan Elektrolitik Kondansatörler	Tek fazlı motor, pompa ve kompresörlerde

#### 3.1 Alçak Gerilim Güç Kondansatörleri

Sanayi tesislerinin, reaktif enerji ihtiyacının yerinde karşılanarak, güç faktörünün ( $\cos\phi$ ) istenen değerde tutulabilmesi amaçlanmaktadır. Alçak gerilim şebekelerinde, reaktif güç kompanzasyon panolarında kullanılırlar.

##### 3.1.1 Standart Tip AG Güç Kondansatörleri

Bu tip kondansatörlerde kullanılan dielektrik düşük kayıplı PP film, elektrot ise bu filme kaplanmış ince metalize tabakadır. Kondansatör sarımları daha verimli ve ömrünün uzun olması için vakum altında, sağlığa zararı olmayan bir yağ ile emprenye edilmelidir. Bu yapıdaki kondansatörlerin özelliği, öz onarımlı olması yani kalıcı kısa devreye girmeden kendi kendini yenilemesidir.



### **Temel özellikleri**

- *Ekolojik olmalı*, çevreyi dolaylı ya da doğrudan kirleten hiçbir malzeme içermemelidir.
- *Dayanıklı olmalı*, iç yapı özellikleri sayesinde ağır çevre koşulları ve bunun gibi etkenler altında problemsiz çalışabilmelidir.
- *Ekonomik olmalı*, dielektrik ve aktif toplam kayıpları düşük olmalıdır.
- *Küçük boyutlu ve modüler olmalı*, yapısı gereği her türden pano montajına uygun olmalıdır.

### **3.1.2 Silindrsel Tip AG Güç Kondansatörleri**

Bu tip kondansatör üretiminde metalize polipropilen dielektrikli tek fazlı sarımlar üçgen bağlanarak bir alüminyum tüp içine konulur. Kondansatörün ömrünü artırmak için kullanılan empenye yağı ve yalıtım için kullanılan çevreye ve sağlığa zararlı olmayan reçine kullanılabilir.

### **Çift koruma sistemi**

Bu tip kondansatörler kendini onarma özelliği ile kalıcı kısa devreye girmezler ve iç basıncın artması durumunda; patlama ve yanmayı önlemek amacıyla, mekanik olarak iç bağlantının koparak kondansatörün devreden ayrılmasını sağlayan bir koruma sistemi bulundurlar.

- Sabit kompanzasyonlarda (motor kompanzasyonu)
- Otomatik veya manuel (elle yapılan) kompanzasyon panolarında
- Kesintisiz güç kaynaklarında (UPS) kullanılabilir.

### **3.1.3 Yüksek Performanslı AG Güç Kondansatörleri**

Özellikle yüksek performans gerektiren kullanım yerleri için imal edilen bu tip kondansatörlerde kullanılan dielektrik, düşük kayıplı PP film; elektrot ise bu filme kaplanmış ince metalize tabakadır. Kondansatör sarımların daha verimli ve ömrünün uzun olması için kalınlığı daha fazla olan dielektrik malzemeden sarılmalı ve vakum altında, sağlığa zararı olmayan bir yağ ile empenye edilmelidir. Öz onarımlı yani kalıcı kısa devreye girmeyen özelliğinde olmalıdır. Bu tip kondansatörler şok bobinli ve boşalma dirençli tek fazlı kapasitif elemanların üçgen bağlanmasıyla elde edilir.

### Başlıca kullanılma alanları

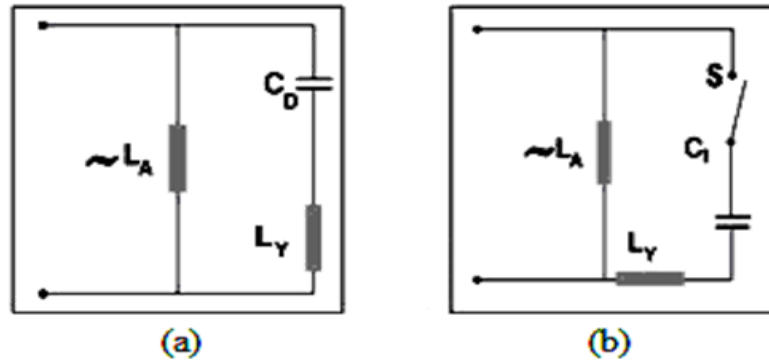
- Sanayi tesislerinin, atölyelerin ve işletmelerin kompanzasyon panolarında
- Endüstriyel uygulamalardaki motorların ve transformatörlerin güç faktörünün düzeltilmesinde
- Enerji iletim hatlarının ve bu hatların güç transformatörlerinin reaktif güç ayarlamasında

### 3.2 AA Daimi Devre Kondansatörleri

Bu tip kondansatörlerde kullanılan düşük kayıplı PP film, elektrot ise bu filme kaplanmış ince bir metalize tabakadır. Metalize film iki kat olarak sarılarak kondansatör haline getirilir. Daha sonra alüminyum veya plastik tüplere konularak dolgu malzemesiyle doldurulurlar. Bu yapıdaki kondansatörlerin özelliği, öz onarımlı olması yani kalıcı kısa devreye girmeden kendi kendini yenilemesidir. Kullanım amacına göre plastik tüp kondansatörler; TTR kablolu, NYAF kablolu, tek veya çift terminalli; alüminyum tüp kondansatörler ise tek veya çift terminalli yapılabilirler.

#### 3.2.1 Motor Kondansatörleri

Tek fazlı ve üç fazlı motorların kompanzasyonunda kullanılan bu tür kondansatörler güç faktörünün ( $\cos\phi$ ) yükseltilmesini ve bu cihazların daha verimli çalışmasını sağlar (Şekil 3.1). Kesintisiz güç kaynakları ve klima üretimi başlıca tüketim kaynaklarıdır.



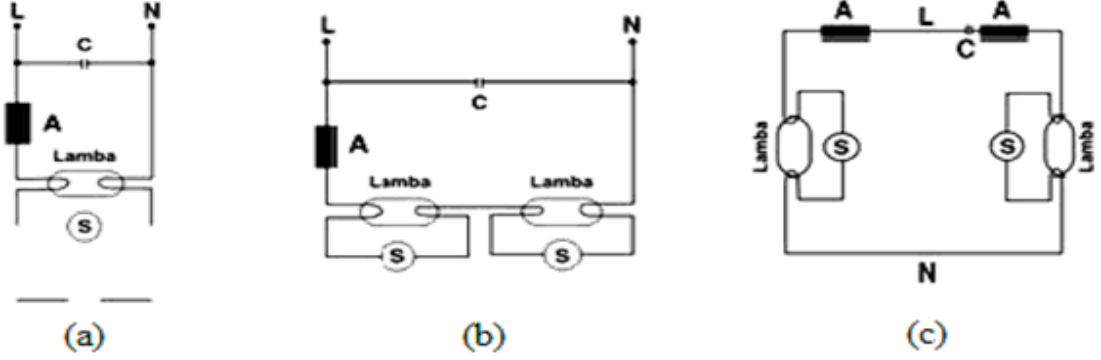
Şekil 3.1: Daimi Devre Kondansatörü Uygulamaları

a) Kalkış ve güç kompanzasyonu için; b) Sadece ilk hareketi sağlamak için

$L_A$ : Ana sargı;  $L_Y$ : Yardımcı sargı; S: Merkezkaç anahtarı;  $C_1$ : İlk hareket kondansatörü;  $C_D$ : Daimi devre kondansatörü

### 3.2.2 Aydınlatma Kondansatörleri

Aydınlatma cihazlarında kullanılan trafo, balast gibi indüktif yükleri kompanse ederek güç katsayısının ( $\cos\phi$ ) yükseltilmesini ve verimin artırılmasını sağlar. Bunun yanında devreye seri bağlandıklarında aydınlatma cihazlarında meydana gelen kırpışma (stroboskobik) olayının önlenmesine de yardımcı olur. Devreye seri veya paralel olarak bağlanabilir (Şekil 3.2).

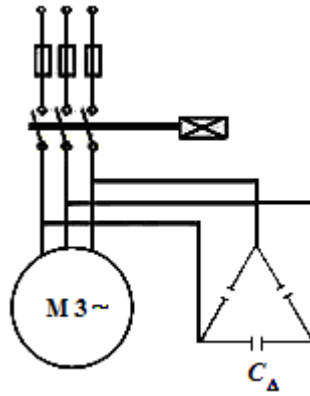


Şekil 3.2: Aydınlatma Kondansatörü Uygulamaları

- a) Tek lambanın paralel kompanzasyonu; b) İki seri lambanın paralel kompanzasyonu; c) İki paralel lambanın seri kompanzasyonu

### Üç fazlı motorların tek fazlı şebekede kullanılması

Üç fazlı motorlar kondansatör yardımıyla tek fazlı şebekede kullanılabilirler. Bu işlemin yapılması için aşağıda bağlantı şekilleri ve gerekli kondansatör kapasiteleri verilmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3: Üç Fazlı Motor Kompanzasyonu

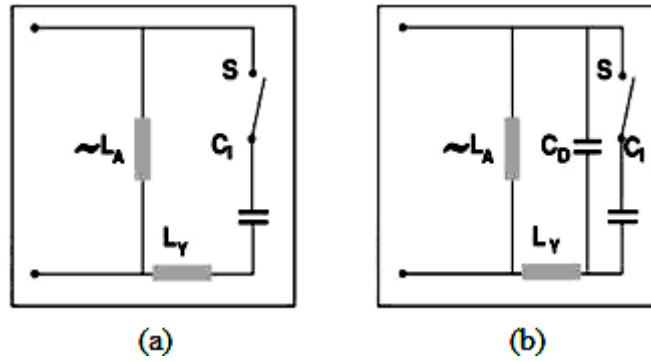
### 3.3 Motor İlk Hareketi İçin Kullanılan Elektrolitik Kondansatörler

İlk hareket kondansatörü her iki tarafı alüminyum oksit kaplı alüminyum folyo ve özel kondansatör kağıdının sarılıp, elektrolitik sıvı emdirilmesiyle oluşturulur, bakalit veya plastik tüplere konulabilir.

Tek fazlı motorların kalkış momentini yükseltmek için kullanılır.

Bu tip kondansatörler, plastik veya bakalit tüp içinde, iç basınca karşı sigortalı ve terminalli olarak ve kelepçe ile veya klemens kutusu içine monte edilebilir. İlk hareket kondansatörleri en çok üç saniye gerilim altında kalmalıdır. Yaklaşık olarak bir yıl depolama süresine sahiptirler, bu sürenin aşılması halinde kondansatörler kullanım öncesi deneye tabi tutulmalıdır.

İlk hareket kondansatörü uygulamaları aşağıda gösterilmiştir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4: Motor İlk Hareketi İçin Kullanılan Elektrolitik Kondansatörler

- a) Sadece ilk hareketi sağlamak için; b) İlk hareket ve daimi devre kondansatörü birlikte

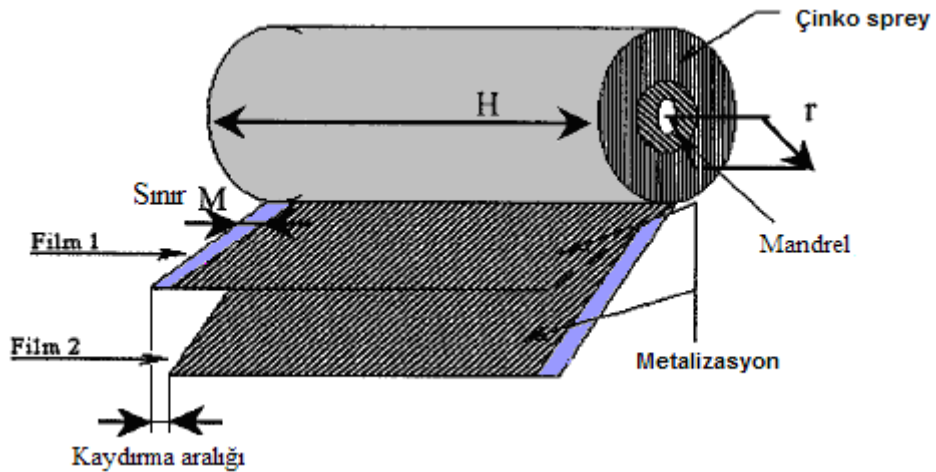
$L_A$ : Ana sargı;  $L_Y$ : Yardımcı sargı; S: Merkezkaç anahtarı;  $C_1$ : İlk hareket kondansatörü;  $C_D$ : Daimi devre kondansatörü

#### 4. AŞIRI BASINÇ DÜZENEKLİ VE SİLİNDİRSEL METAL GÖVDELİ ÜÇ FAZLI ALÇAK GERİLİM MPPF GÜÇ KONDANSATÖRLERİ

Tüketicinin güç katsayısını düzeltmek için kullanılan güç kondansatörlerinin imalatında saf polipropilenden yapılmış, iki çinko metalize polipropilen film üst üste sarılır. Filmlerden biri sağ film, diğeri sol filmdir. Bunun anlamı, metal kaplamasız bölgenin sağda veya solda olmasıdır (Şekil 4.1).

Çinko metalize film, polipropilen filmin vakumda çinko buharına tutularak kaplanması ile elde edilir. Sonuçta bir yüzü iletken, ikinci yüzü yalıtkan bir film elde edilmiş olur. Çinko metalize polipropilen film, vakum teknolojisi ile üretilmektedir.

Silindir şeklindeki elemanların taban alanları çinko ile kaplanır. İki çinko telli bir tabanca yardımıyla doğru gerilimde kısa devre edilir ve bu malzeme çinko basınçlı hava ile taban alanlarına püskürtülür. İki film arasındaki kaydırmadan dolayı oluşan boşluğa bu çinko zerrecikleri saplanır. Taban alanlarının çinko ile kaplanmasının sebebi, kondansatör elemanının tabanına kolay lehim yapılabilmesi ve polipropilen filmin çinko kaplı olması; yani çinko-çinko kontak temasının iyi olmasıdır. Kondansatörün kapasite değerini, filmlerin genişliği, filmlerin kalınlığı, sarım sayısı, aktif genişlik ve kaydırma aralığı belirler [1, 3].



Şekil 4.1: Bir MPP Film Güç Kondansatörünün Genel Görünümü

Büyük şebekelerin yükleri çoğu zaman endüktif karakterdedir. Asenkron motorlar, endüksiyon fırınları, balastlı lambalar hep endüktif akım çektiklerinden, bağlı

buldukları şebekelerin güç katsayılarını küçültürler. Güç katsayısının küçültülmesi enerji iletim ve dağıtım hatlarında gerilim düşümlerine ve güç kayıplarına neden olur; bu durum verimi azaltır. Düşük güç katsayılı yükler alternatör, transformatör ve devre elemanlarının kapasitelerinin gereksiz ve büyük tutulmalarına da neden olur. Bu durumda sistemden ekonomik bir şekilde faydalanmak mümkün olmaz [1].

Alçak gerilim güç kondansatörleri; transformatör, motor, jeneratör vb aygıt ve makinaların elektrik şebekesinden çektiği reaktif gücü üreterek bunların yüklerini düşürmekte ve/veya yeni yüklerin ilave edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu kondansatörler ayrıca, enerji iletim hatlarındaki reaktif kayıpları azaltarak elektrik enerjisinin daha fazla tüketiciye ulaştırılmasına ve tesislerdeki toplam gerilim düşümü ile kayıpların azalmasına olanak sağlar [11].

Metalize polipropilen film dielektrikli mevcut alışlagelmiş tipteki güç kondansatörleri ülkemizde genellikle ince saç veya plastik dış kutulu olarak üretilmektedir. Bu kondansatörlerin herhangi bir nedenden dolayı arızalanmaları durumunda karşılaşılan en ciddi sorun, yapılarının arıza nedeniyle oluşan aşırı iç basınçlara karşı etkin ve kalıcı bir koruma düzeneği eklenmesine olanak tanımamasıdır. Plastik veya ince saçlı kutularda basınç tahliyesi için supap veya basınç amortisörü niteliği oluşturan bazı önlemler alınmasına rağmen, iç basınç ve ısıların çok yüksek seviyelerde olması ve etkilerinin ani olması nedeniyle söz konusu önlemler tamamıyla bir koruma sağlayamamakta ve sonuçta şiddetli patlamalar ve/veya yangınların meydana gelmesine yol açmaktadır. Bu olay sadece maddi hasarlara değil aynı zamanda can kaybına da yol açabilecek niteliktedir. Buna ek olarak, iç basınç ve ısı artışları nedeni ile birim hacimde daha yüksek anma gücünde veya başka bir deyişle aynı anma gücünde daha küçük boyutlu, daha uzun ömürlü ve dolayısıyla daha ekonomik ürünler geliştirilememektedir [3].

Özetlenecek olursa, mevcut klasik tipteki güç kondansatörlerinin;

- Basınca dayanıklı olmayan kutularda imal edilmesi
- Basınç tahliye mekanizmalarının yetersiz olması
- İç ısılarının etkin bir şekilde dış ortama aktarılamaması
- Daha yüksek anma güçlü ve daha küçük boyutlu ünitelerin imal edilememesi
- Akım taşıma kapasitelerinin sınırlı olması

- Korona boşalması başlama seviyelerinin düşük olması [14]
- Aktif kayıplar oluşturması beklenilenden daha yüksek olması
- Patlama ve yangın tehlikelerine karşı kalıcı bir düzeneğe sahip olmamaları
- $100 \times I_n$  'den yüksek darbe akımlarına dayanamamaları [4, 5]
- $1,5 \times I_n$  'den yüksek harmonikli RMS akımlarına dayanamamaları

gibi olumsuzlukları içermesi Avrupa ülkeleri, ABD, Japonya ve benzeri gelişmiş ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de aşırı basınç düzenekli, düşük kayıplı ve boyutlu ve daha uzun ömürlü güç kondansatörlerinin kullanılması zorunluluğuna yol açmaktadır [3].

Yukarıda belirtilen olumsuzluklara yönelik teknik önlemlerin yanı sıra, bu olumsuzluklara yol açan nedenlerin azaltılmasına yönelik uygulamalara da ilerleyen bölümlerde değinilecektir.

#### **4.1 Temel Hammadde Genel Karakteristikleri**

##### **Dielektrik malzeme**

Selüloz esaslı dielektrikler ve plastik filmler teknoloji de en çok kullanılmakta olan dielektrik malzeme cinsleridir [3]. Ancak plastik filmlerin yüksek elektrik alanlarına dayanma üstünlükleri, yüksek yalıtım direnci ve çok düşük dielektrik kayıp faktörlerine sahip olmaları, ayrıca bunların reaktif güçlerde yüksek hacimsel etkinlik ve neme karşı selüloz esaslı dielektriklere göre tartışılmaz bir direnç göstermeleri nedeniyle günümüz kondansatör teknolojisi, kağıt dielektriği çok özel uygulamalar dışında tamamen terk etmiştir. Plastik film dielektrikler çok çeşitli olup bunlar arasında örnek olarak polyster, polikarbonat, polisulfon, polistren, polipropilen, polivinil klorür, polivinil florür, polietilen, polifenilen oksit gibi çeşitleri sayılabilir [3]. Plastik film dielektriklerin her birinin kullanıma ve uygulama sahaları farklıdır; ancak güç kondansatörlerinden istenen performansların hemen hemen tümünü yerine getiren tek malzeme polipropilen ve bunun iki boyutta yönlendirilmiş tipi, izotaktik polipropilendir.

Polipropilen, kayıpları çok düşük ve kendi kendini onarabilen plastik dielektrik bir malzemedir.  $1 \mu$  kalınlığının dayanma gerilimi  $111 \text{ V}$ 'tur; fakat yükleme gerilimi  $40 \text{ V}$  civarında tutulur. Polipropilen kondansatörlerin kayıpları emprenye tip

kondansatörlere göre % 90 düşüktür ve 0,5 Watt/kVAr mertebesindedir. Bir karşılaştırma yapmak gerekirse:

- Kağıt/Yağ dielektrik kayıpları 5 Watt/kVAr
- Kağıt/Askarel dielektrik kayıpları 3,5 Watt/kVAr
- Polipropilen/Kağıt/Askarel dielektrik kayıpları 1,7 Watt/kVAr

civarındadır [3].

Polipropilen film, yüksek vakum altında, buhar altındaki alüminyumun soğutulmuş olan polipropilen üzerinde yoğunlaştırılması ile elde edilir. Metalizasyon tesislerinde mekanik vakum pompaları ve bunlara seri bağlı yağlı vakum pompaları ile yaklaşık  $10^{-5}$  Torr'luk vakum altında seramik kuvezlerde buharlaştırılan alüminyum  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'da soğutulmuş polipropilen üzerinde yoğunlaştırılarak kaplama işlemi gerçekleştirilir.

Kaplanan malzeme gerilim altında istenilen ölçülerde kesilir. Gerilim altında kesilmesinin nedeni polipropilen filmin kendi kendini yenileme özelliğinden hareketle, kaplama esnasında oluşabilecek yalıtım bozukluklarını gidermektir [15, 16]

Noktasal delinmeler esnasında meydana gelen kıvılcım, çevredeki metalde buharlaşma oluşturarak yalıtımı yeniden sağlar; ancak buharlaşma çok küçük alanlarda olduğundan kondansatörün kapasitesi üzerinde herhangi bir değişiklik yaratmaz. Gerilim altında temizlenen ve istenilen ölçülerde kesilen polipropilen tam otomatik makinalarda istenilen kapasitede sarılır. Terminal elde edilmesi ve lehim yapılabilmesi amacıyla oksit-asetilen metal püskürtme sistemi kullanılarak bobin kenarları çinko ile kaplanır. Başarılı bir çinko püskürtme işlemi, kaliteli bir kondansatör üretimi için en önemli faktörlerden biridir; çünkü uzun süreli çalışmada en çok rastlanan arızalardan biri kondansatör elektrotları ile çinko püskürtme arasındaki bağlantının kesilmesidir. Bu durum özellikle sık sık devreye girip çıkan kondansatörlerde gözlenir ve nedeni de devreye giriş anında çekilen yüksek akımlardır.

Hiç şüphesiz güç kondansatörü imalat teknolojisinde sıvı dielektrikler büyük önem taşımaktadır. Bunlar, aktif dielektrik şeklinde kullanıldıkları zaman kondansatörün anma gerilim zorlanmaları artar. Kısmi boşalma ve korona boşalmalarının başladığı ve bittiği gerilim seviyeleri yükselir. Kenar elektrostatik alan şiddetleri azalır, katı



dielektrik malzemenin delinme gerilimi seviyesi yükselir, ayrıca ısı yayımı kolaylaşarak aşırı ısınma önlenir.

Selülozun, kristalize veya serbest durumda nem içermesi, birim alan başına iletken parçacıkların varlığı ve özellikle bu dielektriğin gözenekli ve lifli bir yapı göstermesi, sıvı dielektrikleri kâğıtlı kondansatörler için kullanılması kaçınılmaz duruma getirmiştir. Plastik filmler için durum aynı değildir zira bunların elektriksel ve yapısal özellikleri kâğıt dielektriğe göre çok üstün ve farklıdır. Belirli bir yöntemle elektrot yüzeylerinin polipropilen dielektrikle sıkı teması sağlanmış olan kondansatörlerde ayrıca sıvı dielektrik kullanımına kesinlikle ihtiyaç duyulmadığı saptanmıştır. Özetle sıvı dielektrikler gerek yalnız kâğıtlı, gerekse yalnız polipropilen filmler veya karma yalıtkanlı güç kondansatörlerinin, elektroteknik yönden performanslarını artırır [17]. Sıvı dielektrikler de günümüzde yoğun bir araştırma konusudur. Üstün özellikleri haiz poliklorbifenil yani PCB yağının ekolojik nedenler yüzünden, Amerika, Japonya ve Avrupa'da yasaklanması sonucunda yeni yeni yağlar geliştirilmiş olup bu alanda çok büyük adımlar atılmıştır. Bunlar aromatik bileşikler, ftalat esterler, feniller, sentetik hidrokarbonlar, mineral yağlar, alkil, benzen v.s. gibi kimyasal yapılarda olup Hatcol, Hyshinol, Suresol, Dielectrol, Gecenol, PxE v.s. gibi ticari isimlerle karşımıza çıkmaktadır. Sıvı dielektriğin aktif dielektrik olarak kullanılmasının anlamı sıvının elektrot-dielektrik yapısının ayrılmaz bir parçasını oluşturması ve bunun homojen olarak elektrotlar arasında tüm boşluk hacimlerini doldurmasıdır. Vakum ve empenye etme işlemi sonucunda gerçekleştirilen bu husus, gerektiği gibi yapılmadığı takdirde zararı, yararından büyük olur. Özellikle katı dielektrik olarak yalnız plastik filmin kullanıldığı kondansatörlerde tümüyle bir empenye işleminin sağlanması, filmlerin yapıları nedeniyle oldukça zordur. Bu amaçla güç kondansatörü endüstrisinde son yıllarda pürtük yüzeyli polipropilen filmler, kanallı alüminyum folyolar ve yüksek dispersiyon (dağınım) özellikleri olan sıvı dielektrikler geliştirilmiştir. Bir güç kondansatörü tasarımı yapılırken kullanılacak olan sıvı dielektriğin cinsi de tasarıma uygun şekilde seçilmelidir [3]. Bir tek yağ her türlü güç kondansatör tasarımının ortak faktörü olamaz.

Günümüz teknolojisinde AG güç kondansatörlerinin üretimlerinde Tablo 4.1'de belirtilen temel hammaddeler kullanılmaktadır [7, 11, 18-23]

**Tablo 4.1:** Temel Hammadde Özellikleri

<i>Aktif Dielektrik</i>	Biaxially Oriented Polypropylene Film (BOPP) [20]
<i>İç Elektrotlar</i>	Yüksek vakum ve ısı altında buharlaştırılmış ve dielektrik malzeme kaplanmış alüminyum, çinko veya bunların belli orandaki alaşımları.
<i>Dış Elektrotlar</i>	Belirli bir mikronize boyutlu olarak püskürtülmüş çinko veya çinko alüminyum alaşımları
<i>Sıvı Dielektrik</i>	Çeşitli bitkisel yağlar (castoroil (hint yağı), ricin-oil, PCB, PXE, M-Oil v.s) [21-23]
<i>Katı Dielektrik</i>	Çeşitli poliüretan bazlı reçineler
<i>İletkenler</i>	Genellikle elektronik bakır
<i>İç kap</i>	Plastik tüpler veya dielektrik kağıt veya presbantlar
<i>Dış kap</i>	Alüminyum tüp

*Aktif dielektrik* ile *iç elektrotlar* tek bir malzeme olarak üretilmekte olup buna Metalize Polipropilen Film (MPPF) denilir.

MPPF'in ideal olabilmesi aşağıdaki ek özellikleri barındırması gerekir.

- Özel bir iç elektrot kaplama direnci (kalınlığı) ve geometrisi
- Birim kapasite değeri için daha yüksek bir akım geçiş düzeyi.
- Birim aktif dielektrik hacim başına izafi olarak daha düşük iletken parçacık sayısı
- Baz polipropilen filmin yüksek kalite de olması
- Bağlı olarak daha ince kalınlıktaki PP film

Metalize polipropilen film (MPPF)'in üstünlükleri şu şekilde sıralanabilir:

1. Kendi kendini onarma (Otorejeneratif) özelliği [3]
2. Kalıcı kısa devrelere girmeme özelliği
3. Film ve folyo gibi klasik tasarımlarda vahim sonuçlar oluşturabilen olayların metalize filmler tasarımlarda daha önceden bertaraf edilmeleri özelliği
4. Dielektrik malzemenin, klasik tasarımlara göre daha yüksek gerilim seviyelerine dayanma özelliği
5. Homojen akım dağılımı özelliği ve bunun sonucu olarak elektrot kayıplarının en düşük seviyeye ulaşması
6. Element aktif kayıpların polipropilen ile mümkün olan en düşük seviyeye ulaşması (0,1-0,2 W/kVAr)

## Dış elektrotlar

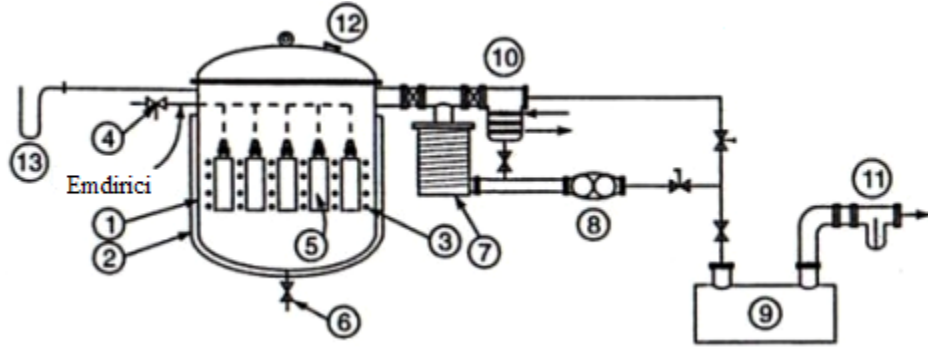
Bu malzeme genellikle Zn/X metal alaşımı telleri şeklinde olup, ideal de; uygun mikronize parçacık halinde püskürtülebilmeleri, saflık dereceleri ve iç elektrotlar ile oluşturacağı uygun özellikteki temas direnci değeri ile sağlıklı bir tel lehimi yapılabilmesi beklenir.

## Sıvı dielektrik

Sıvı dielektriğin aşağıdaki özelliklere sahip olması beklenir [3].

- Çevre dostu olmalı
- Düşük bir viskoziteye sahip olmalı
- PP'ye göre mümkünse daha yüksek bir bağıl dielektrik katsayısına sahip olmalı
- PP malzemenin elektriksel, mekanik ve kimyasal özelliklerini bozmamalı.

## Katı dielektrik reçineler



Şekil 4.2: Reçine Dolum Sistemi

- |                          |                              |
|--------------------------|------------------------------|
| 1. Vakum tankı           | 8. Merkez pompası            |
| 2. Yalıtım plak kabı     | 9. İki aşamalı vakum pompası |
| 3. Isıtıcılar            | 10. Yoğunlaştırıcı           |
| 4. Emdirici kontrolü     | 11. Yağ/Buhar kapanı         |
| 5. Kondansatör üniteleri | 12. İnceleme kapağı          |
| 6. Drenaj                | 13. Vakum ölçer              |
| 7. Yayılım pompası       |                              |

Poliüretan bazlı ve exotermik bir reaksiyon sonucunda Şekil 4.2'deki sistem de görülen süreç sonucu katılaştıran bu malzeme elektrik ve ısı kaybı açısından, sıvı dielektrikten daha uygun olabilmektedir [7]. Sıvı yağ ihtiva eden kondansatörlerin seri üretimlerinde hermetikliğin (yağın kondansatör dış muhafazasının dışına sızması) sağlanamaması veya bu sorunun açılması, yüksek maliyetlere baliğ olması ve ayrıca sürekli elektrostatik kuvvetlerin oluşturacağı titreşimleri zayıflatma

özelliği, katı dielektrik malzemeye göre nispeten daha düşük olması nedenleri ile katı dielektrik reçineler de kullanılabilir [18]. Şekil 4.3’de kondansatör üretiminde katı dielektrik reçinenin üretim aşamasında gaz arıtma, emdirme ve vakum işlemlerine maruz bırakılarak kondansatör ünitelerine işlendiği bir fabrika uygulaması gösterilmiştir.



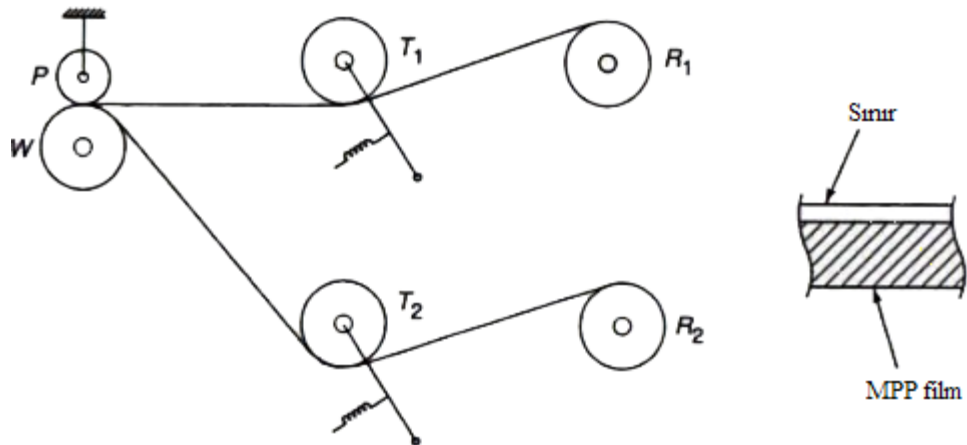
Şekil 4.3: Reçine Dolum Sistemine Sahip Bir Tesis Uygulaması

## 4.2 Temel Üretim Süreçleri

### 4.2.1 Sarım

Başarılı bir sarım işlemi üç ana faktöre bağlıdır.

- Uygun bir sarım makinası (Şekil 4.5)
- Uygun MPP malzemesi
- Uygun sarım tekniği



Şekil 4.4: Sarım Makinasının Şematik Diyagramı [7]

Sarım mekiği, kondansatör elementlerinin üstünde sarıldıkları plastik nüvelerdir. Bu nüveler, uygun çap ve boyda, silindrsel yapıda olup, homojen ve son derece düzgün yapılı ve kesinlikle mikroskobik yapıda sivri noktalar ihtiva etmemelidir. Ayrıca, nüve çapları ile et kalınlıkları, mekanik açıdan sağlam ve sıkı bir sarım yapılmasına ihtimal vermelidir. Buna ilave olarak nüve çapları, ortalama ısı kaybı yolunu kısaltacak şekilde seçilmelidir. 9 ile 20 mm arasındaki çaplar genelde uygundur [3].

İkinci bölümde verilen (2.4) formülü genişletilirse,

$$C = (\epsilon \times L \times l) / d \quad (4.1)$$

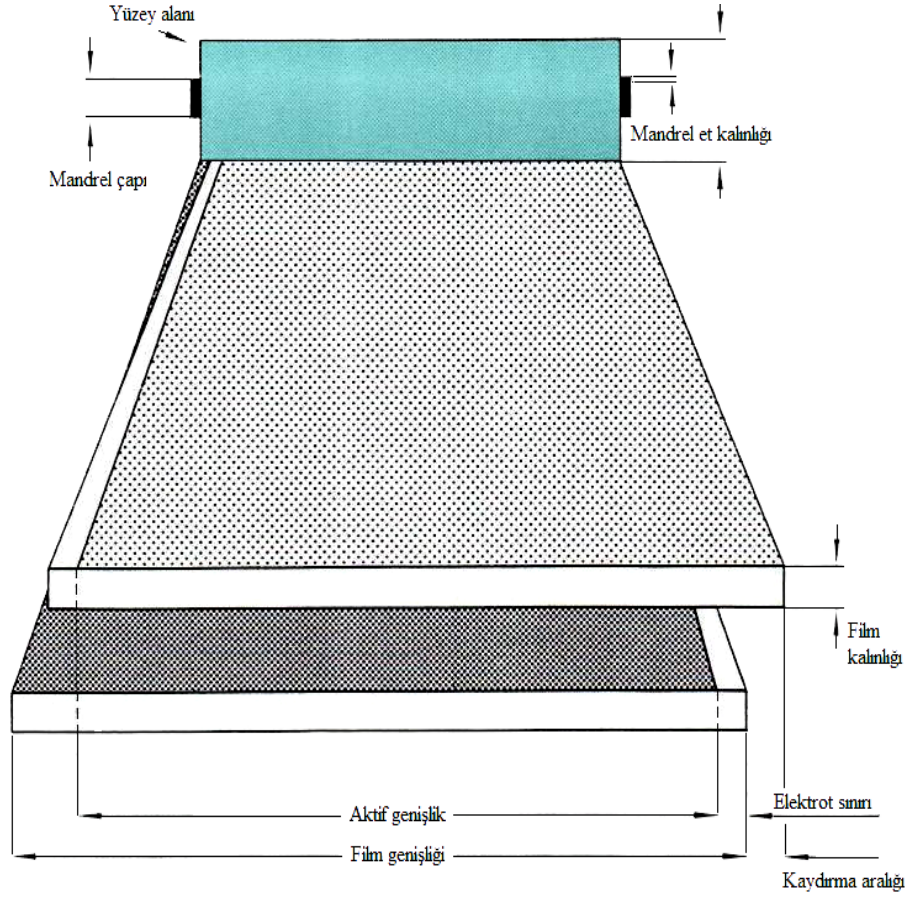
elde edilir. Burada  $L$  film genişliğini,  $l$  aktif genişliği,  $d$  dielektrik film kalınlığını;  $\epsilon$  yalıtkan ortamın dielektrik sabitini ifade eder.



**Şekil 4.5:** Tipik Bir Sarım Makinası

### **Sarım işlemi**

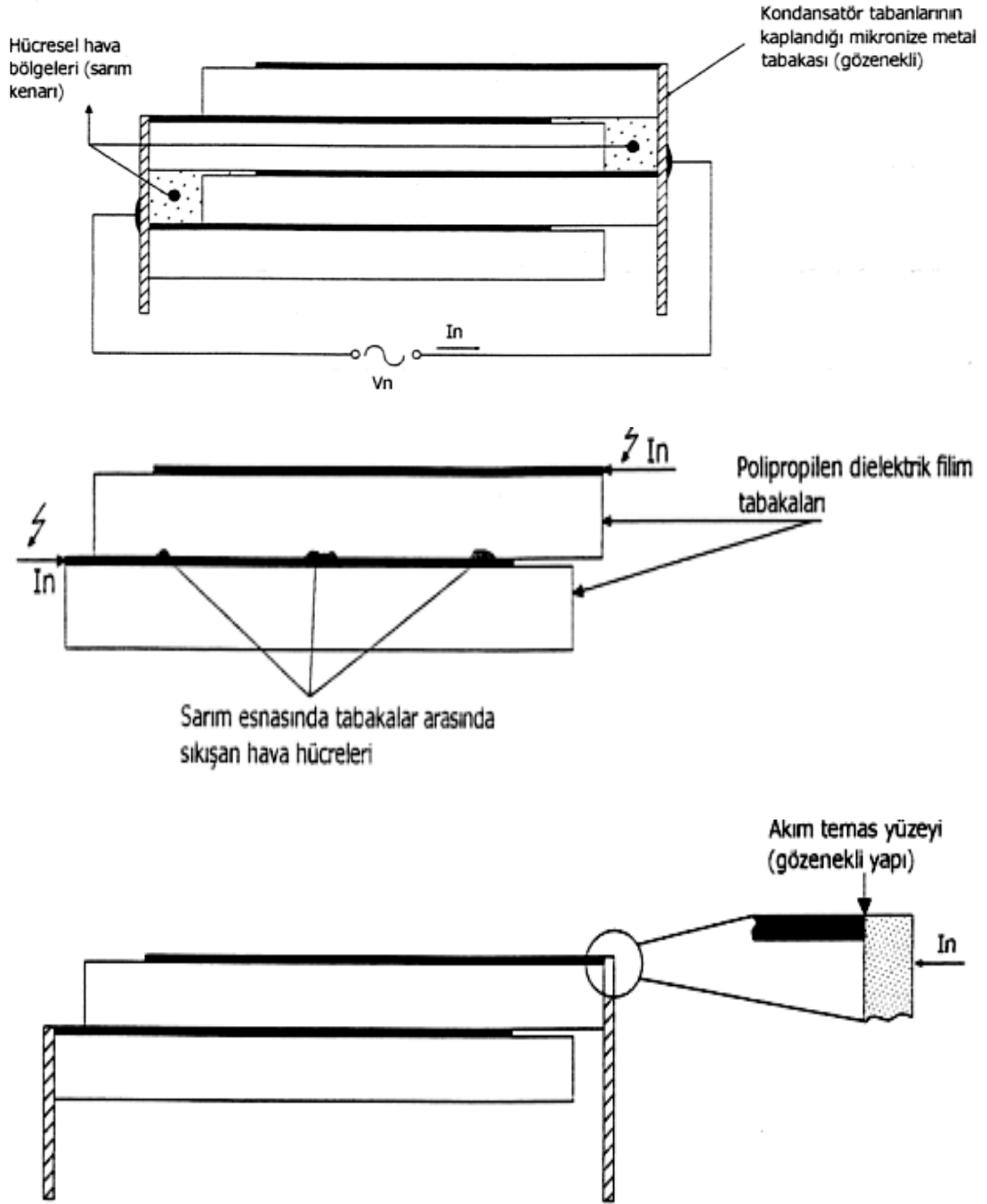
Düşük boyutlu kondansatörler, düşük aktif hacimli elementlerin kullanımını gerektirir ve (4.1) formülüne göre bu şart; ancak ince dielektrik malzemelerle mümkündür. Bu yüzden kullanılacak sarım makinası, çok ince dielektrik kalınlıklardaki filmlerin homojen, düzgün ve uygun bir çekme kuvveti ile sarım işlemini yapabilmelidir (Şekil 4.4).



**Şekil 4.6:** Kondansatör Bobini Yatay Görünümü

İnce filmler kullanıldığında yine (4.1) formülüne göre belirli bir  $C$  değerine sahip kondansatör elementinin aktif  $l$  genişliği azalır. Bu durum, anma akımının geçiş yüzeyini ciddi oranda azaltarak, yüksek akım yoğunluğuna yol açar ve kondansatörlerin aşırı ısınmalarına, ömürlerinin azalmasına sebep olur. Aktif uzunluğun yükseltilmesi ve daha dar filmlerin kullanılması ile bu sorun kısmen aşılabılır (Şekil 4.6).

Yüksek darbe akımları ve yüksek RMS akımlarına dayanan kondansatör elementlerinin sarılabilmesi için elementlerin eşdeğer seri dirençlerinin ciddi oranda düşürülmesi gerekir. Bu yüzden Şekil 4.7’de de görülebilen sarım modellerinde, sarım esnasında dielektrik tabakalar arasında en az 0,9 mm, en çok 1,3 mm’lik bir kaydırmanın yapılması ve bu kayma miktarının tüm sarım esnasında sabit kalması istenir. Sarım makinalarında söz konusu kayma miktarı, sarım başlangıcında elle ayarlanabildiği gibi, daha gelişmiş makinalarda bu ayarı her an kontrol ve kumanda eden mikroişlemcili bir otomatik sistem bulunmaktadır.



Şekil 4.7: MPP Film Temas Yüzeyleri

### Sarım tekniği

Amaç her zaman en küçük hacimde mümkün olabilecek en büyük kapasiteyi elde edebilmektir.

İlk bakışta bu amaca ulaşmak için çok ince ve çok yüksek bağıl dielektrik sabiti olan yalıtkan gerektiği sonucuna varılabilir. Ne var ki bu yönde alabildiğince gitmek mümkün değildir; Çünkü,

- Yalıtkanın inceliği uygulanacak gerilimle sınırlıdır.
- Dielektrik sabitinin yüksekliği ise yüksek kayıplar gibi hiç arzulanmayacak bir kusuru beraberinde getirecektir.

Dolayısıyla hem küçük boyutlu, hem gerilim dayanıklılığı yüksek, hem de kapasitesi büyük ve kayıpları az bir kondansatör elde etmek; ancak yüzey dielektrik sabiti ve kalınlık arasındaki bir optimuma varmakla mümkün olacaktır. Bu özellikler ise Tablo 4.2'de görüldüğü gibi yalıtkan cinsine bağlı olmaktadır.

**Tablo 4.2:** Yalıtkan Cinsine Göre Elektriksel Değerler

Yalıtkan	$\epsilon_r$	$\tan\delta$ ( $\times 10^{-3}$ )	Ortalama Çalışma Gerilimi (V/ $\mu$ )
Kağıt	5,9	2,8-3,2	20-25
Polipropilen	2,2	0,4	38-42

Görüldüğü gibi her iki yalıtkanın da önemli özellikleri vardır. Hem kayıplarının az olması, hem de daha ince kullanılabilmesi açısından polipropilen daha avantajlı gözüküyorsa da, kâğıt da gerek emprenye edilerek kararlılık kazanabilmesi, gerekse yüksek dielektrik sabiti sebebiyle küçümsenmeyecek bir yalıtmandır. En büyük dezavantajı ise kayıplarının yüksek olmasıdır. Emprenye edilemediği için havayla ilişkisi kesilmesi şart olan polipropilenin bu dezavantajının giderilmesi de ancak karma yalıtkan tekniği ile mümkündür. Bu tekniğin tartışılmaz en büyük özelliği kayıplarının kâğıda göre çok az olmasına karşılık en az o kadar kararlı olmasıdır. Örneğin aynı kalınlıkta bir polipropilen ve bir de kâğıt tabaka yalıtkan olarak kullanıldığında  $\epsilon_r = 3,3$ ,  $\tan\delta = 7.10^{-4}$  olacaktır. Böylece karma yalıtkan kullanmanın yalnızca polipropilen kullanmaya karşı faydaları gözlenmektedir [3].

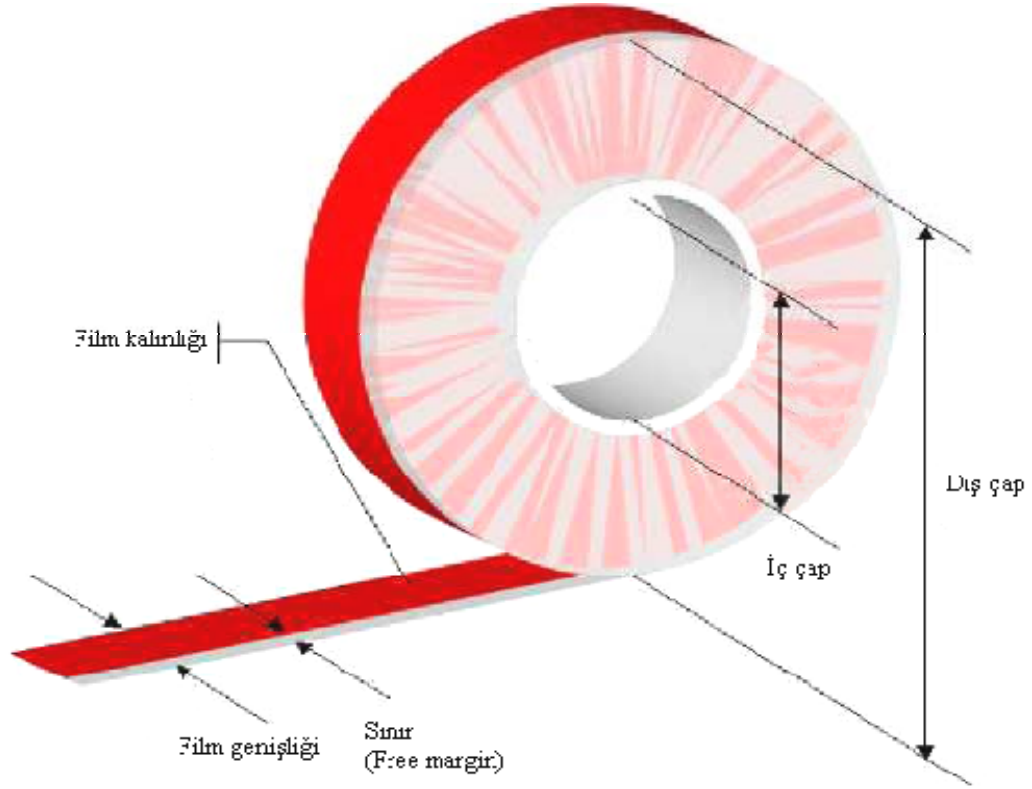
### Sarım tipleri

#### 1. Metalize sarımlar

Bu tiplerde sarımı oluşturan yalıtkan aynı zamanda üzerine metallenmiş iletkeni de (Aluminyum, çinko veya kalay) taşımaktadır. Şekil 4.8'de metalize sarımların üç boyutlu (3D) görünümü gösterilmiştir [16]. Malzeme cinsine göre de sarımları metalize kâğıt, polipropilen, polycarbonat, polietilen terafitalat v.s. diye ayırmakta mümkündür. Temel özelliklerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.



- Kendi kendini onarır, ancak bu onarma işlemi esnasında çok az da olsa değer kaybeder. Kendi kendini onarma, yani kısa devre olduktan sonra çalışmaya devam edebilme özelliğinden dolayı yalıtkan ince tutulabilir.
- Ucuzdur.
- Endüktif etkisi yok edildiğinden kontaktörlere zarar verirler.
- Orta ve yüksek gerilimde kullanılamazlar; çünkü kendi kendini onarma yalıtıma neden olur.



**Şekil 4.8:** Metalize Sarımların Üç Boyutlu (3D) Görünümü

## 2. Metal iletkenli sarımlar

Geleneksel sarım tipi olan bu sarımlarda metal iletkenler ve arasındaki yalıtkanlar ayrı ayrı sarılırlar (Şekil 4.9). İletken malzeme olarak 5-7  $\mu$  kalınlığında alüminyum folyo, yalıtkan olarak ise yapılan sarımın cinsine göre yalnızca kağıt, kağıt ve polipropilen yani karma yalıtkan ve yalnızca polipropilen kullanmak mümkündür.

Metal iletkenli sarımların değer kararlılığı yüksektir; ancak kısa devre olması halinde etrafına zarar vermemesi için iletken olarak sigorta teli kullanılarak sigortalanabilir. Orta ve yüksek gerilimde, özellikle karma yalıtkan olarak kullanılırlar. Gerilimin aşırı yükselebildiği çevrelerde alçak gerilimde de tercih edilmelidirler.



**Şekil 4.9:** Metal İletkenli Sarımlar

#### **4.2.2 Metal Püskürtme (Dış Elektrotların Oluşturulması)**

Bu işlem, kondansatör elementinin dış elektrot yüzeylerinin oluşturulması ve terminallere bağlanacak olan iletkenlerin bu yüzeylere lehimlenmesi için yapılmaktadır (Şekil 4.10).

Metal püskürtme işleminin başarılı olması iki ana faktöre bağlıdır.

- Metal sprey teli alaşımının saflığı
- Uygun bir metal püskürtme sistemi

Bu sistem esas olarak; sprey kabini, homojen püskürtme düzeneği ve akım/gerilim ayarlı bir mikronize metal püskürtme makinasından oluşmaktadır. Genel bir yaklaşım olarak, ortalama parçacık çapları MPP kalınlığını geçmemelidir; çünkü dış elektrot ile iç elektrot arasında mümkün olan en düşük bir temas direnci oluşturulmalıdır; ancak buna karşılık parçacıkların arzu edilen ortalama çapın çok altında kalması emprenye etme işlemi sırasında dielektrik yağın kondansatör elementlerine nüfus etmesini zorlaştıracaktır.



**Şekil 4.10:** Kondansatör Bobini Üzerine Metal Püskürtme İşlemi

Püskürtme işlemi iki etapta yapılmalıdır; birinci etapta ki amaç, iç ve dış elektrotlar arasında düşük dirençli bir temas sağlanacak şekilde ince bir tabaka oluşturmak; ikinci etaptaki amaç ise PP malzemeye zarar vermeyecek ve sağlıklı bir iletken tel lehimini sağlayacak olan, nispeten daha kalın tabaka oluşturmak. Her iki tabakanın kalınlığı, kondansatör elementinin çapı boyunca ve tüm üretimlerde homojen kalmalıdır. Bu yüzden robotik bir püskürtme düzeneği ile daha sağlıklı sonuçlar elde edilebilmektedir.

#### 4.2.3 Emprenye Etme

Bu sürecin amaçları özetle şu şekilde açıklanabilir:

1. Kondansatör elementlerinde termo-mekanik bir kararlılık sağlamak

MPP, baz PP ve metal tabakadan oluşan çift bileşenli bir malzemedir. Her iki bileşen farklı ısıl genleşme katsayılarına sahiptir ve bu yüzden, güç kondansatörlerinin çalışma esnasındaki ısınmaları nedeniyle bu bileşenler uygunsuz bir şekilde genleşecek ve birbirlerine zarar vererek arzu edilmeyen mekanik deformasyonlara yol açacak ki bu olay sonucunda ürünler tümüyle elektriksel hasarlara uğrayıp bozulmalarına sebep olabilecektir. Kondansatörler her kategorisi bir harfi takip eden bir rakamla belirtilmiş olarak sıcaklık kategorilerinde sınıflandırılır, kondansatörün çalışabileceği en düşük ortam hava sıcaklığı tercih edilen +5 °C, -5 °C, -25 °C, -40 °C, -50 °C bu beş değerden seçilmelidir. Bina içi kullanım için -5 °C'lık en düşük değer sınır olarak uygulanabilir. Tablo 4.3'de ise kondansatörün ortam hava sıcaklığını etkilemediği çalışma şartlarına göre yapılmıştır (Örneğin bina dışı tesisatlarda). Tablo 4.3'de kondansatörün çalışabileceği en düşük ortam hava sıcaklığı -25 °C olarak seçilmiştir [4, 18]. Üst sınırı aşan sıcaklık, dielektriğin elektro-kimyasal değerinin azalmasını hızlandırır.

Kondansatör elementleri çalışma sıcaklık sınıfı için 4 ayrı kategori tanımlanabilir.

**Tablo 4.3:** Güç Kondansatörleri İçin Sıcaklık Sınıfı Kategorileri

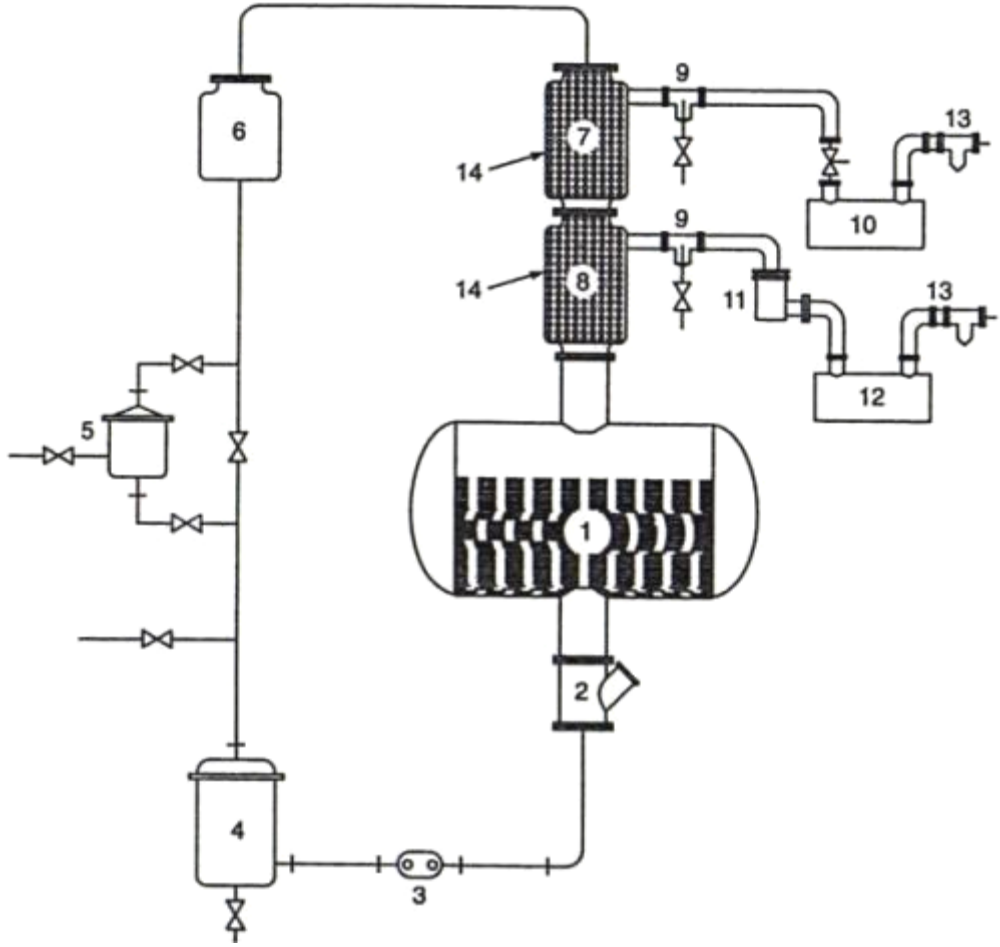
Kategori		Max	24 Saat	1 Yıl
-25/A	-25 + 40 °C	40	30	20
-25/B	-25 + 45 °C	45	35	25
-25/C	-25 + 50 °C	50	40	30
-25/D	-25 + 55 °C	55	45	35

C sembolü kondansatörler, tropikal şartlardaki uygulamaların çoğu için uygundur. Bununla birlikte bazı yerlerde ortam sıcaklığı D sembolü olabilecek biçimde bir kondansatör gerekebilir.

## 2. Dielektrik yağın kondansatör elementlerine nüfus etmesini sağlamak

MPP ile sarılmış kondansatör elementlerini oluşturan PP film tabakaları arasında sıkışıp kalan hava aralığı hiç arzu edilmeyen korona boşalmalarının başlangıç seviyelerini (PDIV) düşüreceği açıktır. Diğer taraftan PP tabakaları arasında sıkışan hava tabakasının son derece ince olması nedeniyle dielektrik yağın buralara nüfus etmesi nerdeyse mümkün değildir. Pratik olarak sıfır şeklinde kabul edilebilecek hava tabakası bir taraftan da PDIV bakımından olumlu bir durumdur; ancak buna karşılık sarım esnasında bölgesel olarak sıkışmış hava kabarcıklarının oluşması her zaman mümkündür ve hiçbir teknik yöntemle bu oluşum tespit edilemez. İşte bu nedenle kondansatör elementleri yüksek vakuma tabi tutulmakta ve olası hava kabarcıklarının tahliye edilmesi düşünülmektedir; ancak yağ empenyesi bu amaçla yapılmamaktadır.

Dielektrik yağ empranyasyonunun yapılma amacı kondansatör elementlerinin alt ve üst bölgelerinde fiziksel olarak mevcut olan ve genişlikleri, MPP kalınlığına eşit olan spiral hava kanallarını sıvı yağ ile doldurmaktır. Elektrostatik alan teorisinden de bilindiği üzere, elektrotların kenar bölgelerindeki alan dağılımı son derece bozuk ve düzensizdir ve dolayısıyla PDIV seviyeleri hiç arzu edilemeyecek derecede düşük ve dağınık olabilir. Söz konusu hava kanalları sıvı dielektrik yağla doldurulduğu takdirde alan şiddetleri  $\epsilon_{r(\text{hava})}/\epsilon_{r(\text{yağ})}$  oranında azaltılmış olacaktır ki buda PDIV seviyelerini aynı oranda yükseltecektir [3].



**Şekil 4.11:** Tipik Bir Vakumla Emprenye Etme Sistemi

- |                                       |                                      |
|---------------------------------------|--------------------------------------|
| 1. Yağ stok tankı                     | 8. Gaz giderme sütunu ikinci aşaması |
| 2. Süzgeç                             | 9. Yağ/Buhar kapalı                  |
| 3. Yağ sirkülasyon pompası            | 10&12. İki aşamalı vakum pompası     |
| 4. Disk biçimli kağıt filtre          | 11. Buhar yayılım pompası            |
| 5. Örnek çıkışı                       | 13. Yağ/Buhar kapalı                 |
| 6. Isıtıcı                            | 14. Dolgu malzemesi                  |
| 7. Gaz giderme sütunu birinci aşaması |                                      |

Vakum emprenyasyon sistemi süreci kısaca şöyle sıralanabilir (Şekil 4.11) [3, 7]:

1. Dielektrik yağın orijinal fiçiden yağ kazanına taşınması (yağ kazanı vakum altında iken)
2. Prototiplerin yağ kazanına yerleştirilmesi ve kaba vakum altında ısıtılması (ısı kararlılık)
3. Vakum kazanına yüksek vakum uygulanması (aynı anda sıcaklığın derecelendirilerek emprenye sıcaklığına düşürülmesi)
4. Yüksek vakum ve emprenye sıcaklığında vakum kazanına yağın nakledilmesi
5. Emprenye etme

6. Vakumun kesilmesi ve kazanın atmosfer basıncına ani geçişi
7. Vakum kazanının ortam sıcaklığına düşürülmesi
8. Prototiplerin kazandan çıkarılması
9. Vakum kazanındaki artık yağın, yağ kazanına nakli
10. Yağ kazanındaki artık yağın filtreli sirkülasyonu (yağın arıtılması)

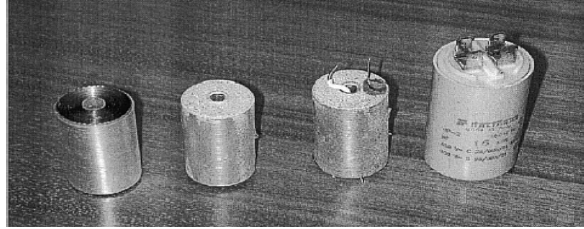
### 4.3 Süreç Kontrolü

Kondansatörlerin paralel bağlanmasıyla alçak gerilimde istenen güç elde edilene kadar bir batarya oluşturulur. Orta gerilimde elemanlar, gerilim yüksek olduğu için paralel ve sonra da seri bağlanarak bataryayı meydana getiriler. Bu bataryalar genelde topraklanabilir saç kutulara konurlar. Bu tür kondansatörler genellikle 400-525 V için 5-50 kVAr arasındaki değerlerdedir. Orta gerilim ve yüksek frekans kondansatörlerinde ise normal olarak 100 kVAr'e kadar çıkılır. Bundan sonraki büyüklüklerde kayıplardan oluşan ısınmanın önlenmesi için genellikle su ve hava yolu ile cebren soğutma uygulanır. Bu tür kondansatörlerin yapımı genellikle farklıdır.

400 V'luk bir kompanzasyon kondansatörü ünitesinin Şekil 4.12'de gösterilen bir bobini için üretim aşamaları ve TS EN 60831-1 ve 60831-2'ye göre kalite kontrolü aşağıdaki sırada yapılır [4, 5, 24].

1. Karma yalıtkan sarımı yapılır.
2. Sarımlar istenilen güce paketlenir.
3. Paketteki sarımlar düşük bir gerilimle basit bir kısa devre kontrolüne tabi tutulurlar.
4. Emprenye kazanlarında vakum altında kurutulur ve emprenye edilirler.
5. Emprenye edilmiş paketin sarımları tek tek 10 s süre ile  $4,3 \times U_N = 1720$  VDA ile kontrol edilirler.
6. Paket tellenir ve lehimlenir.

7. Kapasite ölçülür burada iki noktaya dikkat edilir.
  - Faz kapasitelerinin toplamının  $0 + \% 10$  arasında kalması gereklidir.
  - İki faz arası kapasite arasındaki fark en çok  $\% 8$  olmalıdır.
8. Kondansatör bataryasının kaybı ölçülür.
9. Paket saç kutusuna konur, kapağı kapatılır.
10. Faz uçları ile kutu arasına 10 s süre ile 3 kV/50 Hz'lik bir AA gerilimi uygulanır.
11. Kutu emprenye sıvı ile doldurulur, kapağı kaynatılır.
12. Boya etiketlenme gibi işlemler yapılır ve 7, 8 ve 10. maddelerdeki ölçmeler yani kapasite, kayıp ve güç-kap yalıtkanlık deneyi bir kez daha uygulanıp ünite mamul ambarına teslim edilir.



**Şekil 4.12:** Üretim Aşamaları

Soldan sağa doğru:

1. Mekik üzerine PP film sarılmış bobin
2. Taban bölgeleri çinko metal ile spreyleneş bobin
3. Bağlantı kabloları takılmış bobin
4. Dış muhafazası giydirilmiş ve temas direnci bağlanmış hazır kondansatör



**Şekil 4.13:** Kompanzasyon Ünitesi

Günümüzde tercih edilen Şekil 4.13'de görülen otomatik kompanzasyon sistemleri ile istenilen güç katsayısını elde etmek; ancak kondansatörleri birçok kere devreye

sokup çıkarmakla sağlanabilmektedir [2]. Bu yapılırken meydana gelen aşırı akım zorlamaları, kondansatörlere olduğu kadar kontaktörlere de zarar vermektedir. Bu sakıncayı gidermek için her ünite genellikle devreye seri bağlanmış bir akım sınırlayıcı ile korunmaktadır. Bunun anlamı şudur:

Tek fazlı tek bir modül 10/3 kVAr'lık bir ünitenin anma geriliminin maksimum değeri  $400 \times \sqrt{2} = 566$  V dur ve bu gerilimdeki kısa devre akımı 5160 A dir. Kullanılan sınırlama bobini ile bu değer 1360 A'e indirilmiştir. Bu sayede polipropilen malzemenin akım zorlamaları ile yalıtımın zaman içinde zarar görmesi engellenmiş olur.

Çinko püskürtme işlemi bitmiş ve gerekli temizlikleri yapılmış her bobin [4] ve [5]'in öngördüğü anma geriliminin 2,25 katı olan 860 V'ta 10 s süreyle denir. Gerilim deneyinden sağlam çıkan bobinler kapasite ve  $\tan\delta$  deneyi için ikinci kez denirler. Kutu kapakları, akım sınırlama bobinin terminaller arası boşalma direnci ve sigortayı kapsayacak şekilde önceden hazırlanır. Ayrıca kullanılan iç dirençlerle standartlar uyarınca devre ile bağlantısı kesilen bir kondansatörün 1 dakika içerisinde terminallerdeki gerilimin 50 V'un altına düşmesi sağlanabilmektedir. Batarya içerisindeki bir ünitenin boşalma direnci iş göremez duruma gelse bile o ünite, paralel olarak çalışan bir başka ünitenin boşalma direncini bara üzerinden kullanarak kendini boşaltabilir. Bu durum modüler ünite sisteminin bir üstünlüğüdür [18].

Kutu içine konulan sigorta, kondansatörü harici devre hatalarından çok, kondansatörün iç bünyesinde oluşabilecek aksaklıkların harici devreye zarar vermesini önlemek amacıyla konulur. Sigorta harici devreye seri bağlandığından bir iç arıza anında üniteyi harici devreden ayırır. Her ne kadar metalize polipropilen ile imal edilen kondansatörlerde kapasite kaybı olmadığı iddia edilirse de uzun süreli çalışmada çok az da olsa değer kaybı söz konusudur. Bunun böyle olduğu 1982 Mart ayında Yugoslavya'da IEC'nin düzenlediği güç kondansatörleri standartlarının değiştirilmesine yönelik toplantıda tüm dünya kondansatör üreticileri tarafından kabul edilmiştir [3]. Kapasitede meydana gelen küçük değer kayıplarının esas nedeni metalize elektrotların kenarındaki kısmi boşalmadır.

Kısmi boşalmayı minimuma indirmek için kapasite elemanlarının içine sızarak kenar bölgelerdeki boşluğu dolduran bir sıvı emprenye kullanılmaktadır. Bu dielektrik yağı kondansatör üniteleri 75 °C'da ısıtılır ve yağın bobin elemanlarının en ince



noktalarına kadar sızması sağlanır. Böylece kısmi boşalmalara minimuma indirilebildiği gibi kondansatörün ısı dengesi de sağlıklı bir şekilde sağlanmış olur. Kullanılan yağ yanmaz ve ekolojik olmalıdır; yani çevre kirliliği bakımından hiçbir sorun yaratmamalıdır; bunun yanında bitkisel kökenli olup kolay çözülebilir bir yağ olması da önemlidir [7]. Kullanılan yağın kondansatörlerin ömrü ile ne denli ilişkili olduğunun kanıtı olarak yapılan deneylerden örnek vermek yararlı olur. Literatür de uygulanan deney şudur: Önce yağ emdirilmemiş bir kondansatör 600 V DA ile doldurulur ve en kısa yoldan hiçbir sınırlayıcı kullanılmadan boşaltılır. Bu şartlarda 600 darbeden sonra kondansatörde tanδ bozulmaları başlamaktadır ve kısa bir süre sonra kondansatör kullanılmaz hale gelmektedir. Aynı deney uygun şekilde yağ emdirilmiş kondansatörlerde tekrarlandığında 4000 darbede bile en küçük bir tanδ değişmesi saptanmamıştır. İmalatın bu deney safhalarından sonra birbirleriyle paralel bağlanan bobinler salkım haline getirilir ve kapakları lehimlenir. Üniteler ortam sıcaklığına indikten sonra kapaklar contalanır ve kutular kapatılır. Üniteler bu sefer baş aşağı vaziyette 70 °C’da 4 saat süreyle bekletilir ve yağ kaçağı olup olmadığı saptanır. Sağlam kutulara seri numaraları basıldıktan sonra 10 dakika süreyle çalışma geriliminde denenirler. Bu deney sonucunda çektikleri akım ve ısınma olup olmadığı kontrol edilir. Bu deneyden de sağlam geçen ünitelerin kapasite ve tanδ’sı ölçülerek sicil kartlarına işlenir [3].

#### **4.4 Kalite Kontrolü**

##### **Üretim sırasında**

Üretim sırasındaki kontrol [4] ve [5]’e göre ve her ünite için tek tek yapılır.

##### **Laboratuvarda ve uygulamada**

Üretim zaman zaman daha itinalı kontrolü amacıyla üretilen ünitelerden numuneler alınır ve çeşitli deneylere tabi tutulurlar. Burada öncelikle üretim esnasındaki ölçmeler tekrarlanır ve sonuçlar karşılaştırılır.

Daha sonra ise öngörülen en yüksek çevre sıcaklığında, anma gerilimin 1,2 katında 500 saatlik bir ömür deneyi yapılır. Sonra kapasite ve kayıplar yeniden ölçülür, İyonizasyonun varlığı saptanmaya çalışılır. Aynı şekilde yeni tipler şebekeye bağlanıp ısınma ve diğer özellikleri açısından altı ay kadar kontrol edilirler.

## **Kullanıcı kontrolü**

Kullanıcı çalışma sırasında bazı ölçümler yaparak kompanzasyonun tam olup olmadığını anlayabilir, kondansatörün durumunu tespit edebilir.

İhtiyaç duyduğu aletler şunlar olabilir:

*Pensampermetre, voltmetre:* Kondansatörün uçlarında yapacağı ölçme ile

$$Q = \frac{U \cdot I}{\sqrt{3}} \quad (4.2)$$

formülünden güç kaybı olup olmadığı anlaşılır.

*Kapasitemetre:* Kondansatör üniteleri devreden çıkarılır, boşaltılır, kapasite değerleri ölçülür. Örneğin üçgen bağlı ise:

$$Q = U^2 \cdot \omega \cdot \frac{C_1 + C_2 + C_3}{2} \quad (4.3)$$

formülünden güç kaybı olup olmadığı anlaşılabilir.

*Termometre:* Kondansatör cidarlarında ısı ölçülür, normal olarak kaybı nedeniyle ısınan bir kondansatör çevre ısısının da etkisiyle ışıyım yoluyla atmadığı ısı nedeniyle 65-70 °C'a hatta bazen kısa bir süre için 85 °C'a kadar artan gerilimlerde ısınabilir. Bunun dışındaki ısınmalar tehlikelidir ve bataryaları patlamaya götürebilirler.

*Meger:* Sigorta atma hallerinde kondansatörün uçları ile gövdesi arasında kısa devre olup olmadığı tespit edilebilir.

*Mikronize toz metal püskürtme sistemi:* Uygun mikronize boyutta metal tozu püskürterek temas direncini azaltıp kondansatörlerin aktif kayıplarının en az %50 azaltarak ısınmalarını en düşük seviyelere düşürmek için kullanılabilir.

*Vakum sistemi:* Sıvı dielektrik yağını kondansatör elementlerinin iç yapılarına nüfuz ettirerek korona seviyesini düşürmek için kullanılabilir.

*Sarf malzemeleri:* Prototiplerin oluşturulmasında kullanılacak sarf malzemeleri şunlardır: Poliüretan reçine, alüminyum tüp, sarım mekikleri, plastik iç tüp, çok telli yalıtımlı kablo, lehim teli, çıkış terminal takımı, vida, cıvata, reçine hızlandırıcısı,

sıvı dielektrik yağ, saç kapak, klemens, plastik merkezleme, punto perçini, klemens barası, amortisör yayı.

#### 4.5 Malzeme Seçimi

Kondansatör kutuları ve kapakları kalıplanmış tutuşmaz poliamid 6'dan yapılmalıdır. Mekaniki mukavemeti çok yüksek olan bu plastik, 175 °C'a kadar herhangi bir şekil deformasyonu göstermez [3].

Kullanılan malzemelere göre halen güç kondansatör imalatında dört ayrı teknoloji uygulanmaktadır.

1. Sade kağıt + Askarel (Saf kağıtlı emprenyeli teknoloji)
2. Karma dielektrik yani düz PP film + Kağıt+Askarel teknolojisi
3. Metalize polypropylene film + Ek olarak epoksi veya poliüretan reçineli veya bitkisel yağlı (Emprenyesiz)
4. %100 pürtüklü PP film + Kutupsuz sıvılı teknoloji (Emprenyeli)

Film kalınlığının toleransı %3'tür. Mikron başına düşen dayanma gerilimi 50 V/ $\mu$  değerinin altına düştükçe filmin dayanıklılığı artar. Belirlenen dönme sayısı  $\pm$ % 1'lik hassasiyet ile sarım gerçekleştirilir.

Pratikte metalizasyonsuz film kalınlığı 20 mikron, dönme sayısı dakikada 20 turdur. Deneyimler sonucunda görüşmüştür ki, silindir şeklinde imal edilen kondansatör elemanlarının çapları, yaklaşık boylarına eşit olacak şekilde seçilir. Mesela film genişliği, 125 mm yerine film genişli, 60 mm seçilirse 10-12,5 kVAr'lık ünitelerde 6 eleman (125 mm film genişliğinde 3 eleman) kullanılmaktadır. Dolayısıyla film genişliği 125 mm ye göre taban kontak yüzeyinden çekilen akım yarı değerine düşürülmüştür; ancak iki katı çinko, kablo ve lehim, üç katı işçilik kullanmayı gerektirmektedir.

Bu uygulama kondansatör ömrünün iki katına çıkarmakta, ısınma da akımın karesiyle doğru orantılı olduğu için, 1/4'üne düşürmekte sonuç olarak daha sıcak ortamlarda çalışabilen kondansatör imal edilmektedir.

Yaklaşık 400 V'a kadar olan gerilim bölgesinde kondansatörler gayet ekonomik bir şekilde imal edilebilir. Bu bölge içinde her bir kVAr için gerekli hacim sabittir. Daha

yüksek gerilimlerde bu hacim değeri daha küçüktür; zira alçak gerilimlerde dielektrik tabakanın kalınlığı, mekanik dayanma bakımından belirli bir değerin altına düşmez.

Yüksek gerilimlerde ekseriye 1,15 kV'luk kondansatörlerden bir kaç seri bağlanır. Bu takdirde kondansatör levhaları ile madeni kap arasında yüksek gerilimlerin meydana gelmemesi için ambalajlar birbirlerine ve toprağa karşı izolatörler yardımı ile yalıtılırlar. Böylece 110 kV'dan daha yüksek gerilimler için kondansatör bataryaları oluşturulabilir.

Normalize gerilim kademeleri, alçak gerilimde 230, 400, 525 ve 600 voltur. Orta gerilim kademeleri ise 3.3, 6.6, 10.5, 15.75 ve 30 kV dur. Kondansatörler devamlı olarak bu gerilimlerin %10 fazlasına ve bir günde 6 saat süre ile % 15 fazlasına bağlanabilirler. Bu taktirde güçleri, normal güce göre % 21 veya % 32 oranında arttırılmış olur.

Kondansatörler ekseriya bina içerisine yerleştirilirler; bu gibi kondansatörlere dahili tip kondansatörler denir. Yüksek gerilim tesislerinde bunlar açık havaya da tesis edilebilirler.

Kondansatörlerin ömürleri sıcaklık derecelerine çok bağımlıdır. İç tesislerde kullanılan kondansatörler, normal olarak -10 °C ile +35 °C arasındaki sıcaklıklarda kullanılacak şekilde yapılırlar. Eğer kendi kendini soğuma şartları gerçekleşmezse ve kondansatörlerin yerleştirildikleri yerde sıcaklık çok yükselirse, bu durumda özel havalandırma yapılır [3, 18]

## **4.6 Üretim Teknolojileri**

### **4.6.1 PPM/MKP Teknolojisi**

MKP tipi, saf polipropilen folyo ile şekillendirilmiş düşük güç kayıplı dielektrikten oluşur. Çinko metalize film, polipropilen filmin vakum altında çinko buharına tutulması ile elde edilmesi kondansatörün uzun çalışma ömrünü garanti eder. Kondansatör elemanları vakumda kurutulur, kondansatör kasasına yerleştirdikten sonra, yapışkan poliüretan reçine (temel olarak hint yağı içerir) veya kuru yalıtım gazı konulur.

## **MKP teknolojisinin avantajları**

Basit yapı teknolojisinin bir sonucu olarak, MKP kondansatörleri daha az malzeme kullanılarak düşük maliyetle üretilir, bunun sonucu olarak kullanıcı daha az ücret öder. Daha kalın dielektriğe sahip olmasına rağmen, MKP kondansatörleri genelde benzerlerinden daha küçük yapıdadır. MKP kondansatörleri, özel yüksek kapasite ve yüksek AA yük kapasitesine sahiptir.

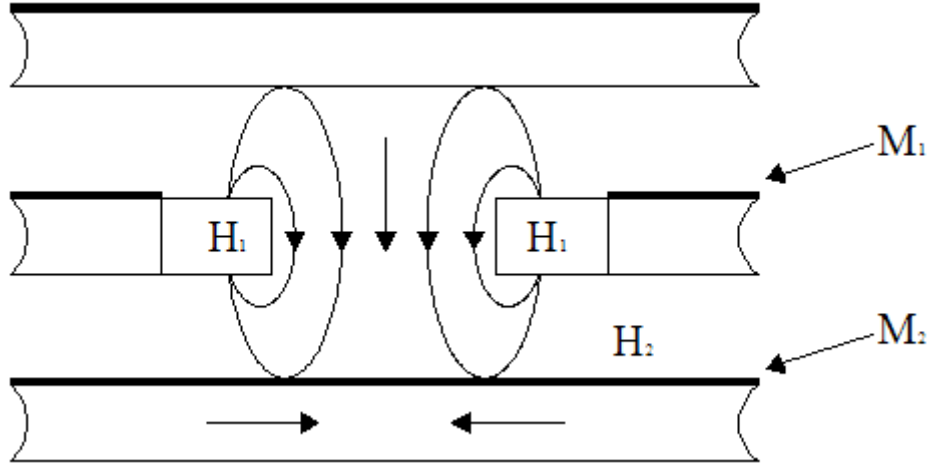
Yukarıda belirtilen yapı ve yüksek kalitede malzeme kullanılması sayesinde güvenilirlik ve uzun kullanım ömrü garanti edilir. Ayrıca küçük boyutları sayesinde kompanzasyon panolarında daha az yer kaplar.

MKP tipi kondansatörler, alçak gerilim şalt tesislerinde ani gerilim sonucu oluşan delinmeleri kendi kendine onarır. Delinme sırasında ortaya çıkan arklar metal tabakayı eritir ve bu arklar yalıtkan içerisindeki delinen kısmı da ayırır. Böylece kondansatör tam gerilim dayanımına ulaşarak problemsiz bir şekilde çalışmaya devam edebilir. Bundan dolayı oluşacak kapasite kaybı ihmal edilebilecek kadar azdır [18]. Genel bir tanımlama olarak standart yaşam serisi kondansatör teknolojisi PPM/MKP ile uzun yaşam serisi kondansatör teknolojisi ise PPMh/MKPh ile ifade edilir.

### **4.6.2 Kendi Kendini Yenileme Olayı (Otojenereasyon)**

Kendi kendini yenileme olayı, dielektrik malzemenin yapısı içerisinde, kısa devreye yol açan herhangi bir olayın sonucunda oluşan ısıl enerjinin, Joule olayı neticesinde, çok ince olan (0,01  $\mu\text{m}$ ) alüminyum veya çinko tabakasını buharlaştırmasıdır. Bunun sonucunda metre karenin ortalama milyonda biri kadar bir yüzeyde metalizasyon tabakası yerini yalıtkan bir tabakaya terk eder. Bu olay 0,5 ile 5 mikro saniyelik bir zaman içerisinde gerçekleşir ve bu süre içerisinde, kaba tabiriyle, “baygınlık” geçiren dielektrik malzeme tekrar eski durumuna döner ve böylelikle element, olayın başlangıç anındaki teknik boyutlarına yeniden kavuşur [3]. Burada bazı yanlış yorumlar yapılmakta ve metalize filmle yapılan kondansatörlere “kapasite kaybediyor” iması yapılmaktadır. Kendi kendini yenileme olayı bir kapasite kaybı ile sonuçlanır; ancak imalat teknolojisi, uygun şekilde seçildiği takdirde, yani elementin ısıl kararlılığı kendi başını alıp da gitmediği, element geometrisi ve sarım tekniği uygun şekilde yapıldığı ve kısmi boşalmaların başlama seviyeleri, elementin anma geriliminin çok üstüne çıkarıldığı takdirde, bu kayıplar yüzde sıfır virgüllü

rakamlarla sonuçlanır. Aksi takdirde bu olay yüzde 10 veya çok daha yüksek kapasitif kayıplara yol açar. Özetle kapasite kaybına neden olan olay, filmin cinsi ve kalitesinden, metalizasyon yüzeyi, elementin mikrofarağ değeri, boyutları, sarımı, sıcaklık değeri v.s. gibi birçok faktörün ayrı ayrı veya birleşik kombinezonlarından kaynaklanır [25-27]



**Şekil 4.14:** Kendi Kendini Yenileme Olayı (Otojenerasyon)

$M_1, M_2$ : Metal tortu tabakaları

$H_1, H_2$ : Yalıtkan dielektrik tabakaları

Kendi kendini yenileme olayı 1954'lerden beri araştırılan bir konudur (Şekil 4.14) [7]. Fizikçi Strab ve Heywang metalize kâğıtlı kondansatörler üzerinde araştırma yapmışlar ve bunun sonucunda, kendini yenileme olayının bir kaç mikrosaniye içerisinde oluştuğu, bu sırada gerilim düşümünün 50 mV civarında olduğu ve meydana gelen yalıtkan yüzeyciklerin 0,1 ile 3 mm çapında olduklarını görmüşlerdir [3]. Bu deneyler, Fransız fizikçi Huraux tarafından da doğrulanmıştır. Fizikçi Klein ise bu olay sırasında, dielektrik malzemede oluşan kılcal kanalın birkaç mikron çapında olduğunu, kısa devre akım yoğunluklarının  $10^{10}$  ile  $10^{14}$  A/m<sup>2</sup> mertebelerinde ve bu esnada oluşan sıcaklığın 4000 K civarında olduğunu tespit etmiştir. Alman Fizikçi Behn ise, 1970'lerde bu olayın niteliksel bir yorumunu yapmıştır. Behn, otojenerasyon olayını dielektrik malzeme içerisinde şiddetli şekilde tablet halde bulunan bir plazmanın aniden genişmesi sonucunda iki komşu elektrot arasında bir boşalma oluşturması şeklinde açıklamaktadır. Fizikçi Behn bu konuda, özellikle kondansatör geometrisine, fiziksel ve kimyasal yapısına ve elementin maruz kaldığı mekanik basınçların şiddetine otojenerasyon olayının başlıca etkin faktörleri

gözü ile bakmıştır. Behn'in varmış olduğu sonuçlar bir başka fizikçi olan Paschen tarafından doğrulanmış ayrıca Paschen Yasası olarak bilinen ve boşalma başlangıç gerilimini plazmanın çapı ve basıncının fonksiyonu olarak veren bir bağıntı bulmuştur. Bu bağıntı deneylerle doğrulanmıştır [3].

Sonuç olarak,

- Metalize film teknolojisi, iyi uygulandığı takdirde üstün sonuçlar vermektedir.
- Kendi kendini yenileme olayı zararlı etkileri bilinçli bir şekilde azaltıldığı takdirde birçok avantaj sağlayan bir olaydır.

Ayrıca, şu karşılaştırma da metalize filmlili kondansatörlerin önemini vurgulaması yönünden oldukça geçerlidir. Klasik tasarımda (film artı folyo, veya karma yalıtkan artı folyo) olsun veya metalize film tasarımında olsun, dielektrik malzeme içerisinde fizikçi Behn'in modelinde bahsettiği plazmalar daima mevcut olup bunların her an bir boşalma olayına sebebiyet vereceği malumdur. Bu boşalma sonucu meydana gelecek olan kısa devre akımlarının şiddeti, klasik tasarımdaki elementi kalıcı kısa devreye sokacaktır. Eğer bu element bir alçak gerilim kondansatör bataryasına aitse bu batarya arızalanıp devre dışı olacak, eğer aynı element bir orta gerilim kondansatör bataryasına aitse elementin ait olduğu seri bağlantılardaki diğer elementler aşırı ve sürekli gerilimlerde çalışmaya zorlanacaklardır. Bunu takiben aynı olay metalize filmlili bir elementte olduğunda kendi kendini yenileme olayı böyle bir olayı muhtemelen etkisiz hale getirecektir.

#### **4.6.3 Koruma Önlemleri**

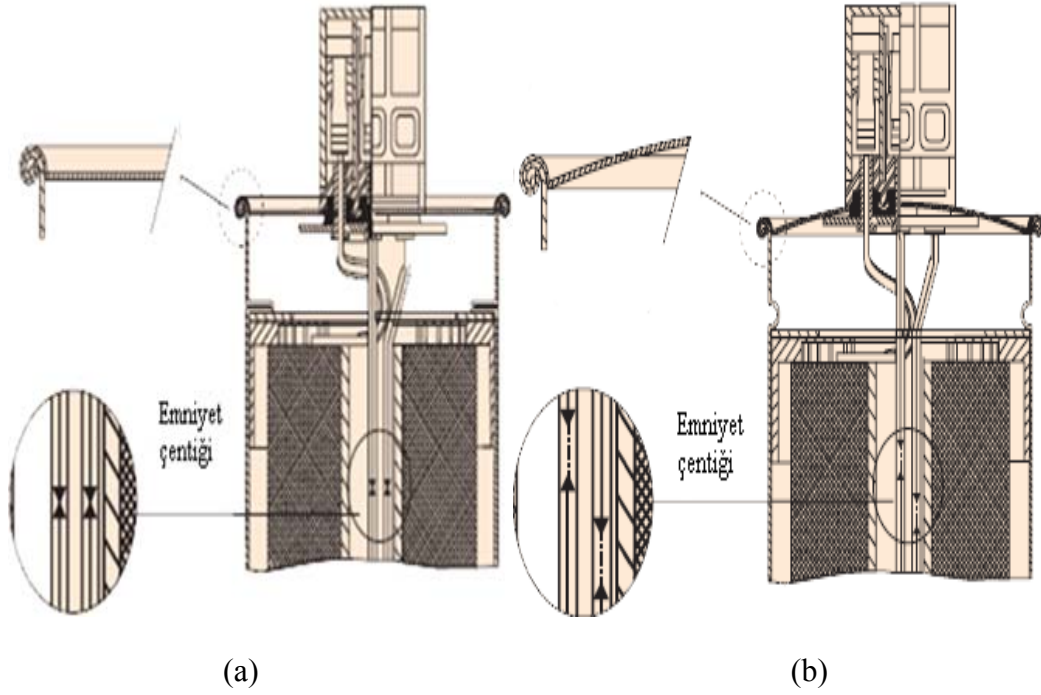
Gerek kondansatörü dış çevreden gerekse dış çevreyi kondansatörden koruma önlemlerini kısaca; kısa devre koruması, termik koruma, artık gerilim boşalma koruması, mekanik titreşimlere karşı koruma ve azami 90 saniyelik aralıklarla devreye giren veya çıkan kompanzasyon olaylarında yüksek frekanslı akım koruması şeklinde özetleyebiliriz [3].

#### **Aşırı yüklerle karşı koruma**

Güç kondansatörleri içerisindeki bütünleşik bir ayırıcı sigorta sistemi ile aşırı yüklemeye karşı koruma sağlanmıştır. Kendi kendini onarma işleminin sık sık oluşmasından dolayı ortaya çıkan gaz, cihazın gövdesinde yüksek basınca yol açar ve bunun sonucunda kondansatör gövdesinin boyuna esnemeye başlamasıyla sarım ile

bağlantı klemensi arasındaki kablolar emniyet çentiğinden kopar. Böylece kondansatör şebekeden ayrılmış olur.

Kondansatör ve sistemin emniyeti için aşırı yük ve arızalara karşı alınan önlemler Şekil 4.15’de gösterilmiştir.



**Şekil 4.15:** Aşırı Yüklere Karşı Koruma Sistemi

a) Arızadan önce; b) Arızadan sonra

#### 4.7 Tasarım Tekniği

Bir güç kondansatöründen neler beklenir:

1. Uzun ömürlü olsun.
2. Elektrik şebekesinde meydana gelen anormal akım, gerilim ve harmonik gibi olaylardan asgari şekilde etkilensin.
3. Geçici rejimlerden, akım, gerilim darbelerinden, dengeleme akımlarından etkilenmesin.
4. Aktif kayıpları az olsun ve bu kayıpları en aza indirebilsin.
5. Projelendirildiği asgari ve azami ortam sıcaklığında performanslarını yitirmesin.
6. Elektroteknik boyutları yani anma değerleri zamanla değişmesin.



7. Can ve mal emniyeti yönünden bir tehlike kaynağı olmasın.
8. Kalıcı kısa devreye girme olasılığı en az olsun.
9. Bakımı kolay, arızası az, onarımı olanaklı ve asgari bir mali yük oluştursun.
10. Montajı kolay olsun ve boyut yönünden herhangi bir yere monte edilebilecek modüler bir esneklik gösterebilir.
11. Hacimsel etkinlik gösterebilir, yani teknik ve ekonomik bir optimizasyonun ürünü olsun.
12. Kalitesinin deneme tahtası müşterisi olmasın.
13. Ucuz olsun.

Kondansatör gibi can ve mal güvenliği yönünden büyük önem taşıyan bir ürünün ucuzluğu, sadece satın alınması sırasında ödenen bedelle değil bunun uzun dönemde sağladığı fayda ve sonuçları ile ölçülmeli ve karşılaştırılmalıdır.

Bu noktada iki ana ilke öne çıkmaktadır.

1. En uygun elektrot ve dielektrik malzemeyi kullanmak.
2. En uygun elektrot-dielektrik yapısını ve geometriyi seçmek.

Pratikte hiçbir kondansatör ideal olmayıp belli ölçülerde aktif kayıplara sahiptir. Aktif kayıplar kondansatördeki metal aksamın elektriksel direnci ile kullanılan malzemeler ve üretim aşamasında uygulanan yöntem ve topyekün makina parkının teknolojik yapısından kaynaklanır ve değişkenlik gösterir.

Aktif kayıpları oluşturan her unsur, bir ısı kaynağı olup toplamda kondansatörün sıcaklığının artmasına neden olur. Bu ısının bir yüzey üzerinden dış ortama atılması gerekir ve kondansatörün sıcaklık sınıfına göre hesaplanan uygun bir yüzey değeri sayesinde ısı dengese ulaşır. Aksi takdirde kondansatörlerin sıcaklığı sürekli artarak arzu edilmeyen hasar ve bozulmalara yol açar.

Güç kondansatörlerinin çalışmaları esnasında birçok nedenden kaynaklanan ve arzu edilmeyen elektro-kimyasal etkileşim ve reaksiyonlar sonucunda oluşan gazlar metal muhafaza içerisindeki basıncın artmasına neden olur. Bu basıncın belirli bir eşik değerini aşması durumunda uygun bir iç düzenekle tahliye edilmesi gerekir. Klasik tipteki güç kondansatörlerinde etkili bir tahliye düzeneğinin tahliye edilmesi muhafazanın geometrik şekli nedeniyle teknik açıdan mümkün değildir veya yüksek

bir maliyet gerektirir. Uygun bir tahliye düzeneğine imkan sağlayan en uygun geometrik şekil silindirdir [18].

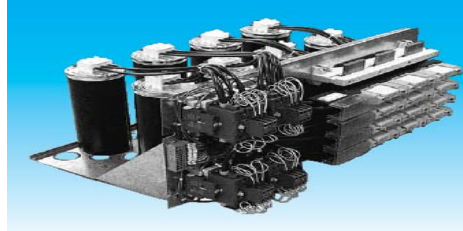
#### 4.8 Montaj

Kondansatörler, kondansatör kayıplarıyla oluşan sıcaklık yayılımının ve ısı iletimiyle kaybın uygun olacağı biçimde yerleştirilmelidir.

İşletme odasının havalandırılması ve kondansatör birimlerinin düzenlenmesi, her birimin etrafında iyi bir hava dolaşımı sağlanmalıdır. Bu, biri diğerinin üzerinde dizi halinde monte edilen birimler için özel bir önem arz eder.

Güneşten yayılan veya herhangi bir yüksek sıcaklık yüzeyinden yayılan radyasyona maruz kalan kondansatörlerin sıcaklığı artırılmalıdır. Soğutma havası sıcaklığına, soğutmanın şiddetine, radyasyonun şiddeti ve sürecine bağlı olarak, aşağıdaki iyileştirme yollarından birisi için seçim yapmak gerekebilir.

- Kondansatörü radyasyondan korumak
- Daha yüksek bir ortam havası sıcaklığı için tasarılan bir kondansatörü seçmek
- Daha yüksek beyan gerilimli kondansatörleri kullanmak.



**Şekil 4.16:** Güvenilir Montaj Yapısı

Kondansatörler her konumda M12 vida kullanılarak kolayca monte edilebilir (Şekil 4.16) [18]. Montaj vidası aynı zamanda topraklama bağlantısı olarak da kullanılır. Maksimum sıkma torku 5 Nm'dir. Klemens bağlantıları 5 mm vida ve maksimum 2 Nm'lik tork uygulanarak yapılır. Kablo bağlantıları kondansatörün aşırı basınç durumunda koruma işlemini rahatlıkla sağlayabilmesi için gövde boyunun minimum 20 mm esnemesine izin verecek şekilde yapılmalıdır. Kondansatörlerin bağlantısında sadece bakır kablo kullanılır [3].

## 5. YENİ BİR GÜÇ KONDANSATÖRÜ TASARIMI

### 5.1 Tasarımın Yenilikleri

Tasarımın sunacağı başlıca yenilikler şunlardır:

- % 25-30 daha yüksek AA sürekli çalışma geriliminin uygulanması durumunda kondansatör aktif boyutlarında yaklaşık % 40 oranında düşme [18].
- Aşırı basınç düzeneği nedeniyle kondansatörlerin, patlama ve yangın tehlikesi arz etmeden etkin olarak devre dışı kalmaları.
- Kondansatör aktif kayıplarının ortalama % 50 oranında daha düşük olması ve bu yüzden daha az ısınıp ömürlerinin önemli oranında uzatılması.
- $100 \times I_n$ 'den daha yüksek darbe akımlarına ve daha yüksek RMS akımlarına dayanmaları [4, 5].

özellikleriyle gereksinim duyulan standart koşulları yerine getiren, yüksek kaliteli ve ekonomik bir ürün oluşturulması amaç edinilmiştir.



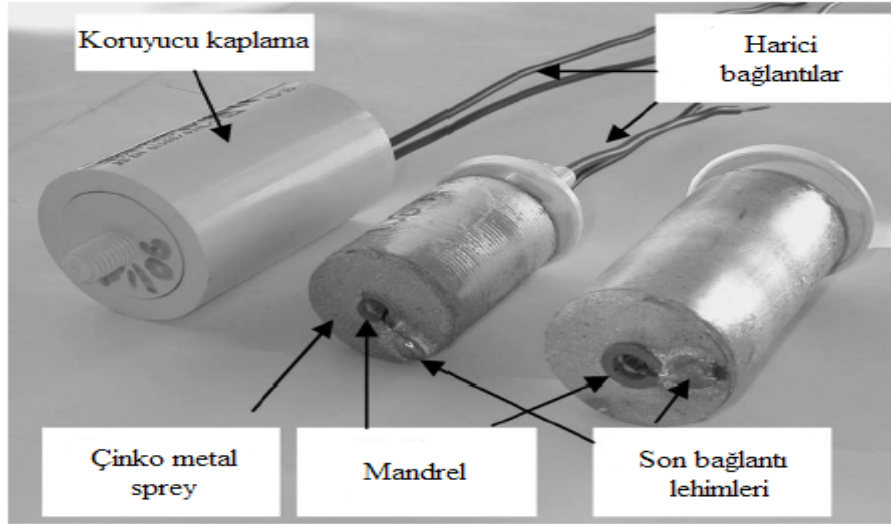
**Şekil 5.1:** Şiddetli Bir Patlamadan Hasar Görmüş Klasik Tip Kondansatörler

İnce saç kutulu kondansatörlerde iç basınç ve ısıların çok yüksek seviyelerde olması ve etkilerinin ani olması nedeniyle Şekil 5.1'deki şiddetli patlamalar oluşur [9].

## 5.2 Problemler ve Alternatif Çözüm Önerileri

Tasarımın her aşamasında ortaya çıkabilecek temel sorunlar için alternatif çözüm önerileri şunlardır:

- Sıvı yağın nüfuz edemediği metalize polipropilen film sarım tabakalarında sıkışan hava nedeniyle alçak seviyelerde seyreden korona boşalması başlama gerilimi sorunu.
  - **Çözüm yolu:** Bu nedenle ortaya çıkan arkın sönümlü duruma getirilmesini ve etkisinin geniş bölgelere yayılmasını önleyecek nitelikte özel metal kaplı film kullanımı.
- Sarım tabakalarının kenarlarında bulunan hücresel hava bölgeleri nedeniyle alçak seviyede olan korona arkı başlama gerilimi sorunu.
  - **Çözüm yolu:** Özel bir sıvı yağ, yüksek vakumlu bir emprenye etme ve yağın nüfuz etme yeteneğini arttıran özel bir taban yapısı.
- Çinko sprej tabakasının metalize film kenar metal kaplaması ile oluşturduğu zayıf elektriksel kontak direnci sorunu.
  - **Çözüm yolu:** Mikronize çinko sprej zerreciklerinin optimum boyutta olmalarını sağlayacak sprej gerilim-akım ve hız ayarı.
- Aşırı basınç seviyelerinin belirlenmesi sorunu.
  - **Çözüm yolu:** Prototipler üzerinde yapılabilen basınç ölçümü deneyleri ve buna bağlı olarak seçilecek silindirsiz metal tüpün mekanik özelliklerinin belirlenmesi.
- Aktif kayıpları azaltma sorunu.
  - **Çözüm yolu:** Kondansatör hacmi içerisinde çeşitli nedenlerle oluşan ısıları dış ortama aktarabilecek termik-mekanik bir iç hacim yapımı (Şekil 5.2) [29].



**Şekil 5.2:** Termo-Mekanik Kararlılığı Sağlanmış Yapı

**Tablo 5.1:** Temel Teknolojik Üstünlükler ve Bu Üstünlüklere Ulaşma Yöntemleri

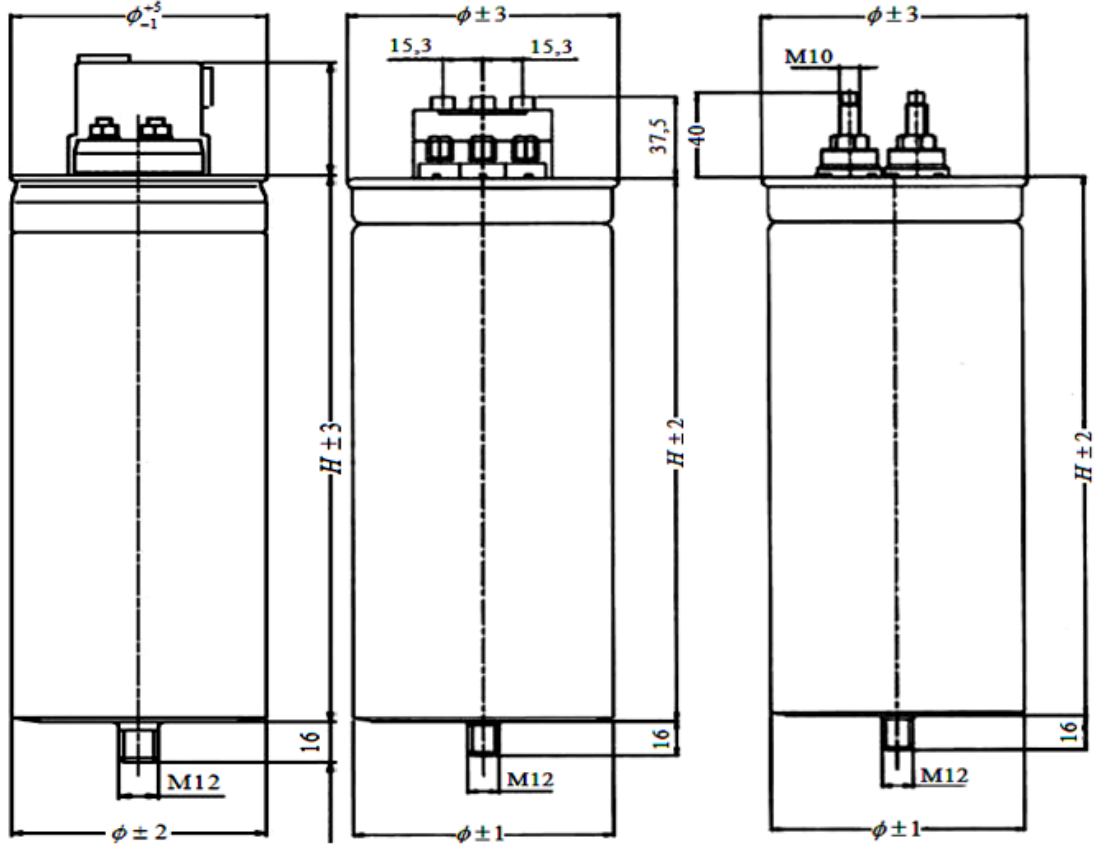
	Üstünlükler				
	Daha Uzun Ömürlü	Daha Düşük Boyutlu	Daha Düşük Aktif Kayıplı (Daha Az Isınma)	Daha Yüksek Darbe ve Harmonik Akım Dayanımı [28]	Aşırı Basınca Daha Etkili Sistem
Düşük Temas Direnci	√		√	√	√
Yüksek Korona Boşalması Başlama Gerilimi	√			√	√
Geniş Temas Yüzeyi	√		√	√	√
Özel Metalizeli Film (Dalga Kesim/Kademeli)	√	√	√	√	
Optimum Kenar Kaydırma Mesafesi	√		√	√	√
Homojen Dağılımlı Ve Mikronize Metal Tozu	√		√	√	√
Özel Yüksek Vakum İşlemi	√			√	√
Uygun Sıvı Dielektrik	√		√		√
Uygun Isı Salımı	√	√	√	√	√
Optimum Boyut (Isı Dağılımı ve Aşırı Bas. Düz.)		√	√		√
Optimum H/Φ Geometrisi		√	√	√	√
Yüksek Elektriksel Zorlanma		√	√	√	√

**Tablo 5.2:** Genel Kabul Gören ve Tasarım Aşamasında Uyulması Gereken Standartlar

Konu	Standart
Elektriksel	TS EN 60831-1 Bölüm 1 [4]
Elektriksel	TS EN 60831-2 Bölüm 2 [5]
Elektriksel	TS 1056-1 EN 60252-1-2
Elektriksel	VDE 0560
Elektriksel	IEC 358
Elektriksel	IEC 70, IEC 70 A
Elektriksel	NEMA CP1
Elektriksel	BS 1650, 5267, 4017
Elektriksel	IEC 593
Elektriksel	IEC 252
Elektriksel	IEC 566
Elektriksel	IEEE 519-1992
Elektriksel	EN 6100-3-2
Elektriksel	IEC 1000-3-4
Elektriksel ve Mekanik	TS EN 50181, IEC 71
Mekanik	DIN 47636
Reçineler	DIN 16945
Kalite Yönetim	TS EN ISO 9001:2000

### 5.3. Tasarım Modelleri

Tablo 5.1’de belirtilen tüm teknolojik üstünlüklere ulaşılabilmesi için Tablo 5.2’de belirtilen standartlara tasarım aşamasında titizlikle uyulması gerekir. Şekil 5.3’de ideal ölçülerde tasarlanmış ve belirtilen tüm teknolojik üstünlükleri barındıran Ducati Energia firmasının yurt dışı pazarında kullandığı üç ayrı model gösterilmiştir [18]. Modellerin üçü de üç fazlı modulo serisinin ürünleridir. Anılan isimleriyle “kuru tip” modulo 10, modulo 25 ve “yağlı tip” modulo 50 olarak tanımlanmaktadır. Modulo serisinin yanısıra mono serisi ürünler de piyasada çokça kullanılmaktadır; fakat üç fazlı güç kondansatörleri ülkemizde henüz eski teknolojilerle üretilmektedir. Çalışmada tasarım karakteristikleri değiştirilerek Tablo 5.2’deki standartlara bağlı olarak tasarımları ve sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilen Ducati Energia firmasının bu güç kondansatörü modelleri Tablo 5.1’de belirtilen en üstün teknolojilere sahip olması nedeniyle ülkemizde kondansatör üretimi yapan birçok firma tarafından ileride sıklıkla tercih edilebilecek ve birçok ar-ge çalışmasına da konu olabilecektir.



a)  $Q < 10$  kVAr

b)  $10 < Q < 30$  kVAr

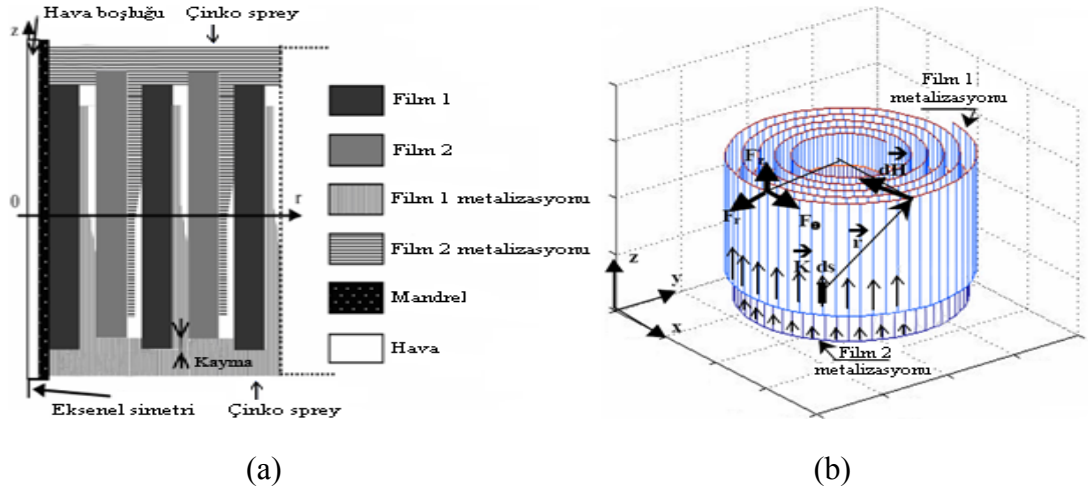
c)  $Q > 30$  kVAr

Şekil 5.3: Uygun Tasarım Modelleri

## 5.4 Sonlu Elemanlar Yöntemi Analizleri

### 5.4.1 Metalize Polipropilen Film Kondansatörlerin Isıl Benzetimle Geometrik Optimizasyonu

Bu çalışmada, metalize polipropilen film (MPPF) kondansatörlerdeki kayıpları hesaplamak için analitik bir model kullanılmıştır. Model aynı kapasite değerine sahip; fakat farklı geometriye kondansatörler için deneysel olarak doğrulanıp, kondansatör gruplarının her biri için çevrelerindeki ısı dağılımının ısı optimizasyona ulaşma hedefi ile bağdaştırılmıştır. Sonucunda aynı elektrik alanına maruz kalan boyca daha uzun bir kondansatör bobininin daha fazla ısındığı görülmüştür [31]. Şekil 5.4’de çalışmada sonlu elemanlar yöntemi analizleri yapılacak olan MPPF güç kondansatörü bobininin iki ve üç boyutlu modelleri gösterilmiştir [30]. Ducati Energia firmasının güç kondansatörleri katalogunda [18] bulunan “kuru tip” modulo 10 serisinden seçilen  $3 \times 10 \mu\text{F}$ ’lık güç kondansatörü için katalog bilgilerinden faydalanarak hesap yoluyla bulunan değerler Tablo 5.3’de gösterilmiştir.



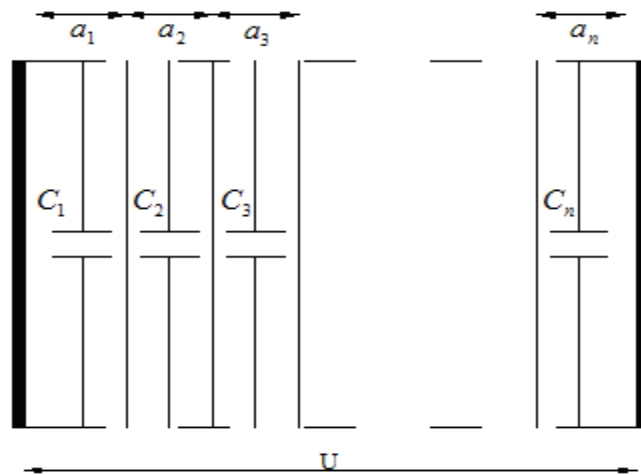
Şekil 5.4: MPPF Kondansatörün İki ve Üç Boyutlu Modeli

a) İki boyutlu model (2D); b) Üç boyutlu model (3D)

Tablo 5.3: Tasarım Modelleri Karakteristik Değerleri

Karakteristikler (Kuru Tip)	Sembol	Grup A	Grup B	Grup C	Grup D
Kapasite ( $\mu\text{F}$ )	$C$	3x10	3x10	3x10	3x10
Güç (kVAr)	$Q$	1,5	1,5	1,5	1,5
Kayıp Faktörü ( $\tan\delta$ )	$\tan\delta$	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$0,14 \cdot 10^{-3}$	$0,18 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$
Anma Gerilimi (V)	$U_n$	400	400	400	400
Sınır Açıklığı (Free Margin) (mm)	$M$	2.5	2.5	2.5	2.5
PP Film Kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )	$e_p$	6	6	6	6
Metalizasyon (Çinko) Kalınlığı (nm)	$e_m$	15	15	15	15
Kaydırma Aralığı (winding offset) (mm)	$w_o$	1	1	1	1
Kondansatör Bobini Yüksekliği (mm)	$H$	40	55	70	100
Mandrel Çapı (mm)	$\Phi$	9	9	9	9
Mandrel PVC Kalınlığı (mm)	$P$	2	2	2	2
Son Sprey Çinko Kalınlığı (mm)	$Z$	0.3	0.3	0.3	0.3
Tur Sayısı (spin)	$N$	1406	1130	953	733

Silindrsel yapı gereğince kondansatör bobinin içerisindeki kapasitelerin dağılımı Şekil 5.5'deki gibi olacaktır. Kapasitelerin paralel bağlı olması nedeniyle eşdeğer kapasite değeri hesabı (5.1) eşitliği ile yapılacaktır.



Şekil 5.5: Çok Tabakalı Silindrsel Elektrot Sistemi



$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n \quad (5.1)$$

$$C = \frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \ell}{\ln\left(\frac{r_1 + a_1}{r_1}\right)} + \frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \ell}{\ln\left(\frac{r_1 + a_1 + a_2}{r_1 + a_1}\right)} + \frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \ell}{\ln\left(\frac{r_1 + a_1 + a_2 + a_3}{r_1 + a_1 + a_2}\right)} + \dots + \frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \ell}{\ln\left(\frac{r_1 + a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n}{r_1 + a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_{n-1}}\right)} \quad (5.2)$$

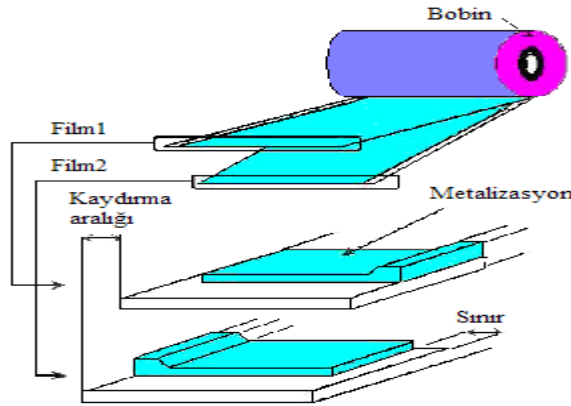
$$a_1 = a_2 = a_3 = \dots = a_n \quad (5.2a)$$

$$\ell = H \text{ (Silindrisel kondansatör bobini yüksekliği)} \quad (5.2b)$$

Aynı kapasite değerine sahip olan dört ayrı model için film net genişliğindeki değişmeye bağlı olarak bobin çapının hesaplanması için tur (spin) sayısının bilinmesi gerekir. Bu hesaplama silindrisel yapı dikkate alınarak (5.2) denklemi ile yapılır.

Denklem Excel de yazılan bir algoritma yardımıyla  $C$  (eşdeğer kapasite değeri)'ni verecek şekilde gerekli spin sayısı kolayca bulunabilir. Aşağıda yazılan algoritma belirtilmiştir.

$$\text{Algoritma} = 2\pi \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 2,2 \cdot \ell / \ln(\{r_1 + a\}/r_1)$$



**Şekil 5.6:** Kondansatör Bobininin İç Yapısı

Tablo 5.3'deki değerlerin kondansatör bobini üzerinde yerleşimini Şekil 5.6'daki model üzerinde daha net olarak görebiliyoruz [32]. Burada elektrot genişliğinin polipropilen filmin genişliğinden sınır açıklığı kadar daha az olduğunu görülebilmektedir. Bunun yanı sıra PP filmlerin üst üste sarılması esnasında PP filmler ile çinko temas yüzeyi arasında kaydırma aralığı olarak tanımlanan bir boşluk bırakıldığı da görülmektedir. Kaydırma aralığına yalıtımın sağlanması için dielektrik sıvı, SF<sub>6</sub> gazı veya vakumlu hava basılabilmektedir.

Toplam kapasite değeri  
10  $\mu$ F olana kadar aşağıya  
doğru çekilir.

	A	B	C	D	E
1	Yarıçaplar	Kapasiteler			
2	4,5	100mm	70mm	55mm	40mm
3	4,508	9,18529E-09	6,4297E-09	5,05191E-09	3,67411E-09
4	4,512	9,19753E-09	6,43827E-09	5,05884E-09	3,67901E-09
5	4,518	9,20977E-09	6,44684E-09	5,06537E-09	3,68391E-09
6	4,524	9,222E-09	6,4554E-09	5,0721E-09	3,6888E-09
7	4,53	9,23424E-09	6,46397E-09	5,07883E-09	3,6937E-09
8	4,536	9,24648E-09	6,47254E-09	5,08556E-09	3,69859E-09
9	4,542	9,25872E-09	6,4811E-09	5,0923E-09	3,70349E-09
10	4,548	9,27096E-09	6,48967E-09	5,09903E-09	3,70838E-09
11	4,554	9,2832E-09	6,49824E-09	5,10578E-09	3,71328E-09
12	4,56	9,29544E-09	6,50681E-09	5,11249E-09	3,71817E-09
13	4,566	9,30768E-09	6,51537E-09	5,11922E-09	3,72307E-09
14	4,572	9,31992E-09	6,52394E-09	5,12595E-09	3,72797E-09
15	4,578	9,33215E-09	6,53251E-09	5,13268E-09	3,73286E-09

Şekil 5.7: Tur Hesabında Kullanılan Excel Algoritmasının Giriş Bölümü

Dört model için Şekil 5.7’de giriş kısmı görülen ve Excel’de oluşturulan tabloda, toplam kapasite değerleri 10 $\mu$ F’ı bulana kadar sütün boyunca aşağıya doğru çekilir. Devir sayısının film genişliği arttıkça azaldığı dolayısıyla film genişliği ile devir sayısının ters orantılı olduğu sonucuna varılır.

Aşağıda dört model için de Excel’de oluşturulan algoritma ile bulunan devir (tur) sayıları verilmiştir.

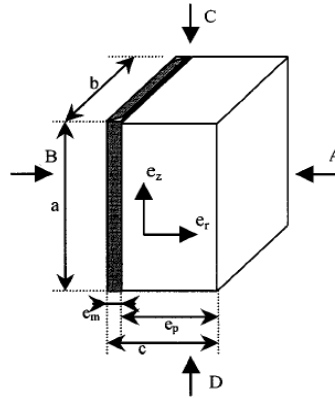
$\ell = 100$  mm için; N = 733 spin

$\ell = 70$  mm için; N = 953 spin

$\ell = 55$  mm için; N = 1130 spin

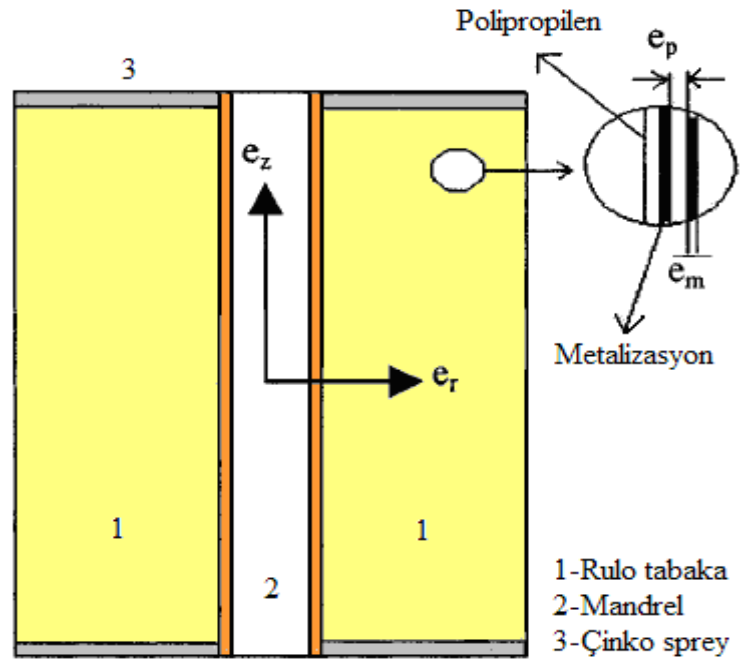
$\ell = 40$  mm için; N = 1406 spin olarak bulunur.

### Isıl benzetim



Şekil 5.8: Isıl İletkenlik Hesabı İçin Kullanılan Model

Kondansatör bobinindeki ısınma bobinin üst ve alt bölümündeki çinko metal sprej tabakası nedeniyle, çinko metal kaplı elektrotlardan, iç kablo bağlantılarından ve içinde bulunduğu ortam koşulundan dolayı iletim yoluyla bir ısı transferi olmaktadır (Şekil 5.8). Kondansatörler kutulanıp pano içerisine yerleştirildiğinde iletim ve ısıma ile ısınma da devreye girmektedir; çünkü kondansatör üreticileri kondansatörün ısı kararlılığı sağlamasını ister. Tıpkı insan vücudu gibi ısı kararlılığın sağlanması gerekir. Isıl kararlılığı sağlayamayan bir kondansatör arızalı olarak kabul edilir ve ısınmadan dolayı kısa zamanda patlar. Isıma ile ısınma da kondansatör bobininin içerisine koyulduğu tüpün rengi de önemlidir [33].



**Şekil 5.9:** Modelin Çift Taraflı İki Eksenli Görünümü

Yukarıdaki model üzerinde üç farklı ısı transferinin yüzeysel olarak oluşumu görülebilmektedir (Şekil 5.9). Polipropilen (dielektrik) ve metalizasyon (çinko elektrot) kısımlarından oluşan MPP filmlerin üst üste sarılmasıyla oluşan kondansatör bobininin her iki tarafı tek bir tabaka olarak belirlenip çözülemeye geçilmiştir.

### Isıl analizler

#### 1. İletim yoluyla ısı transferi

$\lambda_p$  polipropilenin ısı iletkenliği,  $\lambda_m$  çinko tabaka ısı iletkenliği,  $e_m$  ve  $e_p$  elektrot ve polipropilen kalınlıkları olmak üzere Şekil 5.8'deki modelin A ve B kenarları arasındaki ısı direnç (5.3) eşitliğindeki gibi elde edilir.

$$R_{AB} = \frac{1}{\lambda_p} \frac{e_p}{ab} + \frac{1}{\lambda_m} \frac{e_m}{ab} \quad (5.3)$$

$e_r$  eksenindeki ısı iletkenlik:

$$\lambda_r = \frac{1}{R_{AB}} \frac{c}{a \cdot b} = \frac{c}{\frac{e_p}{\lambda_p} + \frac{e_m}{\lambda_m}} = \frac{e_p + e_m}{\frac{e_p}{\lambda_p} + \frac{e_m}{\lambda_m}} \quad (5.4)$$

Eğer  $e_m \ll e_p$  ve  $\lambda_m \gg \lambda_p$  kabul edilirse;

$$\lambda_r \cong \lambda_p \quad (5.5)$$

Şekil 5.8'un C ve D kenarları arasındaki ısı direnç:

$$R_{CD} = \left[ \lambda_p \frac{e_p \cdot b}{a} + \lambda_m \frac{e_m \cdot b}{a} \right]^{-1} \quad (5.6)$$

$e_z$  eksenindeki ısı iletkenlik:

$$\lambda_z = \frac{1}{R_{CD}} \frac{a}{b \cdot c} = \frac{e_p \cdot \lambda_p + e_m \cdot \lambda_m}{e_m + e_p} \approx \lambda_p + \frac{e_m}{e_p} \cdot \lambda_m \quad (5.7)$$

Genel ısı iletim eşitliği:

$$\nabla^2 T + \frac{x}{\lambda} = \frac{\delta \cdot C_p}{\lambda} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5.8)$$

Burada  $\nabla^2 T$  Laplasyen operatörü,  $T$  uzaysal ısı dağılımı,  $\delta$  malzemenin yoğunluğu,  $\lambda$  malzemenin ısı iletkenliği,  $x$  hacimsel güç yoğunluğu,  $C_p$  özgül ısı,  $t$  zaman olarak ifade edilir.

Kararlı hal çözümü yapılacağı zaman denklemin sağ tarafındaki geçici terim sıfır alınır. Silindrisel koordinatlarda kararlı hal çözümü için  $\lambda$  ile çoğaltabiliriz.

$$\frac{\lambda}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + x = 0 \quad (5.9)$$

İzotropik bir ortam düşünürsek, enine (radyal) ve boyuna (eksenel) iletkenlikleri ayrı ayrı kullanabiliriz.

$$\frac{\lambda_r}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \lambda_z \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + x = 0 \quad (5.10)$$

Fakat (5.10) denklemini pek çok özel durum için kapalı biçimde çözmek mümkün değildir. Eğer  $x=0$  (iç güç üretimi olmadan) ve basit sınır koşulları ile yüzeylere koşul konulursa bobin üzerindeki herhangi bir noktanın sıcaklığı aşağıdaki ifade ile bulunabilir.

$$T(r, z) = \sum_i \sum_j \left\{ \left[ a_i \cdot J_0 \left( \frac{k_r}{\sqrt{\lambda_r}} \right) + b_i \cdot Y_0 \left( \frac{k_r}{\sqrt{\lambda_r}} \right) \right] \cdot \left[ c_j \cdot J_0 \left( \frac{k_z}{\sqrt{\lambda_z}} \right) + d_j \cdot Y_0 \left( \frac{k_z}{\sqrt{\lambda_z}} \right) \right] \right\} \quad (5.11)$$

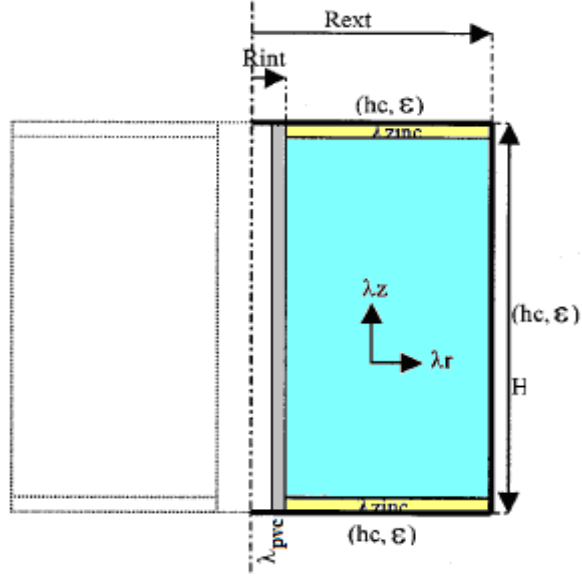
Burada  $J_0$  ve  $Y_0$  sıfırcıncı mertebeden Bessel ve Weber fonksiyonları;  $a, b, c, d$  ise ilk koşullara bağlı olan sabitlerdir

Kondansatörün içerisine yerleştirildiği kasanın dayanabileceği maksimum sıcaklık ise aşağıdaki eşitlik ile bulunur [34].

$$T_c = \frac{kI^2 ESR}{A} \quad (5.12)$$

Burada,  $k$  yayılım katsayısı,  $I$  rms akımı,  $A$  ısının yayılımının olduğu toplam yüzey alanıdır.

Bu yapıdaki problemleri bilgisayarda incelemek için kullanılan sayısal yöntemlerden birisi Sonlu Elemanlar Yöntemi'dir [35-38]. Problem Isı Akışı (Heat Flow) problemi olarak bu yöntemle tanımlanıp çözülebilir. Bu çalışmada AG güç kondansatörü'nün ısıl analizi, FEMM 4.2, Finite Element Method Magnetics (David Meeker, [dmeeker@ieee.org](mailto:dmeeker@ieee.org), Copyright 1998-2004), açık lisanslı sonlu elemanlar programı ile Şekil 5.10'daki model referans alınarak yapılmıştır [39]. Aşağıda çözümlenme sırasında atılan her adımın ve elde edilen sonuçların şekilleri verilmiştir.



**Şekil 5.10:** Simülasyon Modeli

### Program girdileri

*Materyal tanımlamaları:*

Havanın ısı iletkenliği  $\lambda_h = 0,0181$  W/mK

Çinkonun ısı iletkenliği  $\lambda_m = 122$  W/mK

PVC'nin ısı iletkenliği  $\lambda_{pvc} = 0,19$  W/mK

Tabaka için,

Polipropilenin ısı iletkenliği = Radyal ısı iletkenlik

$\lambda_p = 0,25$  W/mK =  $\lambda_r$  (tabakanın radyal yöndeki ısı iletkenliği) [40, 41].

Eksenel ısı iletkenlik ise;

(5.7) denkleminde eksenel yöndeki ısı iletkenlik hesap edilirse,

$$\lambda_z = 0,25 + \left( \frac{15 \cdot 10^{-9}}{6 \cdot 10^{-6}} \right) \times 122$$

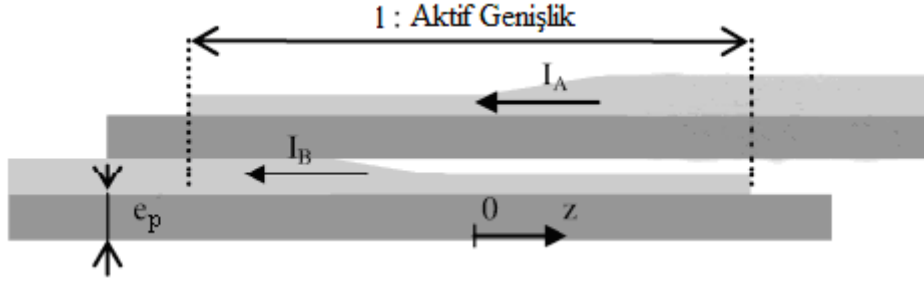
$\lambda_z = 0,555$  W/mK (tabakanın eksenel yöndeki ısı iletkenliği)

olarak bulunur.

*Toplam Isı Akışı (W):*

Kayıp güç hesabı yapılarak toplam ısı akışı belirlenebilmektedir. Diferansiyel ve nümerik hasap yoluyla kayıp güç hesabı yapılabilmektedir.

Diferansiyel eşitliklerle kondansatördeki kayıp hesabı aşağıdaki gibi yapılabilir [42]:



**Şekil 5.11:** Kondansatör Bobininin Temel Bir Parçasının Görünümü

Şekil 5.11’de görülen kondansatörün iki film ve iki metalize tabakasından oluşan temel bir bölümünü ele alacak olursak; A tabakasının akımı olan  $I_A$ , z eksenı boyunca yazılan (5.13)’deki diferansiyel eşitliğin çözüdür.

$$\frac{d^2 I_A}{dz^2}(z) - \frac{4\pi j \omega \epsilon_0 \epsilon_r}{e_p} [R(z) + R(-z)] I_A(z) = -\frac{1}{2} \frac{4\pi j \omega \epsilon_0 \epsilon_r}{e_p} R(-z) I \quad (5.13)$$

Burada  $R$  tabaka direnci (tabakanın biçimine bağı),  $e_p$  dielektrik kalınlığıdır.

(5.13) denklemini boşluk fonksiyonları kullanılarak çözülebilir. Bu fonksiyonların lineer olarak bağımsız çözümlerinin bir çifti (5.14) denklemdir.

$$\frac{d^2 W}{dz^2} - zW = 0 \quad (5.14)$$

Boşluk fonksiyonları (5.15) ve (5.16)’deki Bessel fonksiyonları biçimine getirilebilir.

$$Ai(z) = \frac{\sqrt{z/3}}{\pi} K_{1/3}(2/3z^{3/2}) \quad (5.15)$$

$$Bi(z) = \sqrt{z/3} I_{-1/3}(2/3z^{3/2}) + I_{1/3}(2/3z^{3/2}) \quad (5.16)$$

Her bir tabakadaki akım  $I_A$  ve  $I_B$  ve elektrik potansiyeli  $V$ , boşluk fonksiyonlarına bağı olan  $\eta_{IA}, \eta_{IB}, \eta_V$  nümerik fonksiyonları ile (5.17), (5.18) ve (5.19)’daki gibi ifade edilir.

$$\underline{I_A}(z) = 1/2 \eta_{IA}(z) \underline{I} \quad (5.17)$$

$$\underline{I_B}(z) = 1/2 \eta_{IB}(z) \underline{I} \quad (5.18)$$

$$\underline{V}(r, z) = 1/2 \eta_V(z) I / r \quad (5.19)$$

Burada  $r$  bobin yarıçapıdır.

Her hacimsel birimdeki kayıpları dirençsel kayıplar ((5.20)'nin ilk terimi) ve dielektrik kayıplar ((5.20)'nin ikinci terimi) toplamı olarak tanımlayabiliriz.

$$P_v(r, z) = \underbrace{\frac{Y_0^2 U^2}{4\pi \times e_p} \eta_\Omega(z)}_{\text{Dirençsel}} - \underbrace{\frac{Y_0^2 U^2}{4\pi \times e_p} \tan \delta \times \eta_Q(z)}_{\text{Dielektrik}} \quad (5.20)$$

$$P_v(r, z) = \frac{Y_0^2 U^2}{4\pi \times e_p} [\eta_\Omega(z) - \tan \delta \times \eta_Q(z)] \quad (5.21)$$

Burada  $\delta$  çalışılan frekanstaki dielektrik kayıp açısını,  $U$  ise uygulanan gerilimi gösterir. Dolayısıyla aktif güç kaybının Bessel fonksiyonları ile çözüm denklemi (5.21)'de gösterilmiş olur.

Kayıp denkleminde geçen terimler ise:

$$\underline{\eta_\Omega(z)} = (R(z)|\eta_{IA}(z)|^2 + R(-z)|\eta_{IB}(z)|^2) I^2 \quad (5.22)$$

$$\underline{\eta_Q(z)} = -\frac{4\pi \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r}{e_p} |\eta_V(z)|^2 \quad (5.23)$$

$$\underline{Y_0} = \frac{jC_0 \omega}{1 + jR_0 C_0 \omega} \quad (5.24)$$

$$R_0 = \int_{-1/2}^{1/2} \eta_\Omega(z) dz - \tan \delta \left( \int_{-1/2}^{1/2} \eta_Q(z) dz \right) \quad (5.25)$$

$$C_0 = - \left( \omega \int_{-1/2}^{1/2} \eta_Q(z) dz \right)^{-1} \quad (5.26)$$

olarak ifade edilir.

Diferansiyel hesaplamalar ile bulunan kayıp güç (5.27)'de uygun sınır şartları ile kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi çözümü yapılabilir.



$$\operatorname{div}(\bar{\lambda} \cdot \nabla(T)) + P_v = 0 \quad (5.27)$$

Burada  $\lambda$  ısı iletkenlik katsayısı,  $T$  sıcaklık,  $P_v$  kayıp güç olarak ifade edilir.

Nümerik hesaplar ile kondansatör kayıpları hesaplanacak olursa [31];

#### a. Dielektrik kayıplar

Dielektrik kayıp sabiti  $\tan\delta$ , MPP filmlili güç kondansatörlerinde 0,1 den 0,2 W/kVAr'a kadar değişim gösterir.

Dielektrik kayıp güç ise,

$$D = Q \times \tan \delta \quad (5.28)$$

$$D = V^2 \times 2\pi f C \times 10^{-3} \tan \delta \quad (5.29)$$

olarak tanımlanır.

#### b. Ohmik kayıplar

Ohmik kayıplar bir güç kondansatöründe dirençsel bileşenler tarafından oluşturulur.

Bobinin  $V$  hacmindeki tüketilen aktif güç ve ortaya çıkan reaktif güç,

$$P = \iiint_V P_v(r, z, \omega) dv \quad (5.30)$$

$$Q = \iiint_V Q_v(r, z, \omega) dv \quad (5.31)$$

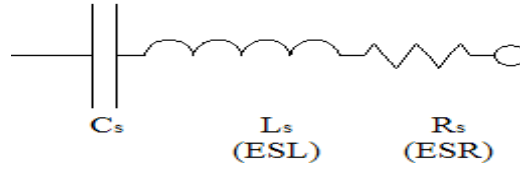
eşitlikleri ile bulunabilir.

Burada,  $P_v(r, z, \omega)$  ve  $Q_v(r, z, \omega)$  sırasıyla bobinin  $\omega$  domeninde  $r$  ve  $z$  eksenlerine bağlı olan aktif ve reaktif hacimsel gücüdür. (5.30) ve (5.31) denklemlerinin analitik çözümünde sıfırıncı ve birinci dereceden Bessel fonksiyonları kullanılır.

Toplam güç ise,

$$P_{tot} = P + Q \tan \delta \quad (5.32)$$

olur. Seri eşdeğer direnç ile de toplam aktif güç bulunabilir.



**Şekil 5.12:** Seri Eşdeğer Devre

Şekil 5.12'deki devrede görülen *ESR* (Seri eşdeğer direnç) değeri kondansatör üreticileri tarafından kondansatörün rezonans frekansında ölçülmüş empedans olarak veya özel bir AA frekansına (100 kHz gibi) LCR metre ile veya yaklaşık 1V'da empedans analizörü ile ölçülür.

*ESR* değeri hesap yoluyla da bulunabilir [27, 43].

$$\tan \delta = \frac{Z_r}{Z_C} = ESR \cdot \omega \cdot C \quad (5.33)$$

Burada,  $Z_r$  ve  $Z_C$  rezistif ve kapasitif empedanslar,  $\omega$  açısal frekans,  $C$  kapasite,  $\tan \delta$  kayıp faktörü olarak ifade edilir.

$$ESR = \frac{\tan \delta}{\omega \cdot C} \sim 1/\omega \quad (5.34)$$

Kondansatördeki seri eşdeğer endüktans hesabı ise şöyle yapılır:

$$L_s = \frac{1}{C \cdot \omega_0^2} \quad (5.35)$$

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0 \quad (5.35a)$$

Burada  $f_0$  rezonans frekansıdır.

$$P_{top} = ESR \cdot I_{eff}^2 \quad (5.36)$$

(2.8) denkleminde kondansatör üzerinden geçen anma akım değerleri bulunabilir.

Üç fazlı kondansatörler için  $I = \omega \cdot c_\Delta \cdot \sqrt{3} V_{FF}$  eşitliğiyle (Dört grup kondansatör, kapasite ve gerilim değerleri aynı olduğu için aynı akım değerine sahiptir.)

$$I_n = 2\pi \cdot f \cdot c_\Delta \cdot \sqrt{3} U_n = 2\pi \cdot 50 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{3} \cdot 400 = 2,17 \text{ A} \quad (I_n: \text{Alternatif akımın etken değeri (beyan akımı)})$$

Tablo 4.3'deki kondansatörler için  $ESR$  değerleri (5.34)'den hesaplanacak olursa;

$$ESR_{100} = \frac{\tan \delta_{100}}{\omega C} = (0,2 \cdot 10^{-3}) / (2\pi \cdot 50 \cdot 10 \cdot 10^{-6}) = 0,0636 \Omega$$

$$ESR_{70} = \frac{\tan \delta_{70}}{\omega C} = (0,18 \cdot 10^{-3}) / (2\pi \cdot 50 \cdot 10 \cdot 10^{-6}) = 0,0573 \Omega$$

$$ESR_{55} = \frac{\tan \delta_{55}}{\omega C} = (0,14 \cdot 10^{-3}) / (2\pi \cdot 50 \cdot 10 \cdot 10^{-6}) = 0,0445 \Omega$$

$$ESR_{40} = \frac{\tan \delta_{40}}{\omega C} = (0,1 \cdot 10^{-3}) / (2\pi \cdot 50 \cdot 10 \cdot 10^{-6}) = 0,0318 \Omega$$

(5.36) denkleminde,

$$P_{top_{100}} = ESR_{100} \cdot I_{eff}^2 = 0,0636 \times 2,17^2 = 0,3 \text{ W}$$

$$P_{top_{70}} = ESR_{70} \cdot I_{eff}^2 = 0,0573 \times 2,17^2 = 0,27 \text{ W}$$

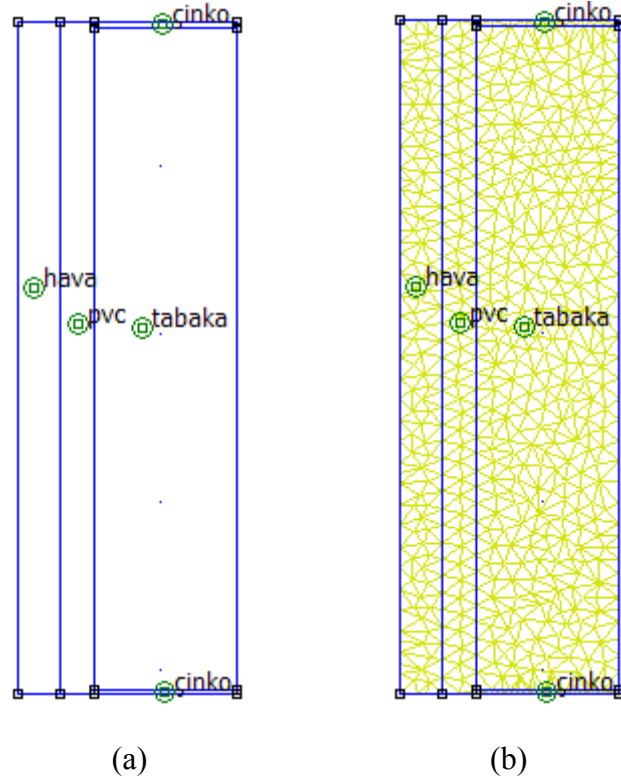
$$P_{top_{55}} = ESR_{55} \cdot I_{eff}^2 = 0,0445 \times 2,17^2 = 0,21 \text{ W}$$

$$P_{top_{40}} = ESR_{40} \cdot I_{eff}^2 = 0,0318 \times 2,17^2 = 0,15 \text{ W bulunur.}$$

*Sınır koşulları:*

Sabit sıcaklık: 305 K

Hesaplamalar yapılırken havanın, çinkonun ve mandrel et kalınlığı tabakasını oluşturan PVC'nin radyal ve eksenel yöndeki ısı iletkenlikleri  $\lambda_r$  ve  $\lambda_z$  eşit olarak alınmıştır ve programa bu şekilde tanımlanmıştır. Aşağıdaki modelde de görüldüğü gibi PP film ve elektrotlardan oluşan tabaka için radyal yöndeki ısı iletkenlik ( $\lambda_r$ ), PP filmin ısı iletkenliğine eşit kabul edilmiş ve eksenel yöndeki ısı iletkenlik (5.7) denklemi ile hesaplanarak programa tanımlanmıştır (Şekil 5.13).



**Şekil 5.13:** Kondansatör Bobinin FEMM 4.2’de Isıl Analiz İçin Eksenel Simetriden Yararlanarak Bir Yarısı İle Tanımlanması

a) FEMM 4.2’ye aktarılarak tanımlanan model; b) Üçgen sonlu elemanlardan oluşturulan sonlu elemanlar ağı.

Dört grup model için de bobin yüksekliği ve tur sayısına bağlı olarak ayrı ayrı modellemeler yapılmıştır.

## 2. Konveksiyonel ısı transferi

Eğer yüzey, çevresinden  $\Delta T$  miktarı kadar daha yüksek bir sıcaklıktaysa, güç  $P_{CONV}$  (konveksiyon yoluyla oluşan) aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$P_{CONV} = h_c \cdot A \cdot \Delta T \quad (5.37)$$

Burada parametre, A bölgesinin bir yüzeyinden çevredeki akışkana birleştirilen ısı transfer katsayısının kademesini tanımlar ve bu parametre yoğunluk ve viskozite gibi akışkan hızı ve kütle transfer özelliklerinin bir fonksiyonu olan; konveksiyon veya film katsayısı olarak tanımlanan  $h_c$  olarak ifade edilir.

$$h_c = \frac{\lambda \cdot Nu}{D} \quad (5.38)$$

Burada,  $\lambda$  havanın ısı iletkenliği;  $Nu$  deneysel Nusselt sayısı olarak adlandırılır.

$$Nu = B \cdot G_r^n \cdot Pr^p \quad (5.39)$$

Burada  $B$ ,  $G$ ,  $P$  düzeltici katsayılarıdır;  $n$  ve  $p$  deneysel veriler ışığında pratik olarak tüm sistemler için aynı kabul edilir ve  $B$  yalnızca maruz kalan kenarın biçimine bağılıdır,  $Pr$  prandtl sayısıdır.

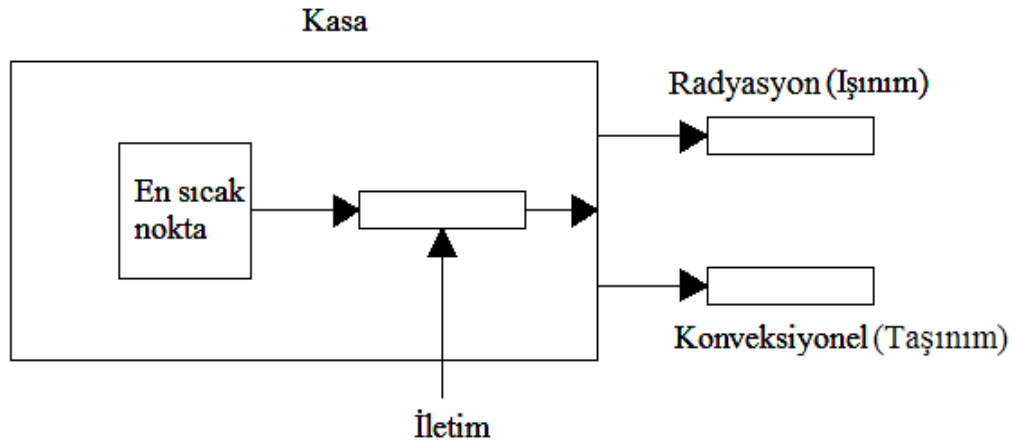
Grashof sayısı:

$$G_r = \frac{g \cdot \beta \cdot D^3 \cdot \Delta T}{\nu^2} \quad (5.40)$$

Burada  $g$  yerçekimi ivmesi,  $\beta$  sabit basınçta havanın genleşme katsayısı,  $\nu$  havanın kinematik viskozitesi,  $\Delta T$  yüzey ile dışarıdaki hava sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkıdır.

Konveksiyon katsayısı ise aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$h_c = \frac{\lambda}{D} \cdot B \cdot \frac{g^n \cdot \beta^n D^3 \cdot \Delta T}{\nu^{2n}} \cdot Pr^p \quad (5.41)$$



Şekil 5.14: Kondansatör Kutusundaki İç ve Dış Isı Akışı

### 3. Radyasyon (ışınım) yoluyla ısı transferi

Bu ısı transferi yalnızca bir yüzey ve onun çevresini arasındaki sıcaklık farkına bağı değil aynı zamanda mutlak sıcaklığa bağılıdır. Güç  $P_{RAD}$  radyasyondan dolayı  $A$  bölgesindeki  $T_S$  sıcaklığındaki bir yüzeyden  $T_\infty$  sıcaklığındaki bir ortama taşınır (Şekil 5.14).

$$P_{RAD} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_S^4 - T_\infty^4) \quad (5.42)$$

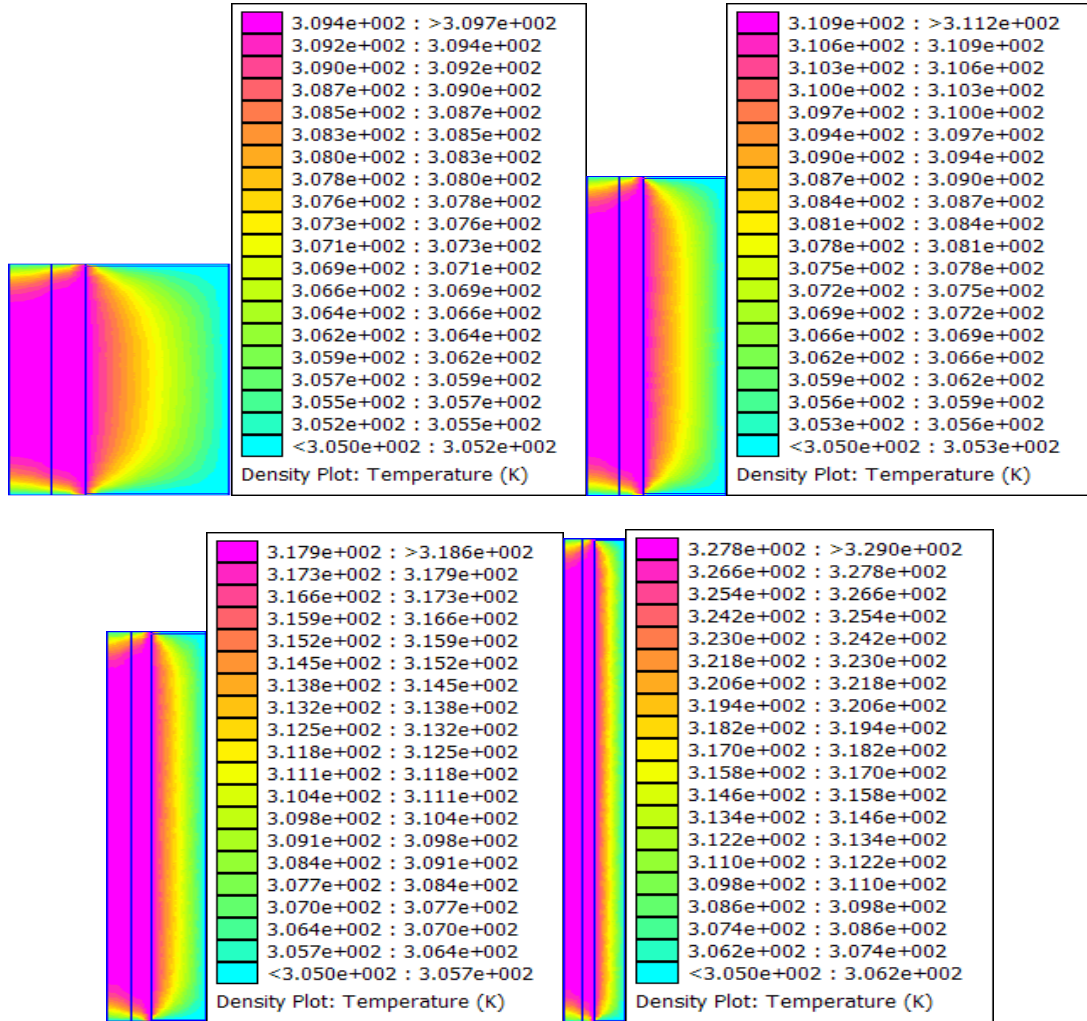
Burada  $\varepsilon$  yüzey salım gücü ( $0 < \varepsilon < 1$ ),  $\sigma$  Stefan-Boltzman sabiti ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$ ) olarak tanımlanır.

(5.42) eşitliğini (5.37) denklemi gibi düzenlersek;

$$P_{RAD} = h_{RAD} \cdot A \cdot \Delta T \quad (5.43)$$

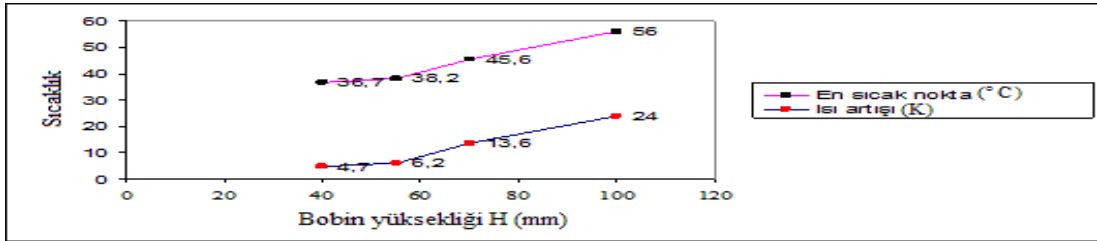
$$h_{RAD} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_S + T_\infty) \cdot (T_S^2 + T_\infty^2) \quad (5.44)$$

Bu ifadeden de görüleceği gibi radyasyon katsayısı  $h_{RAD}$  hem yüzey hem de ortam sıcaklığındaki artışla artar. Genel olarak konveksiyon katsayısı  $h_C$ , radyasyon katsayısı  $h_{RAD}$  gibi  $2 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'den yaklaşık  $4 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'e kadar değişir.



Şekil 5.15: Kondansatör Bobinleri İçin FEMM 4.2’de Elde Edilen Sıcaklık Dağılımları

Aynı kapasite değerine sahip ve aynı elektrik alan şiddetine maruz kalan kondansatörlerde sıcaklığın bobinin orta noktasından (hot point) başlayarak dışa doğru gittikçe azaldığı ve bobinin en sıcak noktasındaki sıcaklık değerinin, boyca daha uzun bir kondansatör bobininde daha fazla olduğu; dört farklı model üzerinde yapılan karşılaştırmalı benzetimlerle gösterilmiştir (Şekil 5.15). Bu sonuçlara göre daha küçük boyutlu bir kondansatörün Şekil 5.16’da görüleceği gibi daha az ısınacağı, bunun yanında daha düşük aktif kayıplarının olacağı ve aşırı basınca karşı daha etkili bir yapıya sahip olacağı göz önüne alınarak; daha küçük boyutlu bir kondansatör imalatının daha ekonomik bir ürün olmasının yanında daha uzun ömürlü ve ısınmadan dolayı patlama riski daha az olan bir ürün olacağı görülmektedir. Dolayısıyla hem tüketicilere hem de üreticilere sağladığı faydalar açısından küçük boyutlu kondansatörlerin teknolojik olarak birçok üstünlüğü barındırdığı açıktır.

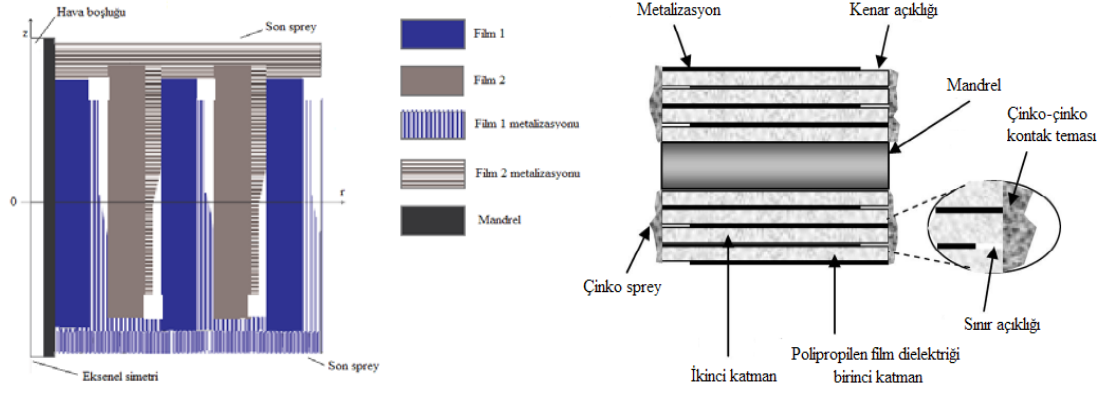


**Şekil 5.16:** Kondansatör Bobinleri İçin Sıcaklık Dağılım Eğrisi

#### 5.4.2 Metalize Polipropilen Film Kondansatörlerde Sıvı Dielektriğin Etkisi ve Elektrostatik Optimizasyon

Bu bölümde, metalize polipropilen film (MPPF) kondansatörlerin polipropilen ve elektrotların birlikte sarılmasıyla oluşturulan Şekil 5.17’de görülen kondansatör bobinine çinko kontak bölgelerinden beyan geriliminin (alternatif gerilimin etkin değeri) maksimum değerinin (1,1 katı [4]) uygulandığı andan itibaren kaydırma aralığı ve elektrot açıklığı arasında kalan bölüme vakumlu hava basılması veya emprenye yağ doldurulması durumlarında bobin içerisindeki potansiyel, elektrik alan dağılımı ve bunlara bağlı olarak eş potansiyel çizgileri ile elektrik alan vektörlerinin bobin eksenini boyunca oluşumu şematik olarak gösterilmiştir. Yine bu verilerden hareketle kondansatör kutularının katı dielektrik reçine yerine sıvı dielektrik yağ ile doldurulduğunda sıvı dielektrik yağın çinko sprej bölgelerinden kondansatör bobininin içerisindeki kaydırma aralığı ile elektrotlar arasında kalan bölgelere nüfus ederek daha iyi yalıtım sağladığı ve kondansatör bobininin delinme bakımından daha az zorlandığı görülmüştür [44].

## Elektrostatik alan analizi



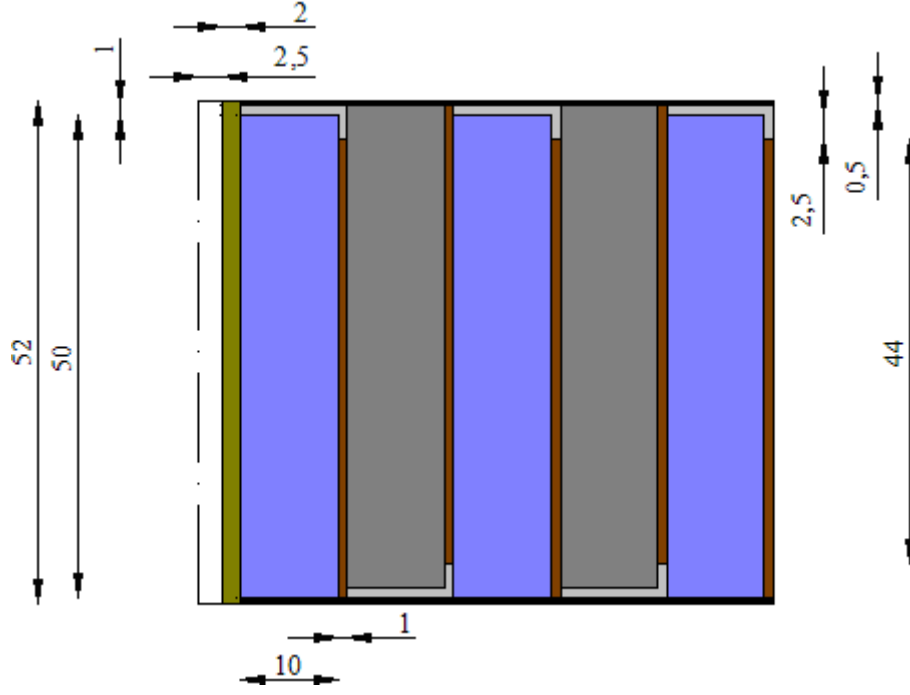
Şekil 5.17: Kondansatör Bobininin Çift Eksenli Görünümleri

Statik elektrik alan dağılımı, kondansatör bobininin ekseninden geçen bir düzlem üzerindeki izi üzerinde iki boyutlu olarak silindrsel koordinatlarda incelenebilir. Bu düzlem simetri eksenini çevresinde  $360^\circ$  döndürüldüğünde, tüm bobindeki üç boyutlu elektriksel zorlanma elde edilir. Dahası, simetri eksenine göre düzlemdeki izin sadece bir yarısı üzerindeki zorlanma da tüm zorlanmayı görmek bakımından yeterlidir. Eksenel simetri nedeniyle yine simetri eksenini çevresinde bu yarı geometri  $360^\circ$  döndürüldüğünde tüm bobindeki üç boyutlu elektriksel zorlanma görülür.

Bu yapıdaki problemleri bilgisayarda incelemek için kullanılan sayısal yöntemlerden birisi Sonlu Elemanlar Yöntemi'dir. Problem eksenel simetrik statik elektrik alan problemi olarak bu yöntemle tanımlanıp çözülebilir. Bu çalışmada A.G. Güç Kondansatörü'nün elektrik alan analizi, yine FEMM 4.2 Finite Element Method Magnetics, David Meeker ([dmeeker@ieee.org](mailto:dmeeker@ieee.org)), Copyright 1998-2006, açık lisanslı sonlu elemanlar programı ile Şekil 5.18'deki model referans alınarak yapılmıştır. Aşağıda çözümlenme sırasında atılan her adımın ve elde edilen sonuçların şekilleri verilmiştir (Şekil 5.18-5.25). Bu incelemeden amaç, bobinin atlama ve delinme bakımından elektriksel zorlanmasını incelemek, uygun geometri ve boyutlar konusunu araştırmak ve sistemin kapasite, yük, elektriksel deplasman gibi elektriksel özelliklerini çıkarmaktır [45]. Bu şekilde kondansatör bobininin elektriksel zorlanma durumu saptanmış ve sorunsuz kullanılabileceği görülmüş ve gösterilmiş olur. Bunun yanında, elde edilecek sonuçlardan hareketle kondansatör bobininin malzeme türü, geometrisi, boyutları ve yapısı için en uygun durum arayışı da yapılabilir [46, 47].



## Modelleme



**Şekil 5.18:** Simülasyon Modeli

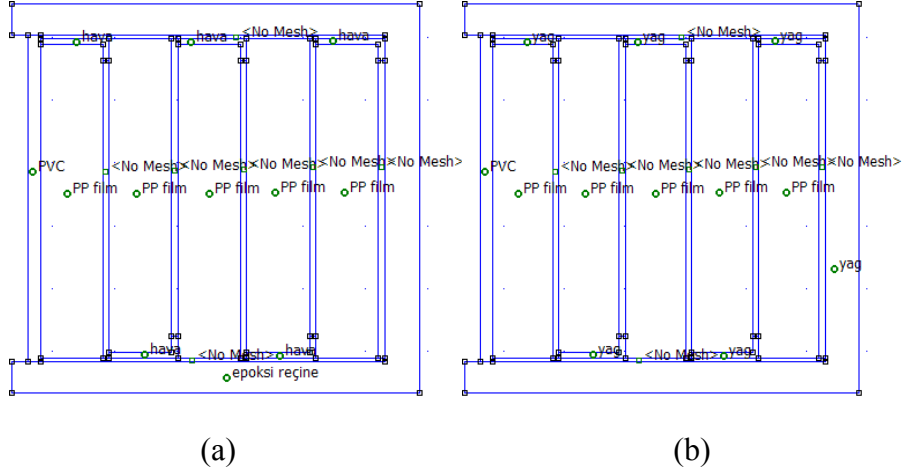
Ölçülendirme mm olarak yapılmıştır.

Sonlu elemanlar modeli oluşturulurken PP filmin (dielektrik) ve metalizasyon kısmının (elektrot) çok ince olması ve modelleme de görsel sonuçlar elde edilebilmesi için Tablo 5.4’de gösterildiği gibi gerçekte 10 mikron olan PP film kalınlığı 10 mm, 1 mikron olan elektrot genişliği ise 1 mm olarak modellenmiştir.

**Tablo 5.4:** Tasarım Modeli Karakteristik Değerleri

Anma Gerilimi (V)	$U_n$	400
Sınır açıklığı (Free Margin) (mm)	$M$	2,5
PP Film Kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )	$e_p$	10
Metalizasyon (Çinko) Kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )	$e_m$	1
Kaydırma Aralığı (winding offset) (mm)	$w_o$	1
PP film genişliği (mm)	$L$	50
Aktif Genişlik(mm)	$l$	44
Kondansatör bobini yüksekliği	$H$	52
Mandrel Çapı (mm)	$\Phi_0$	9
Mandrel PVC Kalınlığı (mm)	$P$	2
Son Sprey (Çinko) Kalınlığı (mm)	$Z$	0.5

Autocad ile çizilen bu model sonlu elemanlar programına aktarıldıktan sonra materyal ve iletken tanımlamaları yapılarak çözümlenir (Şekil 5.19). Kaydırma aralığına vakumla hava basılması (kuru tip) ve sıvı dielektrik yağ (castor oil (hint yağı)) doldurulması (yağlı tip) durumları için aynı model üzerinde Şekil 5.19’de gösterilen iki ayrı çözümlenme yapılarak simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır.



**Şekil 5.19:** Kondansatör bobininlerinin FEMM 4.2’de Elektrosatik Analiz İçin Eksenel Simetriden Yararlanarak Bir Yarısı İle Tanımlanması

a) Vakumla hava basılması; b) Dielektrik sıvı yağ empenye edilmesi

### Program girdileri

Maxwell denklemlerinden Fraday ve Gauss yasası temel elektrosatik alan denklemleridir.

Elektrosatik analiz için probleme Dirichlet ve Neumann sınır koşulları uygulanıp, aşağıdaki tanımlamalar da yapılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

*Malzeme tanımlamaları (dielektrik sabitleri):*

PP film için  $\epsilon_r = \epsilon_z = 2,2$ ; PVC için  $\epsilon_r = \epsilon_z = 3$ ; Hava için  $\epsilon_r = \epsilon_z = 1$

Yağ için  $\epsilon_r = \epsilon_z = 4,7$  (castor-oil 27 °C); Epoksi Reçine  $\epsilon_r = \epsilon_z = 4$

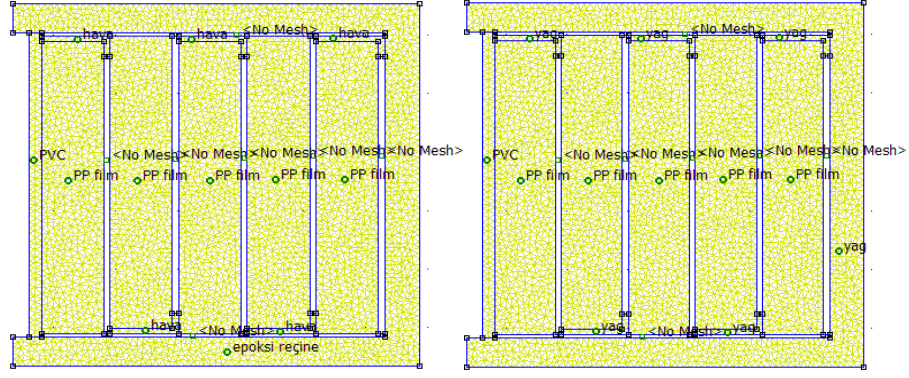
*İletkenler:*

TSE 60831-1’ün şartı gereğince güç kondansatörlerinin beyan geriliminin (Kondansatörlerin tasarımı için öngörülen alternatif gerilimin etkin değeri)  $1,1 \times U_N$  değerinde sürekli çalışması istenmektedir.

$$U_{\max} = \sqrt{2} \times 1,1 \times U_N \quad (5.45)$$

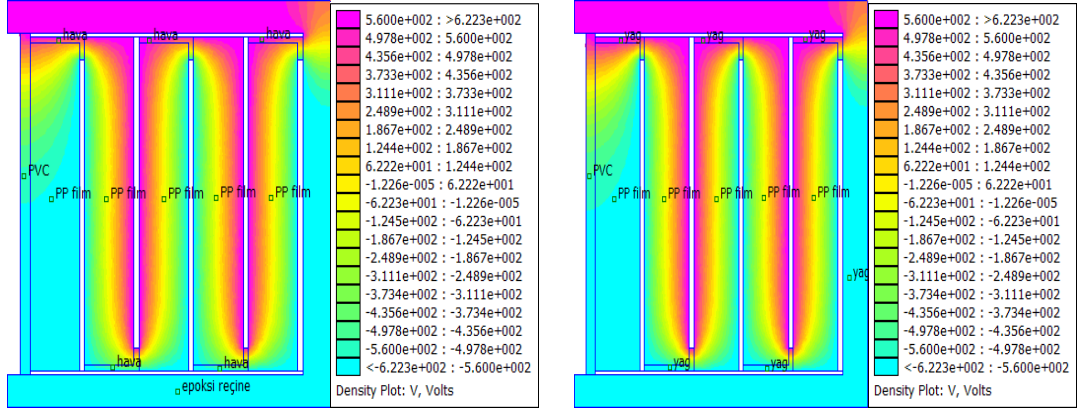
formülünden bulunan  $U_{\max}$  değeri sonlu elemanlar programındaki simülasyon modeli üzerinde çinko kontak teması bulunan son sprej ve elektrot yüzeylerine üstten pozitif alttan ise negatif yüklü olarak uygulanır.

$$U_{\max} = \sqrt{2} \times 1,1 \times 400 = 622,25 \text{ V}$$



**Şekil 5.20:** Üçgen Sonlu Elemanlardan Oluşturulan Sonlu Elemanlar Ağı

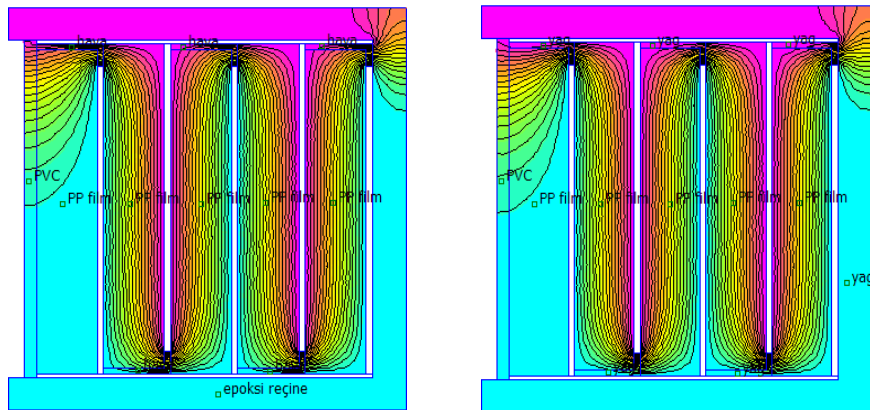
Programda Şekil 5.20'deki üçgen meshler (ağlar) elde edildikten sonra analizlere başlanabilmektedir.



**Şekil 5.21:**  $10^{-8}$  Doğrulukla Elde Edilen Potansiyel Dağılımları

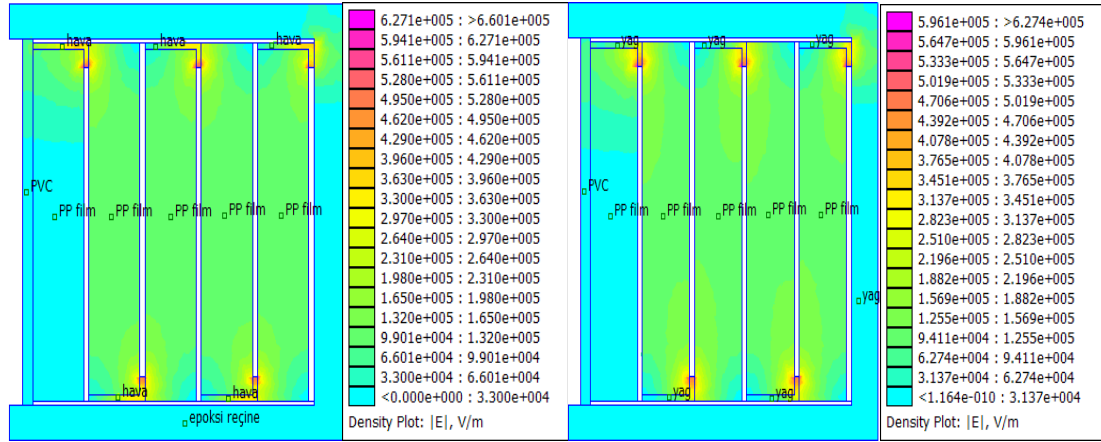
$$\epsilon_0 \text{ (vakum)} = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m alınmıştır.}$$

Potansiyelin elektrot ile polipropilen film arasındaki bölgede yoğunlaştığı, bu bölge dışında seyreltiği elektriksel zorlanmanın da buna bağlı olacağı görülmektedir (Şekil 5.21).



**Şekil 5.22:** Eşpotansiyel Çizgiler

Eş potansiyel çizgiler potansiyel dağılımının yoğunluğunu ve seyrini göstermesi bakımından önemlidir.(Şekil 5.22).



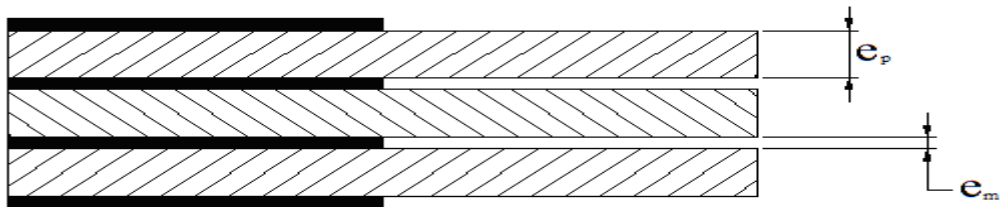
Şekil 5.23: Elektrik Alan Dağılımları

Tablo 5.5: FEMM 4.2’de Elde Edilen Elektrik Alan Şiddeti Değerleri

Model	Max. Elektrik Alan Şiddeti	Min. Elektrik Alan Şiddeti
Katı Dielektrik Reçine	$6,601 \cdot 10^5 \text{ V/m} = 6,601 \text{ kV/cm}$	$3,3 \cdot 10^4 \text{ V/m} = 0,33 \text{ kV/cm}$
Sıvı Dielektrik Yağ	$6,274 \cdot 10^5 \text{ V/m} = 6,274 \text{ kV/cm}$	$3,137 \cdot 10^4 \text{ V/m} = 0,3137 \text{ kV/cm}$

En büyük zorlanma elektrota yakın bölgede olmaktadır (Şekil 5.23). Bu bileşke zorlanma, delinme dayanımı  $E_d$  (Polipropilen) = 2680 kV/cm mertebelerinde olan yalıtım maddesi için delinmesine yol açmayacak veya başka bir deyimle rahatça dayanabileceği bir zorlanmadır [48]. Tablo 5.5’den görüleceği gibi aralarında büyük fark olması nedeniyle delinme bakımından kritik bir durum söz konusu değildir. Güç kondansatörü bu iç zorlanma koşullarında sorunsuzca uzun ömürlü olarak çalışabilir.

### Karşılaştırma analizi



Şekil 5.24: Karşılaştırma Analizi İçin Örnek Bir Model

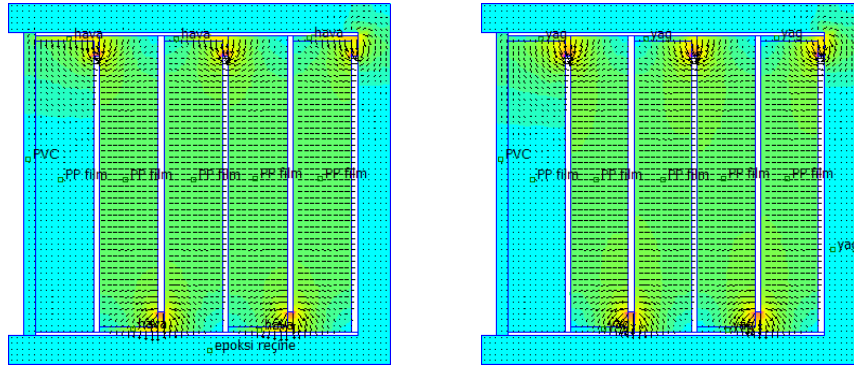
$e_p$ : PP kalınlığı;  $e_m$ : Elektrot kalınlığı;  $\epsilon_p$  : Polipropilenin dielektrik katsayısı;  $\epsilon_y$  : Yağın dielektrik katsayısı;  $\epsilon_h$  : Havanın dielektrik katsayısı;  $E_y$ : Yağ boşluğunda oluşan elektrik alan;  $E_h$ : Hava boşluğunda oluşan elektrik alan;  $E_o$ : PP film karşıt elektrik alanı

$\varepsilon_y = 5,5$  (PCB için);  $\varepsilon_y = 4,7$  (Castor oil (hint yağı) için, 27 °C);  $\varepsilon_y = 2,2$  (PXE veya M-oil için)

$$E_y = \sqrt{\frac{\varepsilon_p^2 e_p}{\varepsilon_y e_m}} E_o \quad (5.46)$$

$$E_h = \sqrt{\frac{\varepsilon_p^2 e_p}{\varepsilon_h e_m}} E_o \quad (5.47)$$

$\varepsilon_y > \varepsilon_h$  olduğundan sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen Şekil 5.23'den ve Tablo 5.5'den de görüldüğü gibi  $E_y < E_h$  dür.



**Şekil 5.25:** Elektrik Alan Vektörleri

Elektrik alan vektörleri elektrik alan dağılımının yoğunluğunu ve seyrini göstermesi bakımından önemlidir (Şekil 5.25).

## 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

İnsanlığın iki metal tabaka arasına bir yalıtkan malzeme yerleştirerek icat ettiği kondansatörler, büyük bir sanayi alanı oluşturmuş ve günümüzde milyonlarca doların döndüğü bir pazar haline gelmiştir. Öyle ki farklı uygulamalar için farklı büyük alt kollara ayrılmış, pazar içinde birçok pazar oluşturmuştur. Kondansatör sanayi, diğer teknolojik gelişmelerden fazla etkilenmemiş, yapımında kullanılan malzemelerin çeşitliliğinden çok yapı ve fiziksel boyutunda gelişmeler görülmüştür.

Şehir şebekelerinde gelebilecek parazit sinyallerin durdurulmasında ve değişen sinyallerin istenmeyen kısımlarının filtre edilmesinde AA devrelerde geçiş kondansatörleri kullanılmaktadır. Güç kondansatörleri teknolojisindeki gelişmeler ülkemizde güç kondansatörleri üreten firmalar tarafından sürekli takip edilse de çoğu firma tarafından bu teknolojiler ya maddi yetersizlikler ya da alışlagelmişin dışına çıkmama politikası gereği kullanılmamaktadır.

Son yıllarda özellikle ar-ge alanında ülke çapında yapılan atılımlar sonucunda birçok firma, bilimsel çalışmalara sağlanan teşviklerden faydalanmak ve bu yolla mevcut üretim teknolojilerini de geliştirmek amacıyla araştırma geliştirme çalışmalarına eskiye oranla daha fazla ağırlık vermiştir.

Çalışmada ülkemizde halen eski teknolojilerle üretimi gerçekleştirilen güç kondansatörlerinin mevcut elektrik tesislerinde meydana getirdiği olumsuzluklar dikkate alınarak yurt dışı firmalarınca üstün teknolojilerle üretimi gerçekleştirilen metalize polipropilen film (MPPF) güç kondansatörlerinin katalog taramaları yapılarak en uygun tasarım modelleri çıkarılmıştır.

Özellikle kendi kendini yenileme olayı (otojenerasyon, self healing) metalize polipropilen film teknolojisi ile üretimi yapılan güç kondansatörleri üzerine araştırma yapan birçok araştırmacının çalışmalarına konu olmuştur. Bunun yanı sıra kondansatörlerin ısı ve elektrostatik analizine dayalı araştırmalar da birçok kuruluş ve araştırmacı tarafından yapılmakta ve kondansatörlerin farklı fiziksel yapı ve koşullar altında davranışlarının belirlenmesine çalışılmaktadır.

Çalışmada gerçekleştirilen ısı ve elektrostatik analizler sonucunda, metalize polipropilen teknolojisiyle üretilen güç kondansatörlerinin teknolojik üstünlükleri yapılan karşılaştırmalı analizlerle gösterilmiştir.

Isıl analizlerde, kondansatör bobinleri üzerinde yapılan araştırma sonucunda kondansatör bobinin yüksekliğinin artmasıyla (film genişliğinin artması) kondansatör bobininin en sıcak noktasındaki (hot point) sıcaklık değerinin gittikçe arttığı görülmüştür ki bu sonuç bize küçük boyutun avantajlarını bir kez daha göstermiştir.

Elektrostatik analizlerde ise, yine kondansatör bobini üzerinde yapılan karşılaştırmalı analizler sonucunda, katı dielektrik reçine yerine sıvı dielektrik yağ kullanımının üstünlükleri ispatlanmıştır. Kondansatör bobininin elektrot sınır açıklığı ve kaydırma aralığı arasında kalan bölümlerine sıvı dielektrik yağın çinko temas alanları içerinden sızarak nüfus etmesi ile sıvı dielektrik yağın, bu bölümlere vakumlu hava basılmasına oranla daha iyi bir yalıtım sağladığı elektrostatik yasalarına göre yapılan elektriksel zorlanma ve ömür analizleri ile gösterilmiştir.

Güç kondansatörleri kompanzasyon sistemlerinin olmazsa olmaz elemanları niteliğindedir. Bu nedenle sürekli yeni teknolojiler ışığında güncellenmesi tüketicilerin memnuniyetini daha da artıracaktır. Çalışmada söz edilen teknolojiler yeni yatırımları gerektirmesinin yanı sıra üreticilerin mevcut sistemlerini güncellemeleri yönünde de bir öneri niteliğindedir.

Çalışmada iki boyutlu olarak yapılan sonlu elemanlar yöntemi analizleri piyasada lisanslı olarak pazarlanan birçok programla üç boyutlu olarak da gerçekleştirilebilir. Bunun yanı sıra çalışmada, dielektrik sıvı ve katı dielektrik reçine kullanımı için gerçekleştirilen elektrostatik analizler, SF<sub>6</sub> gazının kullanımı durumunda ortaya çıkacak etkileri yönünden de incelenebilir.

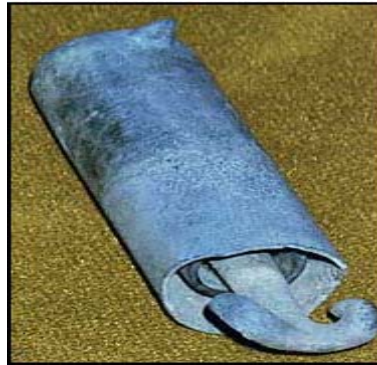
## KISIM 2

### 1. GİRİŞ

#### 1.1 Tanım

Havai hatların tesisinde kullanılan iletkenlerin, direklere bağlantısını sağlayan ve iletkenleri hem taşımaya hem de direklere, toprağa ve diğer iletkenlere karşı yalıtıma yarayan şebeke malzemelerine izolatör denir.

İzolatörler çoğu kişinin bildiğinden çok daha önce bir geçmişe sahiptir. Fransız mühendis Claude Chappe'nin 1792 yılında ilk görsel telgrafi ortaya çıkarmasından sonra İlk basit telgraf iletim hattı 1793 yılında Fransa'da Paris ve Lille arasında yapılmıştır. Bu yapım sırasında telgraf tellerini toprağa ve diğer iletkenlere karşı yalıtım için izolatörlere gerek duyulduğu düşünülmektedir. 1837 yılında Cooke adlı bir öğrenci ve Charles Weatsone'un katkılarıyla ilk telgrafın icat edilmesinden sonra izolatörler ilk olarak 1844'de Washington-Baltimore, Maryland arasına çekilen ilk ticari telgraf hatlarında kullanılmıştır. İlk izolatörler Balmumuyla ıslatılmış malzemelerden imal ediliyordu, 1867 yılında Şekil 1.1'de görülen David Brooks patentiyle anılan sülfür dolgulı cam şişelerden oluşan izolatörlerin imal edilmesiyle yeni bir çığır açılmıştır.



**Şekil 1.1:** David Brooks Patentiyle Anılan İlk İzolatör



Gerek yüksek gerilim gerekse alçak gerilim havai hat tesislerinde izolatörler çok büyük önem taşırlar. Ayrıca kapalı şalt tesislerinde ve muhavvile merkezleri ve transformatörlerde de geçit izolatörü kullanılır. Günümüzde yurdumuzda her çeşit izolatör imal edilebilmektedir.

İzolatörler dirençleri çok büyük, yüksek derecede sıcaklığa dayanıklı porselen veya cam, silikon ve epoksi reçineden imal edilirler.

İzolatörler Tablo 1.1'den görüleceği gibi kullanılış maksatlarına ve gerilimlerine göre çok çeşitli olarak yapılırlar.

Bunların en önemlileri şunlardır [1]:

**Tablo 1.1:** Kullanılış Amaçlarına ve Gerilimlerine Göre İzolatörler

Alçak gerilim mesnet izolatörleri "havai hat"	Telefon mesnet izolatörleri
Orta yüksek gerilim mesnet izolatörleri "pin tipi"	Havai hat zincir izolatörler
Orta yüksek gerilim mesnet izolatörleri "dolu tip"	Havai hat çubuk izolatörleri "Dolu tip"
Dahili tip mesnet izolatörleri (1kV,10-20-30 kV)	Harici tip mesnet izolatörü "10-20-30 kV"
Harici tip seksiyoner itici izolatörleri (10-20-30 kV)	
Trafo geçit izolatörleri "bushing" (1-10-20-30 kV)	Geçit İzolatörleri "Dahilden dahile hariçten harice"
Dahili ve harici kablo başlık izolatörleri (10-20-30 kV)	Orta-yüksek gerilim sigorta ve gövdeleri

### İzolatörlerde aranacak özellikler

- Mekanik dayanımları iyi olmalıdır.
- Kir tutmamalı, üzerlerine gelebilecek kirleri ve tozları tutmayıp yağmur sularıyla kolayca rahatça bırakabilmelidir.
- Yapıları sağlam olmalıdır.
- Yalıtkanlığı yüksek olmalıdır.

İzolatörler TS-IEC ve DIN normunda belirlenen özelliklere uygun olarak imal edilirler. Standartlara uygun olarak çap, boy, etek yüksekliği, ağırlığı gibi teknik ölçüleri ve çekme, kopma dayanımları gibi mekanik dayanımları ile elektriksel özellikleri belirlenir.

İzolatörlerden istenilen başlıca elektriksel değerler şunlardır:

- Anma gerilimi
- Yaşta dayanma ve atlama gerilimleri
- Maksimum sürekli işletme gerilimi
- Yağda delinme gerilimi
- Doğru akımla yapılan + ve – şok dayanma gerilimleri

Havai hatlarda izolatörler traverslere özel olarak yapılmış A–B–C–D diye adlandırılan izolatör demirleri yardımıyla bağlanırlar. Bu demirler St 37 adıyla bilinen çelikten yapılmalıdır. İzolatör demirleri genellikle yüksek gerilimde çimento harcı ile izolatörlere tutturulurlar, alçak gerilimde jüt veya sülyen kullanılabilir [1].

İzolatör demirlerinin çimento harcı ile tutturulmasında çimentonun zamanla genişerek porselen sıır'ı çatlatıp toprak kısa devreleri meydana gelmesine engel olmak için doldurulan çimentonun hava ile temasına mani olan araldit, protolin ve benzeri maddelerle çimento harcının üzeri kaplanır.

Porselen geçit izolatörlerinin hem elektriksel hem de mekaniksel açıdan olumsuzlukları içermesi ve bağlantı elemanları ve konnektör kilit sistemi için gerekli metal elemanların porselenin içine yerleştirilememesi gibi nedenlerden dolayı gelişmiş ülkelerde ana yalıtım malzemesi porselen olan geçit izolatörleri yerine ana yalıtım malzemesi organik reçine olan fiş tipi geçit izolatörleri (plug-in type bushing) kullanılmaktadır.

Bilindiği üzere izolatörler; elektrik tesislerinde değişik potansiyeldeki kısımların elektriksel bakımından yalıtımına ve mekanik bakımından da bağlantılarının yapılmasına yararlar. Üç değişik izolatör tipinden biri olan geçit izolatörleri (geçiş izolatörü, bushing); bir duvar veya bir tank gibi bir bölme içinden bir veya birkaç iletkenin geçmesini sağlayan ve bu iletkenleri bölmeden yalıtan bir düzendir [2]. Belirgin uygulama alanları; transformatörler, yağlı kesiciler, kondansatörler ve diğer işletme araçlarıdır [3]. Ana yalıtım malzemesine göre isimlendirilen geçit izolatörleri (bushingler) içinde porselen ana yalıtımlı olanları ülkemizde sıklıkla kullanılmaktaydı; fakat porselen geçit izolatörlerin;

- Porselenin kırılğan yapıda olması
- Mekanik mukavemetinin (dayanımının) zayıf olması
- Boyut açısından uygun olmaması
- Standartlarda belirtilen ölçü hassasiyetinde boyutların elde edilme zorluğu
- Üretim zorluğunun olması, üretim maliyetinin yüksek olması ve üretim süresinin uzun olması
- Bağlantı elemanları ve kablo başlığı kilit sistemi için gerekli metal elemanların porselen içine yerleştirilememesi
- Isıl şoklama dayanıklılığının olmaması
- Elektriksel bağlantılarının uygun olmaması
- Alan düzenleyici bir elemanı içermemesi
- Delinme geriliminin sınırlı olması

gibi olumsuzlukları içermesi ve gelişmiş ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de aygıtların (transformatör, kesici, motor) kabloları ve kabloların birbirine bağlantılarında kablo başlıklarının kullanılması için resmi elektrik iletim ve dağıtım şirketlerinin şartnamelere koyduğu koşul nedeniyle içindeki ana yalıtım malzemesi porselen olan geçit izolatörleri yerine organik reçine yalıtımlı geçit izolatörlerinin kullanılmasına yol açmıştır. Bu tür izolatörlerin üretimi ülkemizde sınırlı sayıda yapılmaktadır. Çoğu transformatör üreticileri; Fransa, Almanya, Belçika, ABD ve Kanada gibi ülkelere bu tür izolatörleri ithal ederek kullanma zorunluluğunda kalmaktadırlar.

Ülkemizde Çanakkale Seramik, Bortrans, Alce, Emek Elk., Ankara Elektrik, Elimsan, Ede v.b. firmalarınca porselen ana yalıtım malzemeli geçit izolatörleri üretilmiştir [4, 5]. Organik reçine yalıtımlı geçit izolatörlerinin üretimi ülkemizde çok az yapılmaktadır. Resmi elektrik iletim ve dağıtım şirketlerinin şartnamelere koyduğu koşul nedeniyle transformatör üreticileri tarafından çoğunlukla yurt dışından sağlanmaktadır. Organik reçine yalıtımlı geçit izolatörleri, transformatör imalatçılarının ihtiyaçlarını karşılamada önemli bir yere sahiptir.

## 1.2 AMAÇ

Çalışmada TS 595 EN 60137 Md. 3.12’de ve TS EN 50181 Md. 3.1’de tanımlanan dökme veya kalıplanmış reçine yalıtımlı (epoksi reçineli) fiş tipi geçit izolatörlerinin (plug-in type bushing) tasarımı ve yapım sürecine değinilecektir [6, 7].

Elektriksel ve fiziksel modelin oluşturulup bu modele yönelik temel verilerin belirlenmesi sürecinde tasarım aşamasında aşağıdaki sıra izlenecektir.

1. Ana yalıtım malzemesi olarak kullanılacak organik reçine malzemesinin,
  - Dielektrik sabitlerinin
  - Delinme geriliminin
  - Yüzeysel atlama dayanımının
  - Camlaşma sertliğini muhafaza ettiği sıcaklığı ve kazandığı sıcaklığı ile çalışma ortamına göre kimyasal analizleri
2. Elektriksel Tasarım
  - Atlama ve delinme bakımından boyutlandırma ve biçimlendirme
  - Elektriksel zorlanma analizi
3. Isıl (Termal) Tasarım
  - Geçit izolatörünün farklı kısımlarının genleşme bakımından analizi
  - Isıl dayanım analizleri
4. Mekanik Tasarım
  - Geçit izolatörünün çekmeye, eğmeye ve burmaya karşı dayanımının belirtilmesi
5. Döküm kalıp tasarımlarının yapılması
6. Prototiplerin tasarlanması
7. Tasarımın gözden geçirilmesi

Temel verilerin elde edilebilmesi için uygulanacak yöntemler:

Elektriksel tasarım ile ilgili olarak; atlama ve delinme bakımından boyutlandırma ve biçimlendirme için elektriksel zorlanma analizi yapılacak, statik analiz için Maxwell’in elektromanyetik yasalarına (denklemlerine) göre elektrostatik analizler

yapılacak ve bu amaçla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, yüzeysel elektrik alan dağılımları farklı boyut ve biçimler için çıkartılacaktır.

Isıl (Termal) tasarım ile ilgili olarak; ısıl şok davranışı incelenecek ve Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak ısıl dayanım deneyi uygulanacaktır.

Mekanik tasarım ile ilgili olarak; geçit izolatörünün çekmeye, eğmeye ve burmaya karşı dayanımının belirlenmesi için, ilgili standardın öngördüğü mekanik dayanma deneylerinin ortak sonuçları kullanılacaktır. Ek D'de Şekil D.2 ve Şekil D.3'de numune bir izolatöre uygulanan mekanik deneyleri gösterilmiştir. Tedaş teknik şartnamesinde belirtilen ve epoksi reçine izolatörlere yapılması gereken deneyler yine Ek D'de verilmiştir [8].

Çalışmanın ikinci bölümünde, izolatörler hakkında genel tanımlamalar verilmiştir. İzolatörlerde oluşan yüzey kirlenmesi ve izolatör arızalı ile izolatörlere uygulanan bakım yöntemleri de bu bölümde işlenmiştir. Ek E'de Türk Standartları Enstitüsü'nün TS 595 EN 60137 numaralı standartında belirtilen ve dökme veya kalıplanmış reçine yalıtımlı geçit izolatörlerine yapılması gereken deneyler verilmiştir [6].

Üçüncü bölümde, izolatör ürün grubu tanıtılmıştır [4, 5] Tasarımı yapılacak olan epoksi reçineli (dökme yalıtımlı) fiş tipi geçit izolatörleri de bu bölümde ilk olarak işlenmiştir.

Dördüncü bölümde, çalışmanın ana konusu olan epoksi reçineli (dökme yalıtımlı) fiş tipi geçit izolatörleri her yönüyle incelenmiştir. Temel hammadde karakteristikleri bu bölümde detaylı olarak ele alınmıştır.

Beşinci bölümde yeni tasarım modeli ele alınmış ve sonlu elemanlar yöntemi analizleri gösterilmiştir. Ek A'da TS EN 50181'de tanımlanan fiş tipi geçit izolatörü tasarım yöntemi verilmiştir [7]. Dışa konik biçimli tip ve içe konik biçimli tip ayrıntıları yine Ek A'da gösterilmiştir. Ek B'de çalışmada tasarımı gerçekleştirilen epoksi reçineli fiş tipi geçit izolatörünün ayrıntıları verilmiştir. Yağ daldırmalı transformatörlerde kullanılan fiş tipi geçit izolatörlerinin ayrıntılı montaj şemaları yine Ek B'de işlenmiştir. Ek C'de ise TS 595 EN 60137 Md.3.21'de tanımlanan fiş tipi geçit izolatörleriyle birlikte kullanılan kablo başlıklarının ayrıntıları verilmiştir. Kablo başlıklarının ayrıntılı montaj şeması da yine Ek C'de işlenmiştir.

## 2. GENEL TANIMLAMALAR

### 2.1 İzolatörlerin Seçimi

İzolatörlerin seçiminde aşağıdaki özelliklerin bilinmesi gerekir:

- İletim gerilimi
- Hat güzergahı
- İletken özelliği
- Kullanma açısı
- Yüzey kirlenmesi

#### **İletim gerilimi**

İletim gerilimi, kullanılacak olan izolatörün boyutunu belirler. İdeal bir izolatör boyutunu seçmek için iletim geriliminin bilinmesi gerekir; çünkü gerilim artıçça izolatör boyutu artmaktadır.

#### **Hat güzergahı**

Enerji hattının izleyeceği güzergah boyunca hava şartlarının ve çevresel etkilerin (havanın kiri, tozu, nemi ve güzergah boyunca sanayi bölgesinden geçip geçmeyeceği, geçecekse bu işletmelerin havaya saldıkları atıkların cinsi) izolatörü ne derecede etkileyeceği iyi tespit edilmelidir.

#### **İletken özelliği**

İletimde kullanılacak kesite göre izolatör kopma kuvveti seçilmelidir. Bu kuvveti karşılayabilecek özellikte izolatör seçilmelidir.

#### **Kullanma açısı**

Bu açının izolatörün gergi kuvvetini etkilediği için kataloglardan iyi seçilmesi gerekir. Ayrıca hava şartlarının çalışması ve ark atlama gerilimlerine etki ettiği göz önünde bulundurulmalıdır. Yapılan çalışmalarda yaşta atlama gerilimleri şu şekilde bulunmuştur [2].

$$U_{yaş} = 1,1(2U + 10) \text{ kV} \quad (2.1)$$

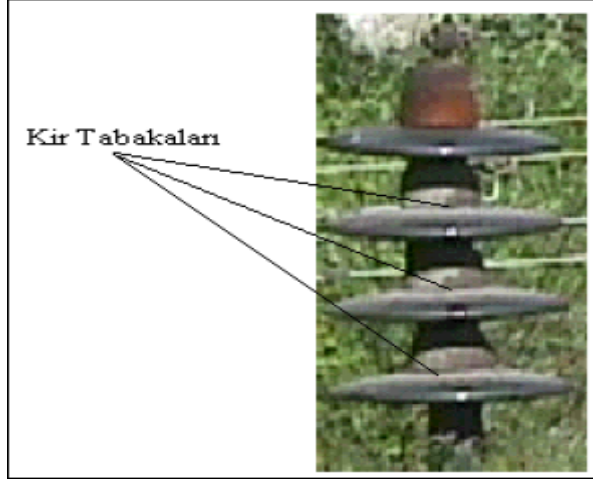
Burada,  $U_{yaş}$  yaşta atlama gerilimi,  $U$  İşletme gerilimidir.

### Yüzey kirlenmesi

İzolatörün yalıtkanlık yeteneğini, nem ile birlikte izolatörün yüzeyinde oluşan kirlenme etkiler (Tablo 2.1). Deniz kıyılarında tuzlu su, sanayi alanlarında çeşitli tuzlar, haddehanelerin bulunduğu yerlerde demir tozları, kum ocağı alanlarında kum taneleri ve tarım alanlarında havada uçan gübre tozları nemli ortamda izolatör yüzeyine yapışarak iletkenliğe neden olabilir [2].

**Tablo 2.1:** Yüzeylerin Kirlenme Düzeylerine Göre Ortamları

Yüzey Kirlenme Düzeyi	Ortamın Tanımı
Hafif kirlenme	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sanayi tesisi bulunmayan ısıtma tesisi ile donatılmış ve konut yoğunluğunun az olduğu alanlar</li> <li>- Sanayi tesisleri ve konut yoğunluğu az olan, ancak çok rüzgar ve/veya yağmur alan alanlar</li> <li>- Tarım alanları</li> <li>- Dağlık alanlar</li> <li>- Tüm bu alanlar denizden en az 10-20 km. uzaklıkta bulunmalı ve denizden esen rüzgarlara açık olmamalıdır.</li> </ul>
Orta kirlenme	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Önemli ölçüde kirlenmeye yol açmayan sanayi tesisleri ve/veya ısıtma tesisleri ile donatılmış ve konut yoğunluğu ortalama ortalama değerlerde olan alanlar</li> <li>- Sanayi tesisleri ve konut yoğunluğu yüksek olan, ancak sır rüzgar ve/veya yağmur alan alanlar</li> <li>- Denize çok yakın olmayan ancak denizden esen rüzgarlara açık olan alanlar</li> </ul>
Ağır kirlenme	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sanayi tesislerinin çok yoğun olduğu, kirlenmeye yol açan ısıtma tesislerinin çok yoğun bulunduğu büyük şehirlere yakın alanlar</li> <li>- Denize yakın veya denizden her zaman esen oldukça kuvvetli rüzgarlara açık olan alanlar</li> </ul>
Çok ağır kirlenme	<ul style="list-style-type: none"> <li>- İletken tozların ve özellikle iletken birikintiler oluşturan sanayi dumanının etkisinde bulunan sınırlı alanlar</li> <li>- Denize çok yakın veya deniz suyuyla temasta bulunan, çok kuvvetli ve kirlenmeye yol açan deniz rüzgarlarına açık olan sınırlı alanlar</li> <li>- Yoğun kum ve tuz taşıyan kuvvetli rüzgarlara açık olan, düzenli yağışın etkisinde bulunan ve uzun süre yağmur alamayan çöl alanlar</li> </ul>



**Şekil 2.1:** Kir Tabakasıyla Kaplı İzolatör

Kirli bir izolatör yüzeyinde boşalmanın yayılmasını ve atlamayı birçok faktör etkilemektedir (Şekil 2.1). Bunlar içinde en önemlileri; deşarj ucunun polaritesi, deşarj köklerindeki gerilim düşümleri, toplamı ve etkin kir birim uzunluk direncinin değişimidir [9].

## 2.2 İzolatör Arızaları

İzolatörlerde kısa devreye yol açan arızalar başlıca üç nedenle meydana gelmektedir.

### 1. İzolatörlerin delinmesi

İzolatör elektrik mekanik ve ısı zorlanmalar sonucu normal fonksiyonunu yapamaz hale gelebilir. Dielektrik delinme olarak bilinen bu tür arıza daha çok imalat hatası ile ilgili olup seyrek meydana gelir [10].



(a)



(b)

**Şekil 2.2:** Hasara Uğramış Bir Porselen İzolatör

a) Üst kısmı hasar uğramış bir porselen izolatör; b) Alt kısmı hasara uğramış bir porselen izolatör





Atlama olayının teorik analizi için ise Şekil 2.3'de gösterilen model göz önüne alınabilir. Bu modelde arkın elektrotların birinden başlayarak bir doğru boyunca yayıldığı, ark boyunca akım sızmasının olmadığı ve arkla seri kirli bölgeye akımın yalnızca ark kökünden yayıldığı kabulleri yapılabilir. Bu modelden,

$$V = V_a + V_R \quad (2.2)$$

bağıntısı yazılabilir.

Burada,  $V_a$  ark ucundaki gerilim düşümü,  $V_R$  arka seri kirli bölgenin gerilim düşümüdür.

$V_a$ , ark boyu  $x$  ve akımın  $i$  bir fonksiyonudur. Ark boyunca gerilim düşümü için,  $E(i)$  ark gradyanı ve  $V_{ca}$  anot ve katot gerilim düşümleri toplamı ise,

$$V_a = x.E_{(i)} + V_{ca} \quad (2.3)$$

şeklinde bir bağıntı yazılabilir. Ark gradyanı için genellikle,  $A$  ve  $n$  sabit katsayılar olmak üzere,

$$E_i = A.i^{-n} \quad (2.4)$$

formunda bir bağıntı kullanılmaktadır.  $A$  ve  $n$  sabitlerinin değerleri arkın tuttuğu ortama göre değişmektedir. Havada tutuşan bir ark için  $A = 63$  ve  $n = 0,7$  olur. Arkın buhar atmosferinde tutuşması halinde deneysel gradyant akım karakteristiği  $A = 518$  ve  $n = 0,275$  alınabilir.

Arka seri kirli bölgenin  $V_R$  gerilim düşümü, kir bölgesi direnci  $R$  ise,

$$V_R = R.i \quad (2.5)$$

olur.  $R$  direnci için genel halde tam bir analitik ifade bulmak zordur.  $R$  direncinin ark

boyu ( $x$ ) ve bu bölgede açığa çıkan ısı enerjisinin ( $w = \int_0^t Ri^2 dt$ ) ıslak kir filminde

değişmelere yol açması nedeniyle  $w$ 'nın fonksiyonu,  $R = R(x, w)$ , olacağı açıktır.

$R$  direncinin artan ark boyu ile azaldığı ( $\frac{\partial R}{\partial x} < 0$ ) düşünülebilir.  $i \left| \frac{\partial R}{\partial x} \right| = ir$ 'ye etkin

kir gradyanı denilmiştir.  $R$  direncinin  $w$  enerjisine bağlılığı çeşitli şekillerde olabilir.

Pratik şartlarda deşarj sonrası akımın fazla ve buharlaşmanın daha etken oluşu nedeniyle  $\frac{\partial R}{\partial x} > 0$  alınması düşünülebilir. Böylece (2.2) denklemi

$$V = xAi^{-n} + V_{ca} + iR(x, w) = f(x, i, w) \quad (2.6)$$

olur. 2.6 denkleminde *atlama denklemi* adı verilmiştir.

Şekil 2.4’de epoksi reçineli bir geçit izolatöründe kirlenmeden dolayı oluşan atlama olayı görülebilmektedir.



**Şekil 2.4:** Geçit İzolatörü Yüzeyinde Oluşan Kirlenme Atlaması

İzolatörlerin işletme şartlarında davranışlarını ölçmek için birçok deney yöntemi geliştirilmiş ve kullanılmaktadır. Bu deney yöntemleri doğal ve yapay olmak üzere sınıflandırılabilir. Yapay deneyler laboratuvarlarda, doğal deneyler ise doğal işletme şartlarında yapılmaktadır. Doğal ve yapay deneyler zaman alıcı, masraflı ve oldukça pahalı tesisleri gerektirmektedir. Bu nedenlerle, bir izolatörün kirlenme atlama davranışını analitik yöntemle ölçme fikri ortaya çıkmıştır. Analitik yöntemde kirli izolatör yüzeyinde tutuşan boşalmaların atlama yapabilme şartları matematiksel bağıntılar ve bilgisayar kullanılarak bulunmaya çalışılır

Kirli izolatörlerin atlama davranışlarının analitik yolla ölçülmesi izolatör imalat ve tasarımında ve güvenilir bir yalıtım koordinasyonunda oldukça önemlidir. Atlama olayını çok sayıda faktör etkilediğinden analitik hesaplamalarda bazı zorluklar ortaya çıkmaktadır. İzolatörün karmaşık şeklinin önemli ölçüde sebep olduğu bu zorluklar bazı basitleştirici kabullerin yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Ancak, kabullerin

yapılmasında problemin fiziksel karakterinin mümkün olduğu kadar bozulmamasına önem verilmelidir [10-15].

### **2.3 İzolatörlerin Bakım Yöntemi**

Çoğu durumlarda, izolatörlerin doğru tasarlanması kirlenme nedeniyle meydana gelen bozulmaların en aza indirgenmesini sağlamakla birlikte, kirlenmenin aşırı boyutlarda olduğu durumlarda ya da kirlilik seviyesine göre tasarlanmamış ve öteden beri çalışmakta olan cihazlar üzerinde ek bakım işlemlerinin yapılması gereklidir [10-14]

İşletmelerde kullanılan yöntemler şunlardır:

#### **1. Periyodik elle temizleme (enerji kesilerek)**

Kirlilik derecesi az olan ve yıllık bakım sırasında uygulanması olası olan yerlerde kullanılır.

#### **2. Aşındırıcı madde püskürterek temizleme**

Bazı durumlarda çimento kirlerinin temizlenmesi için kullanılır. Aşındırıcı madde olarak kireç tozu kullanılmaktadır; fakat bu yöntem fazla yaygınlaşmamıştır.

#### **3. Su ile yıkama**

Bu yöntem ayrıntılı deneyler ve ekonomik incelemelerden sonra yürürlüğe konulmuştur. Sonuç olarak ülkemizde, hatlarda araç üzerine monte edilen cihazların, trafo merkezlerinde ise sabit cihazların kullanılmasının ekonomik olacağı kanısına varılmıştır.

#### **4. Silikon gres ile yağlama**

Yöntem silikon gresin su kabul etmeyen ve hiçbir izolatöre erişmesini önleyen özelliklerinden yararlanmaktadır. Gresin bu özellikleri nedeniyle izolatör yüzeyinde kaba bir su tabakasının oluşması engellenebilmektedir.

#### **5. İzolatör yüzeyinin ısıtılması**

Fazla miktarda kablo ve direnç elemanı ihtiyacı ve ilave güç kaybı bu yöntemin başlıca dezavantajlarıdır.

### 3. İZOLATÖR ÜRÜN GRUBU

#### 3.1 Yapıldıkları Malzemelere Göre İzolatör Çeşitleri

- Porselen İzolatörler
- Cam İzolatörler
- Epoksi Reçineli İzolatörler

##### 3.1.1 Porselen İzolatörler

Porselen izolatörler; kaolin, kuvars ve feldispat karışımından elde edilir.

Porselen izolatörlerde,

% 50 Koalin (arı kil birleşimi;  $Al_2O_3$ , 2  $SiO_2$ , 2  $H_2O$  alüminyum silikat)

% 25 Kuvars (silisyum dioksitin normal sıcaklıkta normal sıcaklıkta saydam ve kristal olan şeklidir;  $SiO_2$ )

% 25 Feldispat ( $KAl.Si_3O_8$  veya  $K_2O.Al_2O_3.6 SiO_2$ ; potasyum alüminyum silikat)

Porselen izolatörlerin dielektrik dayanımını arttırmak için sır maddesi denilen süspansiyonla kaplanarak yüzeylerinin pürüzsüz olması sağlanır (Şekil 3.1). Bu sır maddesi porselen üzerinde parlak ve kaygan bir yüzey oluşturarak izolatörün kir ve yağmur suyu tutması engellenmiş olur[2, 13]

Sır maddesi; Kaolin, mermer, feldispat, renk maddesi 1400 °C'de karıştırılarak elde edilir.



Şekil 3.1: Porselen İzolatörler ve Uygulamaları

### 3.1.2 Cam İzolatörler

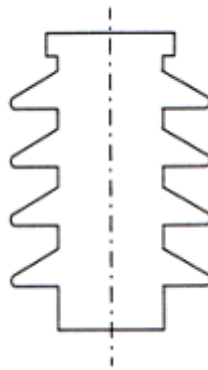
Cam izolatörler, kalsiyum silikat ( $\text{CaSiO}_3$ ) ile Sodyum silikat ( $\text{NaSiO}_3$ ) karışımından elde edilirler (Şekil 3.2) [16, 17]

Cam izolatörler; üzerlerine kolaylıkla nem toplarlar. Bundan dolayı hava tozlarının yoğunlaşp kir meydana getirmesine sebep olur. Bu kirler ise atlamalara neden olur. Bir diğer dezavantajı da camın cinsine göre ortam sıcaklığından etkilenebilir olmalarıdır. Ortam ısısında etkilenmeyi minimuma indirmek için preks türü camlar kullanılması gerekir.

Ayrıca camın yüzeysel boşalma gerilimini havanın delinme gerilimine eşit yapabilmek için, camı sadece vakumda kurutmak yetmez, ayrıca  $350\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar ısıtmak gerekir Yüzeysel boşalma gerilimini büyütmek için katı yalıtkan maddenin yüzeyine uygun sayıda ve biçimde çıkıntılar eklenir (Şekil 3.3) [2].



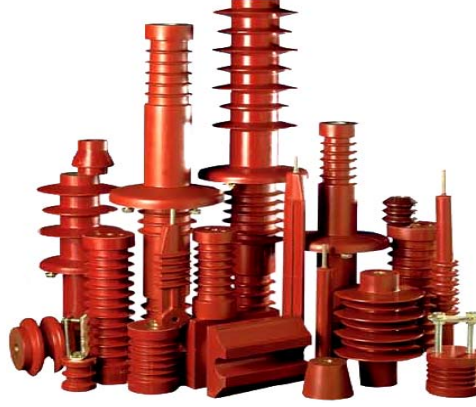
Şekil 3.2: Cam İzolatörler ve Uygulamaları



Şekil 3.3: Yüzeye Uygun Sayıda ve Biçimde Çıkıntılar Eklenmiş İzolatör

### 3.1.3 Epoksi İzolatörler

Çalışmada tasarımını gerçekleştiren izolatör tipinin de dahil olduğu epoksi izolatörlerin özellikleri bir sonraki bölümde detaylı olarak işlenecektir. Bazı tasarım modelleri Şekil 3.4’de gösterilmiştir [4, 5].



Şekil 3.4: Epoksi İzolatörler

## 3.2 Yapılış Türlerine Göre İzolatör Çeşitleri

Mesnet izolatörleri

Zincir izolatörleri

Geçit izolatörleri

### 3.2.1 Mesnet İzolatörler

Enerji hatlarının ve baraların, dokunulması istenmeyen yerlerden yalıtımını sağlayan izolatörlerdir. Dış yüzeyi çıkıntılı veya etekli silindir şeklinde, tek veya çok parçalı cam porselenden veya epoksi reçineden yapılırlar (Şekil 3.5) [16].

Mesnet izolatörleri konsollarına özel demirlerle tutturulurlar. Bu izolatörler, izolatör demirlerine vidalanarak veya vidasız olarak tutturulurlar. Mesnet izolatörleri kullanılan hatların direk boyları daha kısadır. Direk boyunun kısalması hattın birim boyunu azaltır. Bunun yanında arızalanan bir mesnet izolatörünü değiştirmek zordur. Bu tip izolatörler yüksek gerilimler için yapıldıklarında ağır ve kullanışsız olmaktadır ve izolatör demirlerinin traverse yakın olan taraflarında eğilme momenti büyük olmaktadır. Bu tür izolatörler 200 kV’a kadar yapılmaktadır.



**Şekil 3.5:** Pin Tipi Porselen Mesnet İzolatörleri

#### **Dahili tip mesnet izolatörleri**

Dahili tip mesnet izolatörleri tüm iç ortamlarda kullanılabilir (Şekil 3.6) [4, 5, 18].



**Şekil 3.6:** Dahili Tip Epoksi Reçineli Mesnet İzolatörleri

#### **Harici tip mesnet izolatörleri**

Özellikle tropikal ve aşırı soğuk iklim koşulları için -40 ile +90 °C arasında çalışmaya uygun olarak üretilir (Şekil 3.7) [4, 19].



**Şekil 3.7:** Harici Tip Epoksi Reçineli Mesnet İzolatörleri



### **Kapatif gerilim bölücülü mesnet izolatörleri**

Dahili gerilim bölücülü mesnet izolatörleri, gerilim göstergeli sistemlerde yüksek gerilim kapasitesi olarak kullanılır (Şekil 3.8) [4, 5, 18].



**Şekil 3.8:** Kapatif Gerilim Bölücülü Epoksi Reçineli Mesnet İzolatörleri

#### **3.2.2 Zincir İzolatörler**

Aynı tip malzemelerden yapılmış izolatörlerin birbirine eklenmesi sonucu oluşan izolatörlere zincir izolatörler denir (Şekil 3.9) [16]. OG ve YG hatlarında kullanılmaktadır. Porselen veya camdan yapılabilirler. Zincir izolatörlerin uzunluğu kullanılacak olan gerilime göre değişmektedir. Zincir yapılırken her bir izolatör baklasının alt kısmında pin, üst kısmında ise bu pinin geçebileceği yuva bulunmaktadır. Bu sayede kullanılacak gerilim değerlerine göre zincir baklaları eklenerek uzunluğu tayin edilir.

Zincir izolatörlerin mekanik dayanımları yüksek olmakla beraber, izolatör zincirleri büyük çekme kuvvetlerine maruz kalmaktadırlar. İzolatörün porselen gövdesi ile tespit demiri arasında meydana gelen büyük mekanik gerilimler porselen gövdelerde çok ince yarıklar meydana getirebilir. Dolayısıyla elektrik ve mekanik zorlanmalar sonunda izolatör delinebilir. Bunları önlemek için içi dolu izolatörler veya uzun çubuk izolatörler kullanılır [16].



**Şekil 3.9:** Porselen Zincir İzolatörleri

### 3.2.3 Geçit İzolatörleri

Geçit izolatörleri, enerjinin bina içine girişi için Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'deki modelleri, enerjiyi binadan dışarıya güvenli bir şekilde çıkarmak içinse Şekil 3.12'deki modelleri kullanılan izolatörlerdir [4, 5, 16]. Porselen, camdan veya epoksi reçineden yapılan bu izolatörler 12 kV'dan, 400 kV'a kadar olan gerilimlerde kullanılabilir. Ayrıca gerilim büyüklüğüne göre boyutları değişim gösterir.

Geçit izolatörlerinde yüzeysel boşalmaları önlemek için izolatör yüzeyi çıkıntılı yapılır.

#### Dahili uygulamalar için geçit izolatörleri



**Şekil 3.10:** Dahili Uygulamalar İçin Epoksi Reçineli Geçit İzolatörleri



**Şekil 3.11:** Porselen Yapılı Duvar ve Transformatör Geçit İzolatörleri

### Dahili-harici uygulamalar için geçit izolatörleri



Şekil 3.12: Dahili-Harici Uygulamalar İçin Epoksi Reçineli Geçit İzolatörleri

### Fiş tipi geçit izolatörleri

Çalışmada tasarımını gerçekleştiren izolatör tipi olup özellikleri bir sonraki bölümde detaylı olarak işlenmiştir. Şekil 3.13’de bazı fiş tipi geçit izolatörü örnekleri gösterilmiştir [18, 23].



Şekil 3.13: Fiş Tipi Epoksi Reçineli (Dökme Yalıtımlı) Geçit İzolatörleri

#### **4. EPOKSİ REÇİNELİ ORTA GERİLİM FİŞ TİPİ GEÇİT İZOLATÖRLERİ (PLUG-IN TYPE BUSHING)**

TS EN 50181 Md.3.1’de fiş tipi geçit izolatörleri, bir ucu ayrılabilir yalıtılmış kablo bağlayıcısı olmadan geçit izolatörünün çalışmasını önlemek için tasarımlanmış olan ve diğer ucu özel uygulamada yalıtma kurallarına göre alışıl gelmiş boyutlarda olan bir geçit izolatörüdür şeklinde tanımlanır [7].

##### **4.1 Temel Hammadde Genel Karakteristikleri**

Çalışmada tasarımı gerçekleştirilen epoksi reçineli fiş tipi geçit izolatörlerinin temel hammadde olarak kullanılan epoksi reçine kuşkusuz hem üretim aşamasında hem de saha uygulamalarında dikkatle takip edilmesi gereken bir üründür.

##### **4.1.1 Epoxy (Epoksi) Tarihçesi**

Epoxy sözcüğü Yunanca iki önekten türemiştir: “üzerinde” anlamına gelen “epi” ve “keskin/asitli” anlamına gelen “oxy”. Epoxy kimyasının tarihi muhtemelen 1900’lerin ilk yıllarında, Rus kimyager Prileschajev olefinlerin peroksibenzoik asit ile reaksiyona girerek epoksitleri oluşturduğunu keşfettiğinde başlamıştır. 1930 yılının ortalarında Alman bilim adamı P. Schlack aminleri birden fazla epoksit grup içeren epoksit karışımları ile reaksiyona sokarak hazırladığı yüksek molekül ağırlıklı poliaminler için patent almak üzere başvurmuştur. Patent, epiklorohidrin ile bisfenol A’nın epoksit karışımlarının reaksiyonu olarak tanımlanmıştır. 1935 yılında sentetik reçineler hakkında ilk çalışmalara Zürih’de bir firma tarafından başlanmıştır. Bu ilk çalışmaların amacı imalat hatalarını giderebilecek döküme müsait bir malzemenin bulunmasıydı. Döküm içerisinde hava kabarcığı meydana gelmemesi için döküm esnasında kimyasal reaksiyon ile herhangi bir gazın çıkmaması gerekiyordu. Daha da önemlisi, dökümde sonradan olması muhtemel çatlamları önleyecek mekanik ve kimyasal gücün mevcut olması lazımdı. Bugün çeşitli sahalarda kullanılan epoksi reçinelerin ilk ve sağlam temeli Pierre Castan ve maiyetindeki kimyacılar tarafından atılmıştır [24-26].

Diphenylol propan ve epichlorohydrin bileşenlerini fitlik hidrat ile karıştırarak 110 °C ve 150 °C arasında sertleşen ve sonradan eritemeyen ilk reçineyi bulmuşlardır. Bu işlem ancak 1938 yılında, dikkatleri sonradan üzerine çeken, 21116 numaralı İsveç patenti ile az da olsa geliştirilmiştir. Bir kaç yıl sonra, epoksi reçinelerin sıcaklık ayarlamaları üzerindeki çalışmalar Amerika'da Defoe ve Reynolds ile Shell, İsviçre'de ise CIBA Basle tarafından yapılmıştır. 1945 yılındaki önemli gelişmelerin patenti CIBA Basle tarafından alınmıştır. Epoksi reçinenin (epoxy resin) ilk çeşidi 1946 yılında Ciba-Geigy tarafından ticarileştirilmiştir. 1946 yılında Araldit A olarak bilinen Ethoxyline reçine ilk epoxy olarak piyasaya çıkmıştır. Fitahk hidrat, Araldit I'm XV ve 101 tiplerinin 100 °C ile 200 °C de sertleşen bu sentetik reçinesi, elektrik endüstrisinde büyük bir ilgili toplamıştır. Shell tarafından Amerika'da üretilen epoxy'ler Epon ve Epikote reçineleri diye isimlendirilmişlerdir; fakat bu çalışmalar daha ziyade kaplama verniği imalatının geliştirilmesine yöneltilmiştir. Epoksi reçineden önce çeşitli sentetik reçineler ve plastik malzemeler olmasına rağmen epoksi reçine kullanımı gittikçe artış göstermiştir. Bu konuda ilk ortaya çıkan Fenol formaldehit veya kâşifi Baekeland'a izafen Bakalit'dir. Elektrik tesisatı malzemeleri ve küçük parçaların imali için Üre, Melamin reçineleri yaygın vaziyettedir. Yukarıda isimleri verilen malzemeler pratik olarak, erimeyen cins reçineler idi; fakat döküm işlemi sonucu hacimde bir azalma gerçekleşmekteydi. Döküm esnasında su ve amonyağın çıkması ile hava kabarcıklarının oluşmaması için dökümün yüksek basınç altında yapılması gerekiyordu. Bu çeşit dökümü gerçekleştirmek mümkün olduğu için elektrik malzemelerinin çoğunluğu yukarıdaki malzemelerden imal edilmiştir [24-26].

Termoplastikler sınıfına dahil olan, polietilen, polivinil klor, poliester ve bunun gibi sentetik malzemeler imal edilmiştir; fakat bunlar döküm sonucu hacimce % 10 azalmaktadırlar. Dielektrik yönünden olumlu özelliklere sahip olmasına rağmen 100 °C veya aşağısında akıcılık kazanıp sonradan tekrar sertleşmesi, yanıcı kabiliyete sahip olması yüzünden kullanışlı değildir. Bu sebeple sıcaklığın, atmosfer sıcaklığından fazla yükselmediği tel, kablo veya bunlar gibi malzemelerde kullanılır. Saf epoksi reçinenin de ısıl plastik malzeme karakteristiklerine sahip olduğu unutulmamalıdır.

1949 yılında Imhof kuru tip ölçü transformatörleri imalatındaki uygulamasıyla ve yine Imhof ve Koller gerilim, akım trafoları, yıldırım çekicileri, mesnet izolatörleri

ve diğerk elektrik malzemelerinin imalatı ile epoxy'lerin gelişmesinde büyük rol oynamışlardır [24, 25]. 1950 yıllarına kadar epoksi reçinenin imalatı ve işlenmesi hakkında en ilginç yazı Schrade tarafından yazılmıştır. Bir süre sonra Jahn Araldit'lerin yapısal özellikleri ve tatbikatı hakkında çeşitli yazılar yazmıştır. Aynı yıllarda, epoxy'ler üzerinde ihtisas sahibi Narrocot, Dearborn ve diğerkleri ihtiyacı hissedilen yeni sentetik maddeler hakkında öğretici bilgiler vermişlerdir. 1957 yılında da Lee ve Neville tarafından epoxy'ler hakkında ilgi çekici iki kitap yazılmıştır. Bugün iyice gelişmiş olan epoksi reçineler, genellikle yukarıda bahsedilen Castan'ın patentine uymaktadır.

#### **4.1.2 Epoksi Sistemi**

Epoksi sistemi, epoksi reçinesi ve bir kürlenme ajanından (hardener: sertleştirici) meydana gelir. Epoksi sistemi kullanıldığında, epoksi reçinesindeki tekil moleküller (monomers), kürlenme ajanı (hardener) ile birleşerek, uzun zincirleme molekül bağları oluşur.(polymer). Epoksi ve hardener karışımı kürlenince, sert bir polimer meydana gelir. Bazı epoksi sistemleri oda sıcaklığında bir kaç dakikada kürlürken, bazıları sertleşmesi için daha fazla zamana ve ısıya ihtiyaç duyar. Pek çok epoksi ürünleri organik solvent, filler ve pigmentler içerir. Sertleşen epoksilerin karakteristik özellikleri epoksinin monomerine, kürlenme ajanına (hardener), solvent ve fillerin eklenmesine göre değişiklik gösterir. Piyasada mevcut en önemli birkaç epoksi reçinenin katı ve sıvı olarak, viskozitesi, epoxy numarası Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de verilmiştir [25].

**Tablo 4.1: Yönlendirilmemiş Bazı Sıvı Reçineler**

Reçine İsmi	Epoxy No	Viskozite cP (25 °C de)	İmalatçı
Araldit F	185-200	9000-13000	CIBA
DER 831	186-192	11000-14000	Dow Chem. Co.
Dobeckot 501	?	7000-8000	Dr. Beck
Epikote 828	190-210	10000-15000	Shell
Epotuf 37/140	185-190	10000-15000	Reichhold
ERL 2774	182-186	11000-14000	Union Carbide
GfT 0164	182-186	13000-14000	Ges. Für Teerver
Grilonite G3	185-200	8000-15000	Emser Werke

**Tablo 4.2: Yönlendirilmemiş Bazı Katı Reçineler**

Reçine İsmi	Epoxy No	Yumuşama noktası °G	İmalatçı
Araldit B	370-440	50-60	CIBA
DER 661	475-575	70-80	Dow Chem. Co.
Dobeckot 501	360-420	?	Dr. Beck
Epikote 828	300-375	40-45	Shell
Epotuf 37/140	390-440	52-56	Reichhold
GfT 0164	380-400	50-53	Ges. Für Teerver
Grilonite G3	370-415	50-60	Emser Werke
Lekuthermx-30	340-380	45	Bayer

Aşağıda verilmiş olan Tablo 4.3’de ise, italik anhidrat ile işleme tabi tutulan bazı önemli epoksi reçinelerin (Araldit) özellikleri gösterilmiştir [25].

**Tablo 4.3: Çok Kullanılan Üç Ayrı Reçinenin Karakteristikleri**

Karakteristik İsmi	Araldit B	Araldit I	Araldit CYT75
Eğilme mukavemeti kg/mm <sup>2</sup>	9-12	9-13	3-7
Çarpma mukavemeti kg/cm/cm <sup>2</sup>	13-20	7-13	4-5
Young modülü kg/mm <sup>2</sup>	300-400	400-450	475
Gerilme mukavemeti kg/mm <sup>2</sup>	5,5-8,5	5-8	3-4
Marten sıcaklığı °C	95	125-135	200
Dielektrik sabitesi 20 °C'de	3,7-3,9	3,5-3,55	3,7
100 °C'de	3,7-3,9	3,7-3,9	3,7
Dielek. Kayıp faktörü 20 °C'de	0,4-0,7	0,3-0,5	0,5
100 °C'de	0,4-0,7	0,4-0,7	0,4
150 °C'de	3,0-4,0	-	0,5
200 °C'de	-	-	0,5

Epoksi reçinenin en önemli özelliği sıvı halden kolaylıkla sert, elastiki katı kaplayıcı hale geçebilme yeteneğidir. Epoksi reçinenin en önemli özelliklerinden bir diğeri de çeşitli katkı maddeleri ile birleşerek, çalışma sahası geniş olan bileşikler meydana getirmesidir [24, 25]. Katkı maddelerini kullanmak aynı zamanda en uygun ekonomik şartları yaratır. Tablo 4.4'de bazı katkı maddeleri özellikleriyle birlikte verilmiştir [25].



**Tablo 4.4:** Bazı Katkı Maddeleri ve Karakteristikleri

Katkı Maddeleri	Özgül ağırlık gr/cm <sup>3</sup>	Hacimsal ağırlık gr/100 cm <sup>3</sup>	Boyut mm	Karışım %
Kuvars tozu	2,65	100-110	0,06	100-400
Kuvars taneciği	2,65	130-160	0,1-1	300-700
Mika tozu	2,6-3,2	45-55	0,1	25-100
Kaolin	2,6	25-45	0,1	25-200
Tebeşir tozu	2,7	100-120	0,1	50-300
Mermer tozu	2,5	45-70	0,6	25-150
Talk	2,7	50-60	0,5	25-200
Porselen tozu	2,4	100	0,06	100-400

Genel olarak bir karışımın bileşenleri, ağırlıkları dikkate alınarak aşağıdaki gibi ayarlanabilir.

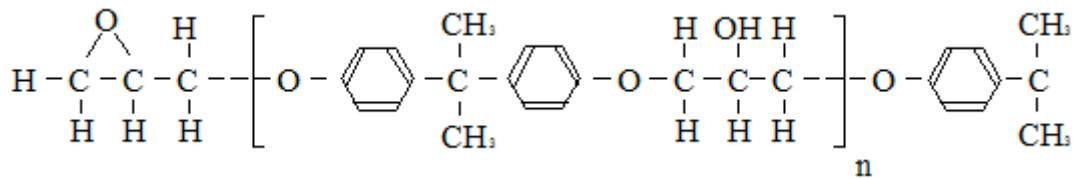
100 kısım Dobeckot 504 reçine

70 kısım işlem malzemesi 702

0,5 kısım hızlandırıcı 803-250 kısım dolgu maddesi

#### 4.1.3 Epoksi Reçinelerin Kimyasal Yapısı

Yüksek ve orta gerilim yalıtımlarında en çok kullanılan epoksi reçineler bi-fenol A'nın epiklo-ridin ile reaksiyonundan elde edilmektedirler. Bunların genel moleküler yapıları Şekil 4.2'deki gibidir [24].

**Şekil 4.1:** Epoksi Reçinenin Moleküler Yapısı

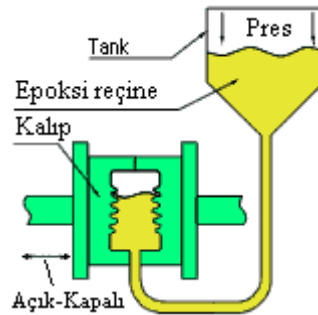
Molekül yapıdaki n sayısı elde edilen reçinenin viskozluk derecesi ile ilgili olup, n'nin büyük değerleri katı reçinelere tekabül eder. n değeri, dolayısıyla reçinenin viskozluk derecesi, reaksiyonda kullanılan bi-fenol ve epikloridin ortam ile değiştirilebilir. Bu şekilde elde edilen esas reçine, asit anhidrid veya amin gibi bir

sertleştirici veya oluşturulan reaktif ile karıştırılırsa, reçine ve sertleştirici madde molekülleri arasında meydana gelen bir çapraz bağ reaksiyonu sonucu sert, üç boyutlu ve çapraz bağlı katı bir yalıtım maddesi oluşur. Böylece elde edilen sentetik katı yalıtım maddesi mükemmel mekanik, ısıl ve elektriksel yalıtım özelliklerine sahiptir. Esas reçinenin sertleştirici veya oluşturulan reaktif ile reaksiyonunda herhangi bir yan ürün meydana gelmez ve reaksiyon için bir dış basınç tatbiki gerekmez. Elektriksel yalıtım işlemlerinin çoğunluğu için, karışıma ayrıca kuvars tozu ilave edilir. Kuvars tozu elde edilen sentetik maddenin mekanik dayanımını daha da iyileştirir ve maliyetini azaltır [24-26].

#### 4.1.4 Epoksi Reçine Kullanımı

Son yıllarda, elektrik endüstrisinde gerek yalıtım maddeleri ve gerekse diğer çeşitli elektrik malzemelerinin üretimi için birçok epoksi reçine ve organik madde sık sık kullanılmaya başlanmıştır. Bunlar şimdiye kadar ölçü transformatörlerinde kullanılmakta olan porselen dökümlerden farklıdır. Yanma noktasının yüksek olması ve belirli toleranslara sahip olması yüzünden malzemenin imalatı fabrikasyon haline sokulmuştur [25].

Epoksi reçine, kalıplama ve döküm için ideal özelliklere sahiptir (Şekil 4.1). Cihazı çevreleyen böyle bir döküm, aktif elemanlar ile diğerleri (toprak) arasında yalıtımı sağladığı gibi elemanları mekanik kuvvetler ile atmosferik etkilere karşı korumaktadır. Epoksi reçine manyetik dalgalar için bir engel olmadığından, hareketli elektrotları istenildiği şekilde yerleştirme imkanı verir. Katalizör kullanılarak sıvı halden katı hale geçildiği için, deney gerilimine dayanacak yapım kalıbının hazırlanıp dökülmesi ve hatta dökümün işlenmesi mümkündür.



Şekil 4.2: Otomatik Baskı İşlemi

Sıvı (macun) halindeki reçine, değişik oranlarda çeşitli organik, inorganik maddeler ve mineraller ile karıştırılabilir. Bu karışım genellikle sıvının daha yapışkan olmasını

ve teknolojide arzu edilen birçok mekanik, ısı, elektrik özelliklerinin yaratılmasını sağlar [25].

Macun halindeki reçine ister seyreltilmiş, isterse seyreltilmemiş olsun uygun sargı katları arasına, deliklere, boşluklara ve malzemenin gözeneklerine kolaylıkla girebildiği için mükemmel bir yalıtım dolgusu meydana getirmektedir.

Döküm halindeki epoksi reçinenin mekanik ve ısı karakteristiklerini inceleyerek, katkı maddelerinin saf reçine üzerindeki etkileri kolaylıkla anlaşılacaktır.

Saf epoksi reçine üzerine mineral maddeleri katılarak reçinenin ısı iletkenliği saf macununkinden çok daha yüksek olan (6-8)  $10^3$  W/cm<sup>2</sup>°C değerine yükselir. Böylece, ısınma tehlikesi olmadan belirli miktar güç elde edilebilir.

Döküm reçinenin en önemli özelliklerinden biri yüksek sıcaklıklara dayanımıdır. Dökümden sonraki karakteristikleri sabit kalmak şartıyla 100 °C ve üzerindeki değerlerde hiçbir değişikliğe uğramaz. Saf epoksi reçine alev karşısında çıra gibi yanar. Halbuki katkılı bir reçine dökümü devamlı alev karşısında yanmaya başlar; fakat alev uzaklaştırıldığı an yanma durur. Başka bir deyimle kendi kendine yanma söz konusu değildir. Katkı maddeleri mevcut hacim devamlılığını sağlar, (buradaki anlam büzülmeden meydana gelen hacim değişikliğidir). Saf reçine doğrudan doğruya döküldüğünde, sertleşme süresince hacminde bir değişme meydana gelir. Değişim, diğer maddelere göre az olmasına rağmen yinede bir miktar büzülme yaratır. Söz konusu olan büzülme, dahili basıncı doğurduğu gibi iç kısımda belirli bir süre kendini belli etmeyen çatlaklıklar meydana getirir. Bunlara en iyi çare katkı maddesinin ilavesidir. Saf reçine dökümünde büzülme miktarı, katılaşma sırasında % 1,5, tamamen soğuduktan sonra % 3'e kadar yükselmektedir; fakat katkılı dökümde bu oran maksimum % 0,6'ya çıkabilir. Aynı şekilde boyca genişleme katsayısı saf reçine için (4-6).10<sup>5</sup> °C olmasına rağmen katkı maddeleri kullanılınca (2-3).10<sup>5</sup> °C değerine düşerek imalâttaki emniyeti artırmaktadır. Reçine dökümünün katılaşmaya başladığı an ile tamamen sertleşme arasındaki büzülme miktarı iki halde sıcaklık ve bunlar arasındaki zaman ile değişmektedir [24-26].

Döküm epoksi reçineleri, mekanik yönlerden incelenecek olursa, gerilme dayanımı takriben 800 kg/cm dir. Böyle bir değerle, küçük parçalar rahatça yerlerine yerleştirilebilir, bağlantılar tam ve yeterli olarak yapılabilir.

Dökülmüş epoksi reçinenin, iç bünyesinin homojen ve izotropik karakteristiğe sahip olması önemlidir, zira ayrı ayrı kademelerden meydana gelmediği için, yüksek yalıtım kabiliyeti ortama eşit olarak yayılmıştır.

Epoksi bu kadar çok yönlü niteliklere sahip olduğundan dolayı, epoksi reçineler şimdilerde koruyucu kaplayıcılar, denizcilikte kullanılan boyalar, döşemelikler, yapıştırıcılar, tutkallar, kalıplama karışımları, yalıtım malzemeleri, sağlamlaştırılmış plastik ve tekstil ürünleri gibi pek çok alanda kullanılmaktadır [24-26].

### **Epoksi reçinelerin orta ve yüksek gerilim yalıtımlarında kullanılması**

Dökme epoksi reçineler mükemmel elektrik ve mekanik özelliklerinden dolayı orta ve yüksek gerilim yalıtımlarında çokça kullanılmaktadır. Son zamanlara kadar başlıca kullanma sahası daha çok dahili yüksek gerilim sistemlerinin yalıtımı olmuştur. Bununla beraber, epoksi reçinelerin harici yalıtım tatbikatlarında da kullanılması bugün artık söz konusu olmuştur [24].

Sentetik yalıtım maddelerinin kullanılması, harici yalıtım koordinasyonunda önemli gelişmelere yol açabilecektir.

Dökme epoksi reçinenin son zamanlarda orta ve yüksek gerilim cihazlarının yalıtımında geniş ölçüde kullanılmasına başlanması ile, sistem ve cihaz geriliminde ki artışa paralel olarak, yalıtım tekniğinin durumu maliyet yönünden teşvik görmekte ve uygun yalıtım koordinasyonu ile önemli derecede ekonomi sağlanabilmektedir. Özellikle çok yüksek gerilimlerde yalıtım, direkt ve endirekt olarak maliyete oldukça tesir etmektedir. Mesela, bir transformatörde yalıtım, öngörülen yalıtım seviyesi için gerekli yalıtım kalınlığı yönünden direkt olarak ve sargılarda açığa çıkan ısı enerjisinin transferini önlemeyecek bir yalıtım kalınlığı tesbiti yönünden de endirekt olarak transformatör boyutlarının belirlenmesinde önemli rol oynar. Dolayısıyla, en uygun yalıtım koordinasyonunun tayini ile kullanılan yalıtım malzemesi pahalı olsa bile hayli ekonomi sağlanabilir.

Bu hususlar epoksi reçinenin bilhassa son zamanlarda dahili tip orta ve yüksek gerilim cihazlarının yalıtımında çokça kullanılmaya başlanması ile daha da belirli hala gelmiştir. Epoksi reçinenin yüksek mekanik mukavemeti, bunun hem yalıtım

hem de strüktür yapı malzemesi olarak kullanılma imkânını vermektedir. Epoksi reçinenin ayrıca kompleks şekillerde dökülebilme özelliği, dahili tip metal muhafazalı salt cihazları (metal-clad switchgear), kesici, ayırıcı, v.s. tasarımında önemli gelişmelere imkan vermiştir. Böyle bir sistemde, kuru tip transformatör kullanılabilmekte, bara yalıtımı dökümden tek parça bir tarzda yapılarak sistemin toplam boyutlarında azalma sağlanmaktadır.

Epoksi reçinenin dahili orta ve yüksek gerilim yalıtım tatbikatlarında kullanılması bugün artık benimsenmiş bulunmaktadır. Bununla beraber, diğer yalıtım maddeleri yanında epoksi reçinenin harici orta ve yüksek gerilim yalıtım tatbikatlarında kullanılması imkânları büyük ekonomik avantajlar sağlamaktadır [24].

#### **4.2 Sentetik Yalıtım Maddelerinin Bina Dışı Yalıtım Uygulamalarında Sağladığı Avantajlar ve Dezavantajlar**

Sentetik yalıtım maddelerini harici yüksek gerilim yalıtım uygulamalarında kullanmakla birçok avantaj sağlanabileceği gibi, porselen ve cam gibi kullanılagelmekte olan yalıtım maddelerinin açığa çıkardığı bazı problemler de giderilmiş olacaktır. Bu avantajları şöylece sıralayabiliriz [24].

##### **Hafiflik**

Ön tasarım araştırmaları, sentetik maddeden yapılmış bir askı izolatörünün porselen yapılmış bir izolatöre göre % 30 daha hafif olduğunu göstermiştir. Bu konu, enerji iletim hatlarının inşasında önemli bir ekonomik avantaj demektir.

##### **Yüksek çarpma dayanıklılığı**

Sıkıştırılmış cam ve porselenin çarpmaya karşı mukavemetleri oldukça zayıftır. Bu yüzden enerji iletim sistemlerinin yapımı sırasında cam ve porselen izolatörlerde kırılmalar ve çatlamlar olur.

##### **Uygun ısı şok direnci**

Yapılan çok sayıdaki deneyler, sentetik reçineden yapılmış izolatörlerin binlerce amper akım taşıyan arka, alternatif akımın bir kaç periyodu zamanda tahrip olmadan dayanabildiklerini göstermiştir. Oysaki aynı şartlar altında porselen bir izolatörün sırt tabakası çatlayarak dökülür ve yüksek ark akımlarında izolatör tamamen kırılır.

## **Yüksek mekanik dayanıklılık**

Yukarda da belirtildiği gibi epoksi reçine, özellikle cam fiber ile takviye edilince, yüksek mekanik dayanıklılık kazanır. Buna ilaveten, epoksi reçinenin cam ve porselene göre daha yüksek gerilime dayanımı tasarımda çok daha fazla elastikiyet sağlar. Örneğin, bir enerji iletim hattı direğindeki izolatörler ve metal konsollar aynı sentetik maddeden yapılabilir. Bunun sağlayacağı avantaj aşikardır. Diğer taraftan tasarımda önemli değişmelere imkan vermesi, yalıtım koordinasyonunda önemli diğer ekonomik avantajları sağlar [24].

## **Elverişli imalat özellikleri**

İyi kalitede bir dökme epoksi reçine ürünü için gerekli teknik bilgi iyi bir porselen mamulü için gerekli teknik tecrübeden fazla değildir. Fırınlama sırasında bir porselen izolatör boyutlarında % 8 kadar bir sapma olabilir. Bu, 400 kV' luk yekpare bir porselen izolatör için izolatör boyunda 40 cm'e kadar bir azalmaya tekabül eder. Bu durum, büyük ebatla porselen bir izolatörün fırlanma esnasında tesbitini zorlaştırır. Fırınlanan porselen bir izolatör şekil ve boyutlarında meydana gelen değişmeler bazen müsaade edilir limitlerden fazla olabilir ve imâl edilen izolatör kullanılmayabilir. Aynı boyutlardaki izolatör, reçineden imal edilirse daha uygun toleranslar sağlamak mümkündür.

Tüm bu avantajların yanında tek ve en önemli dezavantaj olarak karbonlaşma öne çıkmaktadır.

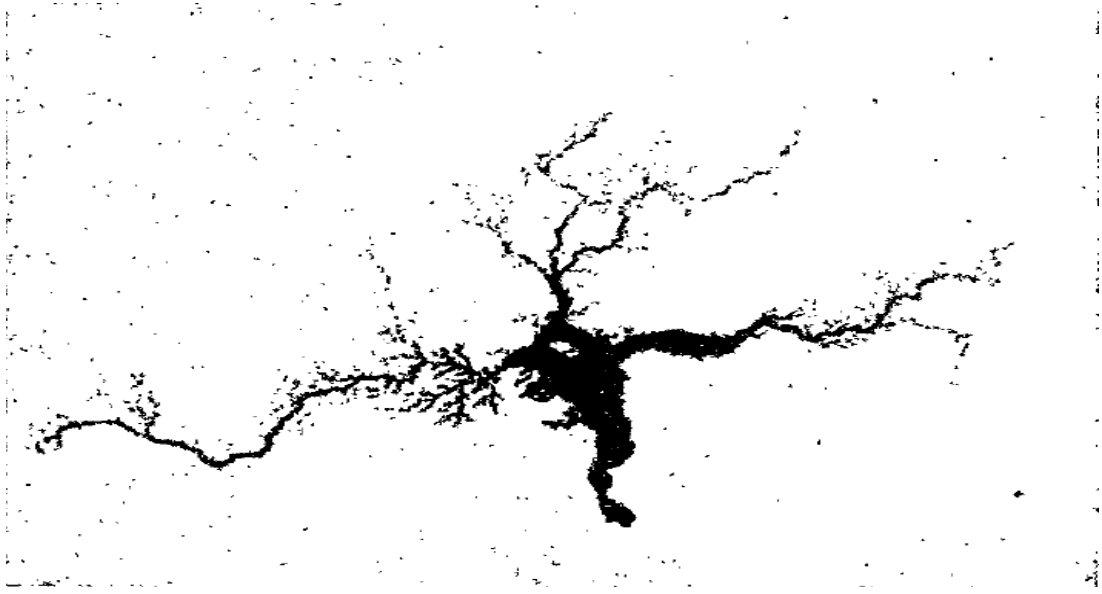
## **Karbonlaşma**

Çeşitli avantajlar sebebiyle, 1950 sıralarında harici tatbikatlar için sentetik yapılı izolatörlerin denenmesine başlandı. Daha sonra sentetik izolatörlerin, yukarda belirtilen birçok avantajlarına karşılık bazı zorluklar çıkardığı görüldü. Bunlar içinde en önemlisi sentetik izolatör yüzeyi boyunca "tracking" denen ağaç dalları şeklinde iletken karbonize yolların teşekkül etmesidir.

Harici tip bir izolatör yüzeyinde bu olay şöyle meydana gelmektedir:

Rutubetli şartlarda izolatör yüzeyinde birikmiş kir tabakası iletken hale gelerek yüzey boyunca kaçak (sızma) akımların akmasına sebep olur. Kaçak akımlar kir tabakasının bazı bölgelerinde kuru tarak kuru band adı verilen bölgeler meydana gelir. Kuru bandlar ekseriya izolatör yüzeyinde akım yoğunluğunun en fazla olduğu

salınımlarda meydana gelir. Kuru bandlar boyunca gerilim düşümü havanın dielektrik dayanımını aşınca, izolator yüzeyinde miliamper mertebesinde akım taşıyan deşarjlar meydana gelir. Porselen ve cam, genellikle yüksek sıcaklıklara dirençli olduklarından, bu tür boşalmalara dayanırlar. Sentetik yalıtım maddeleri ise bu tür deşarjlara fazlaca dayanamazlar. Boşalma uçlarının izolator yüzeyi ile temas eden kısımları karbonize olur ve neticede izolator yüzeyinde ağaç dallarına benzer iletken karbonize izler meydana gelir. Bu tip izolatorlerde karbonlaşmalar ekseriya kapak ve sap kısımlarının sızma yüzeyi boyunca genişlemesine denk gelir. Şekil 4.3'deki fotoğraf sentetik yapılı yalıtılmış bir yüzeydeki karbonlaşmayı göstermektedir.



**Şekil 4.3:** Sentetik Yapılı İzole Bir Yüzeyde Karbonlaşma Olayı

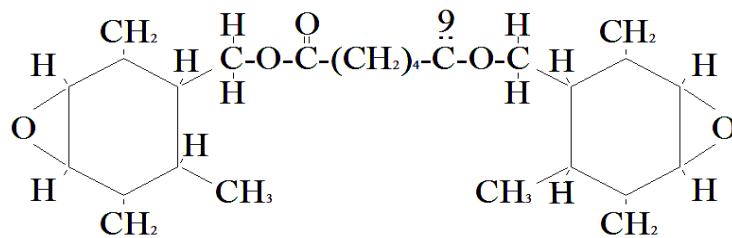
Yukarıda açıklanan mekanizma ile boşalmalar daha sonra karbonize yolların uçlarından tutuşarak izlerin büyümesini sağlar. Neticede, izolator yüzeyinde metal elektrotlar arasında ağaç şeklinde sürekli karbonize izler meydana gelerek izolator sızma yüzeyi kısa devre edilmiş olur. Ortam şartlarına ve sentetik yalıtım maddesinin cinsine de bağlı olmak üzere bu işlem bir kaç saat gibi çok kısa bir sürede veya bir kaç yıl gibi çok uzun bir zamanda meydana gelebilir.

Epoksi reçine yapılı harici tip askı izolatorlerinin geniş ölçüde denenmesine ilk defa 1959 yılında Amerika da başlandı. Denenen izolatorler, cam fiber yapılı bir ana gövde üzerine uygun profilde dökülmüş epoksi reçine yapılı idi. 4.1.3'de izah edilen bi-fenol reçine esasen tetik madde ve dolgu maddesi olarak normal kuvars tozu ( $\text{SiO}_2$ ) yerine alüminyum-tri-hidrat ( $\text{AlH}_6\text{O}_3$ ) kullanılmıştır. Laboratuvar

deneyleri dolgu maddesi olarak Alumina'nun kullanılmasının karbonlaşmayı biraz azalttığını göstermiştir. Deney izolatörleri Amerikada, taşlanma ve kirlenmenin en fazla olduğu bölgelerde servis şartları altında denemelere tabi tutulmuşlardır. Bu izolatörler basit şekillerine, porselen ve cam izolatörlere göre daha yüksek yüzeysel gerilim gradyanı altında tutulmalarına rağmen oldukça iyi performans göstermişlerdir. Bu denemelerde sentetik izolatörün porselen izolatörden her bakımdan daha iyi olduğu iddiası gibi yanlış bir amaç ile hareket edilmiştir. Bununla beraber, karbonlaşma problemi yönünden tamamen aksi sonuç elde edilmiştir [24-26]

Sentetik izolatörler üzerinde Amerika'da başlatılan bu denemelerin sonucu pek teşvik edici olmamış ve 1967 yılına kadar denemelere tabi tutulan sentetik izolatörlerin önemli bir yüzdesi karbonlaşma sebebiyle kullanılamaz hale gelmiştir. Bu sonuç, birçok kimselerin sentetik yalıtım maddelerinin sıg yalıtım tatbikatları için uygun olamayacağı gibi yanlış, bir kanaat edinmelerine sebep olmuştur. Devam eden laboratuvar çalışmaları, reçine ve dolgu maddesinin moleküller yapılarında değişiklikler yapılarak karbonlaşma probleminin tamamen önlenmesinin mümkün olabileceğini göstermiştir. Bu araştırmalarda, benzen halkası ihtiva eden sentetik maddelerin (bi-fenol epoksi reçine gibi) karbonlaşmaya eğilimli oldukları görülmüştür. Bunun sebebi, benzen halkasının dengeli olmayışı, ısıl ayrışma esnasında halka yapısının yüzeyde değişmeyerek, volatik moleküler parçalarla birleşerek yüzeyde grafit yapıda karbonize bir kalıntı (artık) teşkil etmesidir. Diğer bazı moleküler yapılar ve özellikle halojenize maddeler (PVC gibi) karbonlaşma gösterirler. Bu gibi maddelerde yan grupların kaybolması, grafit yapıya polimerize olan karbonize bir kalıntının meydana gelmesine sebep olmaktadır.

Araştırmalar sonucu, fitrt olarak karbonlaşma göstermeyen bazı moleküler yapı tipleri bulunmuştur ve bunlardan siklo-alifatik reçinenin moleküler yapısı Şekil 4.4'deki gibidir.



Şekil 4.4: Siklo-Alifatik Reçinenin Moleküler Yapısı



Moleküler yapıdan görüldüğü gibi sıklık yapı hiç karbon bağı (C=C) ihtiva etmemektedir.

Yukarıdaki reçine uygun bir sertleştirici madde ile birleştirildiği takdirde hiç karbonlaşma göstermeyen sentetik bir yalıtım maddesi elde edilebilir. Bu tür bir yalıtım maddesinin yüzeyinde deşarj sebebiyle bir ayrışma olsa bile yüzey karbonlaşmayıp hafifçe pürüzlenir. Bu pürüzlenme, dolgu ve sertleştirici maddenin itina ile seçilmesiyle minimum bir dereceye indirilebilir.

Önceleri geliştirilen siklo-alifatik reçine zayıf mekanik dayanıklılık gösterirken, son geliştirilen tiplerde, dahili yalıtımlarda kullanılan bi-fenol yapılı reçinelerin mekanik dayanımına yaklaşan yüksek dayanım seviyeleri sağlanabilmiştir. Siklo-alifatik reçinelerin geliştirilmiş olması kimyacıya, istenen özellikli sentetik bir reçinenin kolayca imal edilmesini mümkün kılan bir esneklik sağlamıştır.

### **4.3 Sentetik Yalıtım Maddeleri ve Dış Yalıtımlarda Uygulanması**

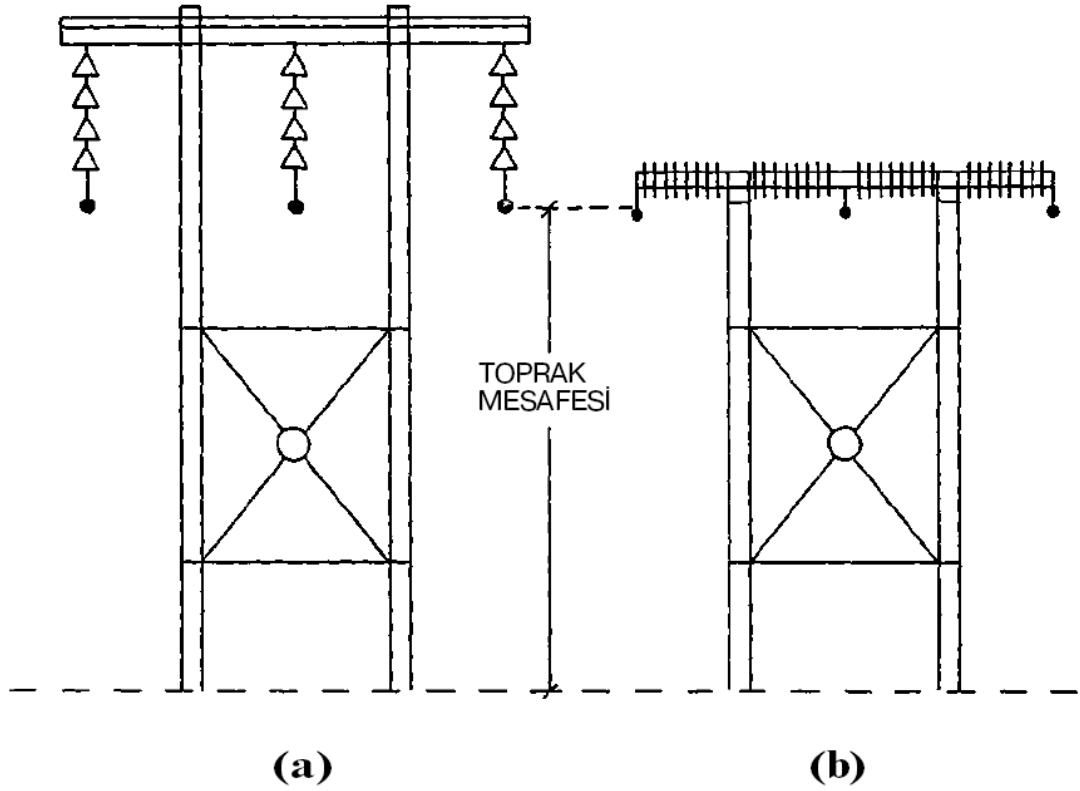
Dünyanın çeşitli yerlerindeki deney istasyonlarında dış şartlar altında çeşitli denemelere tabi tutulan siklo-alifatik epoksi reçinenin uygun tasarım şartı altında dış yalıtım uygulamalarında güvenle kullanılabileceği anlaşılmıştır.

Son yıllarda sentetik yalıtım maddelerin kullanıldığı harici tip yüksek ve orta gerilim cihazlarının ticari maksatla imalatı artmaktadır. Sentetik yalıtım maddelerinin geniş çapta ve kolaylıkla kullanılabileceği bir saha kuru tip akü ve gerilim transformatörleridir. Gerilim transformatörleri çok yüksek gerilimlerde oldukça pahalıya mal olmaktadır.

Almanya'da, dökme yekpare geçit izolatörlü, tamamen siklo-alifatik reçine ile yalıtılmış, 220 kV' luk bir akım transformatörü ilk olarak imal edilmiş; Amerika'da son bir kaç yıl içinde sentetik yapılı onbinlerce 15 kV' luk harici tip gergi izolatörü satılmış, sistemlere monte edilmiş ve gayet iyi performanslar elde edildiği bildirilmiştir. Sentetik yalıtımların kayda değer artmakta olan diğer tatbikat sahaları olarak, tren elektrifikasyon tesisleri ile transformatör merkezlerinde bara izolatörleri olarak kullanılmalarını söyleyebiliriz.

Sentetik izolatörlerin ana enerji iletim hatlarında kullanılmaları henüz araştırma safhasındadır. Bu konuda maksimum bir ekonomi sağlanması radikal tasarım kavramına bağlıdır. Şekil 4.5'de denemelerde başarılı sonuç veren bir tasarım tarzı

görülmektedir. Bu tasarım 132 kV civarındaki gerilimler için en uygundur. Görüldüğü gibi, konsolların sentetik yalıtmadan yapılması hem yapımı basitleştirmekte hem de boyca kısalmayı mümkün kılmaktadır. Benzer tasarım daha yüksek gerilimler için kullanılabilir



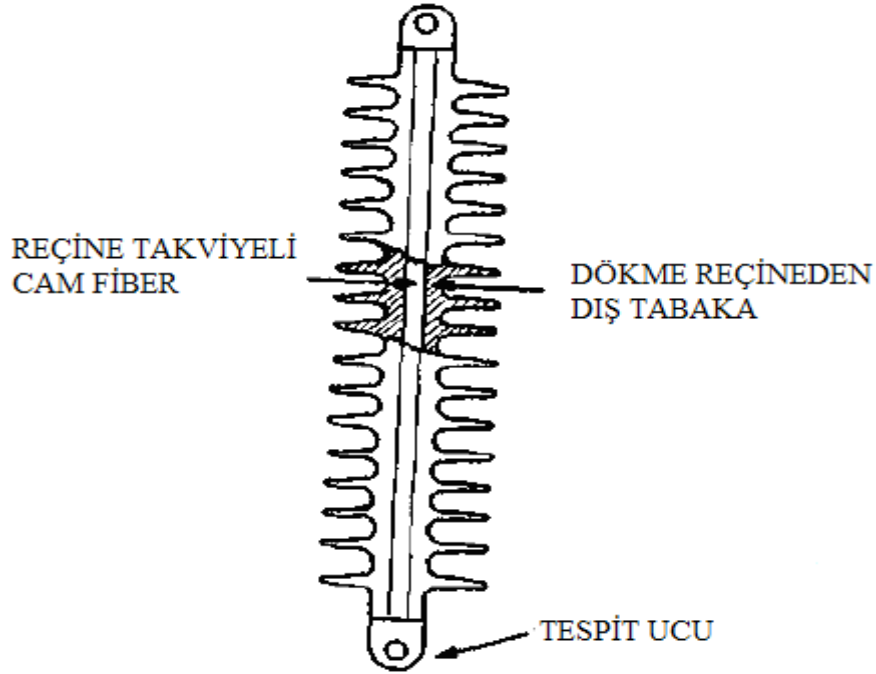
**Şekil 4.5:** Sentetik Reçinenin Direk Tasarımında Uygulaması

a) Normal demir direk tasarımı; b) Konsolları sentetik reçine yapıları direk tasarımı

Birçok elektrik kuruluşu mevcut porselen zincir tip izolatörlerin yerine kullanmak üzere sentetik reçine yapıları askı tip izolatörlere ilgi göstermektedir. Her ne kadar porselen izolatör zincirinin sentetik izolatör zinciri ile değiştirilmesi ilk bakışta büyük bir ekonomi sağlamazsa da, mevcut enerji iletim sistemi üzerinde az bir montaj işi ile sentetik izolatör zincirinin nasıl bir performans göstereceği denenmiş olur. Bununla beraber sistem gerilimi 1 MV'a erişirse, porselen izolatör zinciri kullanmanın ortaya çıkaracağı birçok problem (mekanik dayanıklılık, porselenin imalat zorluğu, v.s.) reçine yapıları izolatörlerin tercihini kaçınılmaz kılacaktır [24].

Halen tatmin edici bir askı tip sentetik izolatör tasarımı mevcut değildir. Tipik bir askı (çubuk) tip izolatörün yapısı Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Bu tasarımda ortada cam fiber yapı ve onun etrafında uygun profilde sentetik reçineden dökme bir kısım vardır. Sentetik izolatör imalinde esas zorluk, orta kısımda kullanılan cam, fiber ile

onu kuşatan sentetik reçinenin farklı gerilme uzanımları göstermelerinden ileri gelmektedir. Bu durum, izolatörün yük altında bulunması halinde reçine kısmının çatlamasına yol açmaktadır. İngiltere ve İsviçre’de halen bu problem üzerinde araştırma ve geliştirmeler devam etmektedir.



**Şekil 4.6:** Tipik Bir Sentetik Askı İzolatörü

Epoksi reçine yapılı izolatörlerin dış ortamlarda kullanılması belirli birçok avantaj sağlamaktadır. Sentetik reçinelerin mekanik tasarım elastikiyeti, teorik optimum şartlara daha uygun, mesela kirlenme atlamalarına karşı daha elverişli performans sağlayacak, bir izolatör şekli imalini mümkün kılabilmektedir. Mekanik dayanıklılığın uygun bir tarzda koordinasyonu ile enerji iletim sisteminin birçok noktasında, tasarımda basitleştirmeler, boyutlarda azaltmalar yapmak dolayısıyla daha iyi performans ve ekonomi sağlamak mümkün olur.

Sentetik yalıtım maddelerinin yüzeylerinde deşarjlar altında ilk zamanlarda görülen karbonlaşma problemi, siklo-alifatik epoksi reçine gibi yeni tip sentetik maddelerin geliştirilmesiyle artık giderilmiş bulunmaktadır. Uygun bir tasarım sağlandığı takdirde siklo-alifatik epoksi reçinenin harici yalıtım uygulamalarında kullanılması ile iyi performanslar elde etmek mümkündür. Halen sentetik yalıtım maddelerin uygulamada kullanılması göreceli olarak fazla olmamakla beraber kullanılma oranı umut verici bir artış göstermektedir [24-26].

## 5. YENİ BİR FİŞ TİPİ GEÇİT İZOLATÖRÜ TASARIMI

### 5.1 Tasarımın Yenilikleri

Tasarımın sunacağı başlıca yenilikler şunlardır:

- Delinme dayanımının (dielectric strength) büyük olması, daha az malzeme kullanımı, boyutlarının küçük olması ve maliyetin daha düşük olması ( $E_{d(\text{porselen,seramik})} = 12 \text{ MV/m}$ ,  $E_{d(\text{cam})} = 14 \text{ MV/m}$ ,  $E_{d(\text{epoksi})} = 26 \text{ MV/m}$ ) [26, 29]
- Dielektrik kayıplarının küçük olması, böylece yalıtım malzemesi ısınmasının belirli sınırlarda kalması
- Yüksek yüzeysel iz dayanımı (high tracking strength), böylece erozyonun önlenmesi ve uygun dielektrik sabiti
- Yalıtım direncinin belirli sınırlar içinde kalması, böylece standartlarda verilen boyutlara uygunluk

Yukarıdaki sonuçlar tasarımın ilk başlarında amaç edinilerek uygulamanın gereksinim duyduğu Tablo 5.1'deki standart koşulları yerine getiren epoksi reçineli fiş tipi geçit izolatörü (plug-in type bushing) tasarımlanacaktır.

**Tablo 5.1:** Genel Kabul Gören ve Tasarım Aşamasında Uyulması Gereken Standartlar

Konu	Standart	Eşdeğer Standart
Elektriksel	TS 83	IEC 38, 1993
Elektriksel	TS 5007	IEC 60050 (471), 1984
Elektriksel	TS 2529	IEC 60059, 1938
Elektriksel	TS 3008	IEC 60060-1, 1989
Elektriksel	TS 5331	IEC 60216-2, 1990
Elektriksel	TS 20051	IEC 60270, 1981
Elektriksel ve Mekanik	TS 595 [6]	EN 60137, 2000. IEC 260
Elektriksel ve Mekanik	TS EN 50181 [7], [EK A]	IEC 71
Elektriksel ve Mekanik	TS 4237 [52]	EN 60660 [51], IEC 660
Mekanik		DIN 47636
Epoksi Reçine		DIN 16945

## 5.2 Problemler ve Alternatif Çözüm Önerileri

Tasarımın her aşamasında ortaya çıkabilecek temel sorunlar için alternatif çözüm önerileri şunlardır:

1. Ana yalıtkan malzeme özelliklerine, özellikle yüzeysel direncine bağlı kaçak akım ve yüzeysel alan şiddetinin sağlanması sorunu [27, 28]
2. Bağlantıların getireceği elektriksel ve mekanik sorunlar
  - Kontak direnci
  - Kontak malzemesi
  - Kontak yüzey alanı
  - Kısmi boşalmalar
  - Mekanik gevşeklikler

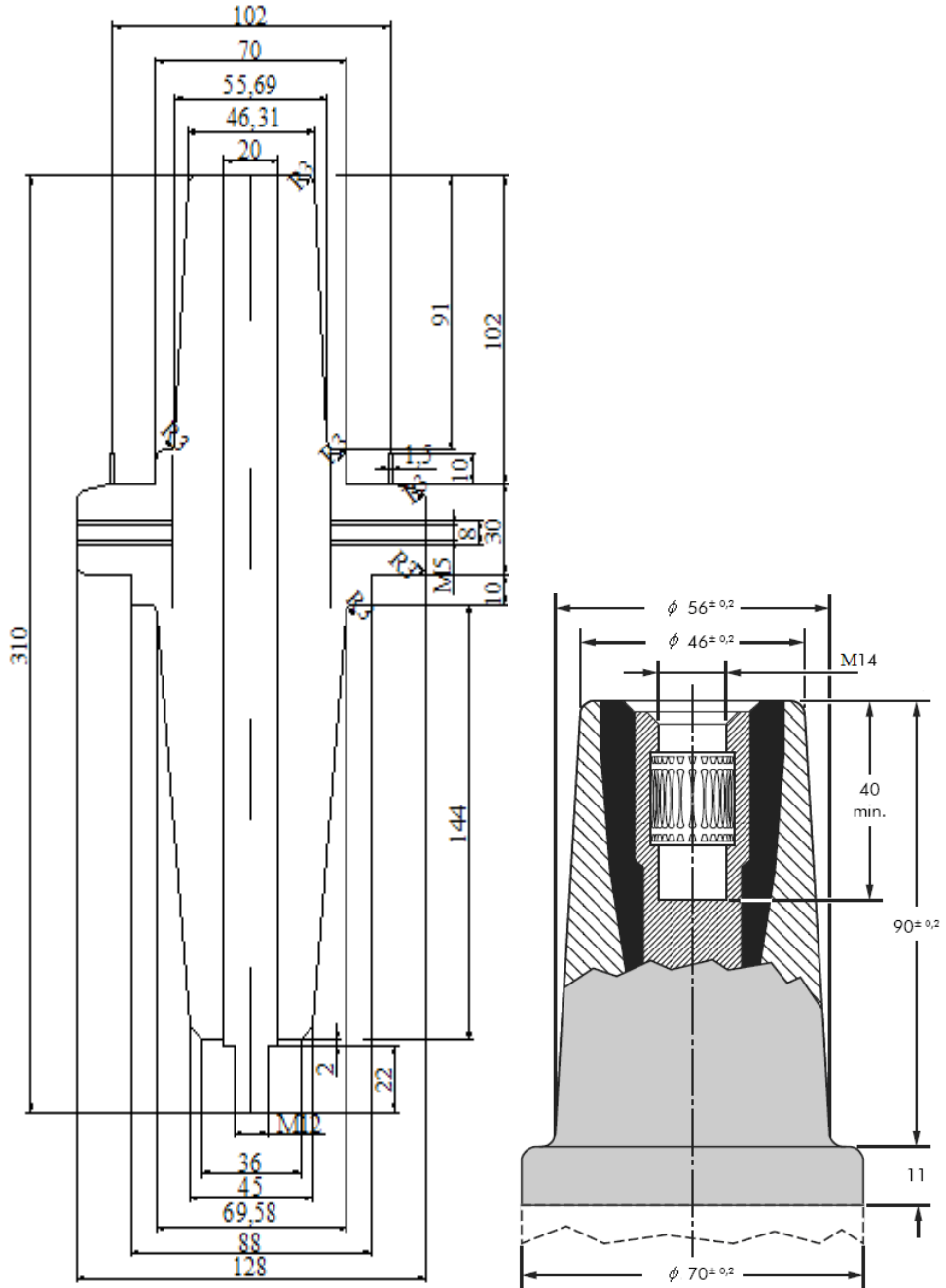
### Çözüm yolları

- Malzeme türü değişiklikleri
- Boyut ve biçim değişiklikleri
- Yapısal değişiklikler

## 5.3 Tasarım Modelleri

Eşleşebilen fiş tipi ayrılabilir bağlayıcıların uygun şekilde montajı ve aralarında değiştirilebilmesini sağlamak için gerekli olan boyutlar üç model için de Şekil 5.1' deki gibi olmalıdır [7]. Tasarımda kullanılan model yurt dışı izolatör pazarına hitap eden Elliot Industries, Inc. [21], Euromold [22], Elastimold Supply [30] ve büyük ölçüde Türkiye pazarına hitap eden ELMEK Elektromekanik A.Ş. [23]'nin ürün gamında bulunan izolatörlerdendir. Tasarım modeli ortak anılan tanımıyla plug-in type bushing ya da fiş tipi geçit izolatörü olarak bilinen ve anma gerilimleri 12, 24 ve 36 kV ve anma akımları 400 A olan orta gerilim yağ daldırmalı trafolar ile metal mahfazalı modüler hücrelerde ağırlıklı olarak kullanılan izolatörlerdendir. Tasarımda yurt dışı firmaların katalog değerleri referans alınmış ve boyutlandırma katalog değerlerine göre yapılmıştır. Üç gerilim kademesi için de aynı boyut ölçüleri kullanılmış ve aynı anma akımı değerine göre isimlendirilmiştir. Sonlu elemanlar

yöntemi analizleri yapılırken ilk olarak geçit izolatörlerinin her üç gerilim kademesi için modüler hücrelerde SF<sub>6</sub> gazıyla birlikte kullanılması durumunda geçit izolatörü çevresinde oluşan elektrik alan analizleri, ikinci olarak ise yağ daldırmalı transformatörlerde kullanılması durumunda geçit izolatörünün çevresindeki sıcaklık artış analizleri, geçit izolatörlerinin gerilim kademesine göre belirlenen yağ seviyesi boyutları dikkate alınarak tekrardan modellenen üç modelin ısıl benzetim yoluyla sonlu elemanlar yöntemi programında ısıl analizleri ile gösterilmiştir [31].



**Şekil 5.1:** Uygun Tasarım Modeli

Ölçüler mm olarak alınmıştır (EK A)

## 5.4 Sonlu Elemanlar Yöntemi Analizleri

### 5.4.1 Orta Gerilim Bina İçi Metal Mahfazalı Modüler Hücre Uygulamalarında Kullanılan Fiş Tipi Geçit İzolatörlerinde SF<sub>6</sub> Gazının Etkisi ve Elektrostatik Optimizasyon

SF<sub>6</sub> gazlı ayırıcılı bina içi orta gerilim modüler hücre uygulamalarında son yıllarda özellikle izolatör teknolojilerindeki ilerlemeye paralel olarak fiş tipi geçit izolatörleri de kullanılmaya başlanmıştır. Orta gerilim metal mahfazalı modüler hücre (MMMH)'ler orta gerilim dağıtım sistemleri için transformatör binalarında, beton veya saç köşklerde kullanılmak üzere tasarlanırlar.

Metal mahfazalı modüler hücre sisteminin sağladığı avantajları şu şekilde sıralayabiliriz [32].

1. Sistemin sağa yada sola genişleme imkanı vermesi alternatif çözümler sağlar.
2. Modüler yapı taşıma ve depolama kolaylığı sağlar, montaj zamanını kısaltır.
3. Modüler sistemlerin, açık sistemlerden daha az hacim kaplamaları nedeniyle yer problemi olan uygulamalarda avantajlı çözüm sunar.
4. Kurulu sistemlerin gerektiğinde rahatlıkla sökülebilmesi, uygulanmış projelerde kolaylıkla değişiklik yapma imkanı sağlar.
5. Hücre içerisindeki malzemeler kolay sökülebilir ve değiştirilebilir tasarıma sahiptir.
6. Opsiyonel olarak kullanılan haberleşme modüllü dijital röleler ile SCADA sistemlerine uygunluk sağlanır.
7. Opsiyonel olarak kullanılan enerji analizörü üzerinden sistemin izlenebilirliği, akım, gerilim, frekans gibi değerlerin okunmasına imkan sağlar.
8. Anahtarlama cihazlarının birbirleri ile ve kapaklar arasındaki mekanik, elektromekanik kilitlemeler hatalı operasyon yapılmasını önler.
9. Oluşabilecek bir iç ark arızasında devreye giren basınç boşaltma sistemi ile kullanıcı can emniyetini sağlar.
10. Hücre içerisinde kullanılan ayırıcı ve yük ayırıcıların SF<sub>6</sub> gazlı ve paslanmaz çelik metal gövdeli oluşu sistem çalışma emniyetini artırır.

11. Anahtarlama hücrelerinin uzaktan kumandaya uygun olması kullanım kolaylığı sağlar.
12. Hücrelerde en büyük açıklık 2,5 mm'dir. Dolayısıyla yılan, fare, kuş gibi hayvanların hücre içerisine girerek sistemde arızalara yol açması engellenmiş olur.
13. Hücre içerisinde kullanılan iç aydınlatma lambası, ısıtıcı ve termostat standart donanımdır. Isıtıcı-termostat bileşiği ile nem oluşumu engellenir.
14. Kapasitif gerilim bölücü ve "LED" tipi gerilim göstergeleri ile hücrenin enerjili olup olmadığı görülebilir. LED'lerin altında yer alan faz kontrol soketleri ile faz sırası ve faz kontrolü yapılabilir.

Klasik metal mahfazalı modüler hücre (MMMH)'ler ve gaz yalıtımlı hücre (GIS)'ler karşılaştırıldığında her ikisinin de yukardaki özelliklerin çoğuna sahip olduğu; fakat gaz yalıtımlı hücre (GIS)'lerin daha küçük boyutta olmaları, vakumla devre kesici ve SF<sub>6</sub> gazı yalıtımına sahip olmaları klasik MMMH'lere oranla daha çok tercih edilmelerini sağlamaktadır (Şekil 5.2).

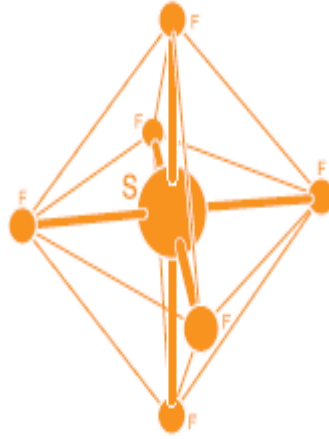


**Şekil:5.2:** Metal Mahfazalı Modüler Hücre (MMMH)'ler  
Klasik tip (soldaki); Gaz yalıtımlı tip (GIS) (sağdaki)



### Yalıtım gazı olarak neden SF<sub>6</sub> ?

Orta ve yüksek gerilim enerji üretim, iletim ve dağıtımında kullanılan sistem ve cihazların yalıtımları için seçilen gaz malzemelerinin, güvenilir bir çalışma ortamı oluşturması daima aranan bir özelliktir. Birçok aday olabilecek gaz yalıtım malzemeleri içerisinde kükürt-heksaflorür (sulphur hexafluoride-SF<sub>6</sub>) orta ve yüksek gerilimli enerji sistemlerindeki taşıma kablolarında, kesicilerde, transformatör istasyonlarında oldukça geniş bir uygulama alanı bulmuştur; Çünkü SF<sub>6</sub> gazı normalde durgun ve kimyasal yapısı itibarı ile de kararlı bir gaz olduğu gibi saf halde zehirli de değildir. Bunun yanı sıra SF<sub>6</sub>'nin dielektrik dayanımı, 1 bar basınç altında 89 kV/cm. dir. Bu da havaya göre yaklaşık üç kat daha fazla dielektrik dayanım özelliğine sahip olduğunu gösterir. Üstelik SF<sub>6</sub> mükemmel bir ısı transfer özelliğine sahip olup aynı zamanda yanmaz bir gazdır ve moleküllerin altı kovalent bağı sayesinde tutarlı bir yapıya sahiptir (Şekil 5.3). Bu özellikleri SF<sub>6</sub>'nin elektrik cihazlarında geniş bir kullanım alanına sahip olmasına neden olmuştur [38].



Şekil 5.3: SF<sub>6</sub> Gazının Yapısı

SF<sub>6</sub> gazı ayrıca,

- Maden kuyularında hava akışının yönünün saptanmasında izleme gazı olarak
- İyi ses yalıtımı sağlamak ve ısınma giderlerini düşürmek amacı ile ısıcam panellerinde ara katman olarak,
- Retina hastalıklarının tedavisinde cerrahi olarak
- Meteoroloji, metalurji uygulamalarında, tenis toplarında kullanılır.

## **SF<sub>6</sub> gazının çevresel etkileri**

Atmosferik kirlenmelerin iki önemli etkisi:

1. Ozon seyrelmesi (ozon tabakasında delik)
2. Ortalama küresel sıcaklık artışıdır (sera etkisi-greenhouse effect).

Bazı gazlar ozon tabakasının seyrelmesine yol açar. Seyrelmeye yol açan tüm gazlar klor içerirler. SF<sub>6</sub> gazı klor içermediğinden ozon tabakasına zararı söz konusu değildir.

Sera etkisine yol açan gazlar ise dünyadan geri yansıyan infrared ışınımını emen ve bu ışınımın atmosferde sıkışmasına sebep olan gazlardır. Bu sıkışma atmosferin ısınmasına yol açar. Bu gazların başında CO<sub>2</sub> ve su buharı gelir. SF<sub>6</sub> gazı 1995 yılında sera etkisine yol açan gazlar içerisinde anılmaya başlandı. Ancak SF<sub>6</sub> gazının yol açtığı etki, toplam içerisinde % 0,1 oranındadır ve dolayısı ile ihmal edilebilir sınırlardadır.

Hiç kuşku yok ki; SF<sub>6</sub> gazlı teknoloji, elektrik üretim ve dağıtımında, en güvenilir ve ekonomik çözümlerin sunumunda, birinci sırada yer almaktadır. Üreticilerin günümüzde geliştirmiş olduğu teknolojiler sayesinde, SF<sub>6</sub> gazlı ürünlerin, montajı, devreye alınması ve bakımı sırasında SF<sub>6</sub> gazı sızıntısı imkansızdır.

Metal mahfazalı modüler hücre (MMMH)'lerde kullanılan ayırıcılar da SF<sub>6</sub> gazı içerisinde çalışır. Ayırma ortamı SF<sub>6</sub> gazıdır. Bu özellik çalışma emniyeti açısından, yanlış manevra yada bir cihaz arızası sonucu oluşabilecek ark tehlikesine karşı bir avantajdır. SF<sub>6</sub> gazlı yük ayırıcısı ile aynı ölçülerdeki paslanmaz metalden imal edilmiş olan bir kazan içerisinde çalışan ayırıcı, doğrusal çalışan kontaklar vasıtası ile ayırma işlevini gerçekleştirir

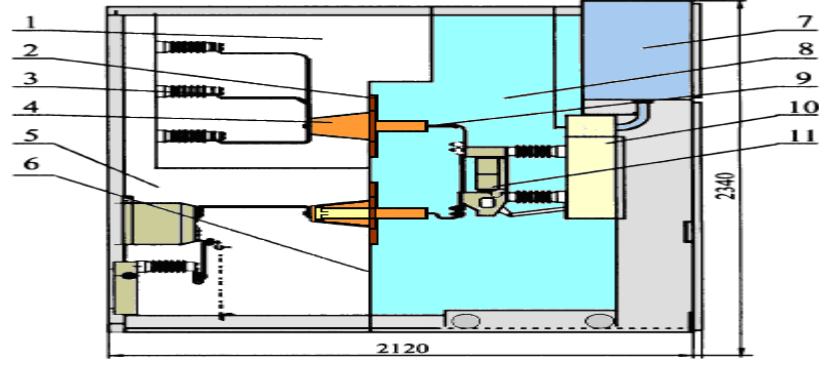
Kurulu sistemlerin daha sonra gerektiğinde rahatlıkla sökülebilmesi ve bunun sonucu olarak uygulanmış projelerde değişiklik yapabilme imkanı metal mahfazalı modüler hücrelerin belirleyici özellikleridir [32].

## **Elektrostatik alan analizi**

İzolatörlerin yalıtım bölümleri düzgün ve simetrik olacak, mekanik zorlamaların ve elektriksel alan dağılımının düzgün bir şekilde dağılımını sağlayacak ve radyo parazitlerini en aza indirecek şekilde tasarlanmalıdır.

Geçit izolatörü, geçit iletkeni eksenine göre ekstenel simetriye sahip üç boyutlu (3D) geometrik şekilli bir gerilim yalıtma ve yalıtılmış gövde içinden geçen iletkenle güvenle akım taşıma elemanıdır. İzolatör, geçit iletkeni (tiji) ile flanşı (gövde bağlantısı) arasındaki 50 Hz frekanslı gerilimin yaratacağı elektriksel zorlanmaya maruz kalacağı için yarı statik elektrik alan (frekansın çok düşük olması nedeniyle statik alan) zorlanması içindedir. Bu elemandaki elektriksel zorlanma da ekstenel simetriye sahiptir. Bu nedenle statik elektrik alan dağılımı, geçit izolatörünün eksteninden geçen bir düzlem üzerindeki izi üzerinde iki boyutlu olarak silindriyel koordinatlarda incelenebilir. Bu düzlem simetri eksteni çevresinde  $360^{\circ}$  döndürüldüğünde, tüm izolatördeki üç boyutlu elektriksel zorlanma elde edilir. Dahası, simetri ekstenine göre düzlemdeki izin sadece bir yarısı üzerindeki zorlanma da tüm zorlanmayı görmek bakımından yeterlidir. Ekstenel simetri nedeniyle yine simetri eksteni çevresinde bu yarı geometri  $360^{\circ}$  döndürüldüğünde tüm izolatördeki üç boyutlu elektriksel zorlanma görülür.

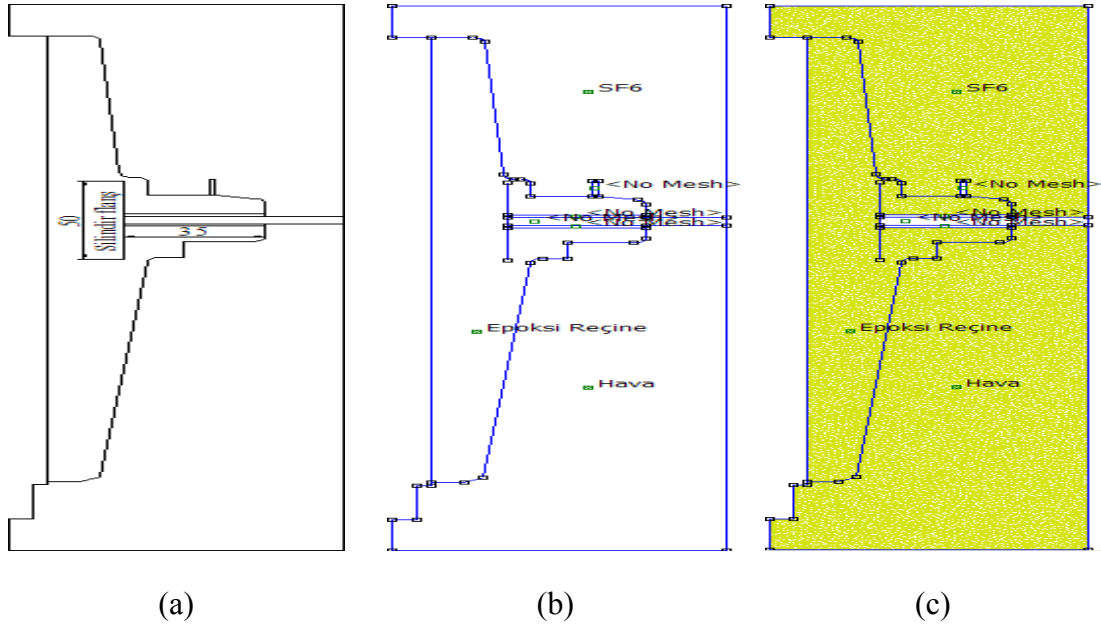
Bu yapıdaki problemleri bilgisayarda incelemek için kullanılan sayısal yöntemlerden birisi Sonlu Elemanlar Yöntemi'dir [33-36]. Problem ekstenel simetrik statik elektrik alan problemi olarak bu yöntemle tanımlanıp çözülebilir. Bu çalışmada geçit izolatörünün elektrik alan analizi, FEMM 4.2, Finite Element Method Magnetics, David Meeker ([dmeeker@ieee.org](mailto:dmeeker@ieee.org)), Copyright 1998-2006, açık lisanslı sonlu elemanlar programı ile yapılmıştır [31]. Aşağıda çözümlene sırasında atılan her adımın ve elde edilen sonuçların şekilleri verilmiştir (Şekil 5.4-5.9). Bu incelemeden amaç, izolatörün atlama ve delinme bakımından elektriksel zorlanmasını incelemek, uygun geometri ve boyutlar konusunu araştırmak ve sistemin kapasite, yük, elektriksel deplasman gibi elektriksel özelliklerini çıkarmaktır. Bu şekilde geçit izolatörünün elektriksel zorlanma durumu saptanmış ve sorunsuz kullanılabileceği görülmüş ve gösterilmiş olur. Bunun yanında, elde edilecek sonuçlardan geri besleme ile izolatörün malzeme türü, geometrisi, boyutları ve yapısı için en uygun durum arayışı da yapılabilir.



**Şekil 5.4:** Gaz Yalıtımlı Hücre (GIS) Sistemi

- |                             |                           |
|-----------------------------|---------------------------|
| 1. Bara bölmesi             | 7. Kontrol paneli         |
| 2. Metal kapak              | 8. Anahtarlama bölmesi    |
| 3. Bara                     | 9. Geri çekilebilir uçlar |
| 4. Fiş tipi geçit izolatörü | 10. Geri çekme ünitesi    |
| 5. Kablo bölmesi            | 11. Vakumla devre kesici  |
| 6. Ayırıcı bölme            |                           |

Fiş tipi geçit izolatörlerinin SF<sub>6</sub> gazlı modüler hücrelerde kullanımında montaj esnasında Şekil 5.4'deki sistem uygulanır. Bu sistemdeki geçit izolatörünün elektrostatik davranışı bilgisayar ortamında analiz edilmek üzere Şekil 5.5a' da geçit izolatörün bir yarısı ile tanımlanan modeli, Şekil 5.1'de gösterilen örnek tasarım modeli üzerinden tekrar AutoCAD'de modellenerek (.dxf) formatında FEMM 4.2'ye aktarılmıştır.



**Şekil 5.5:** Geçit İzolatörünün Elektrostatik Analiz İçin Eksenel Simetriden Yararlanarak Bir Yarısı İle Tanımlanması

a) Autocad modeli; b) FEMM 4.2 programına aktarılarak tanımlanmış model; c) Üçgen sonlu elemanlardan oluşturulmuş sonlu elemanlar ağı.

## Formülasyon

Maxwell denklemlerinden Faraday ve Gauss yasası temel elektrostatik alan denklemleridir.

Faraday yasası:

$$\nabla \times \vec{E} = \text{rot} \vec{E} = 0 \quad (5.1)$$

Gauss yasası:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \text{div} \vec{D} = \rho \quad (5.2)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (5.2a)$$

(5.1) eşitliğinden,

$$\vec{E} = -\nabla V = -\text{grad} \vec{V} \quad (5.3)$$

(5.2) ve (5.3) eşitliklerinden,

$$\nabla \cdot (\vec{D}) = \nabla \cdot (\epsilon \vec{E}) = \nabla \cdot \epsilon (-\nabla V) = \rho \quad (5.4)$$

yazılır. (5.4) eşitliği elektriksel Poisson denklemi olarak,

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (5.5)$$

şeklinde yazılır.

$\rho = 0$  ise (5.5) eşitliği,

$$\nabla^2 V = 0 \quad (5.6)$$

biçiminde Laplace denklemi olarak yazılır.

Potansiyel değeri bilindiği takdirde (5.3) eşitliği ile elektrik alan şiddetinin değeri belirlenebilir.

Bu bağıntılardaki büyüklükler,  $E$  (V/m) elektrik alan şiddeti,  $D$  (C/m<sup>2</sup>) elektriksel akı yoğunluğu,  $\rho$  (C/m<sup>3</sup>) elektriksel yük yoğunluğu,  $\nabla$  nabla vektörü,  $\epsilon$  dielektrik katsayısı (permitivite) dir.

## Program girdileri

Elektrostatik analiz için probleme Dirichlet ve Neumann sınır koşulları uygulanıp, aşağıdaki tanımlamalar da yapılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Dirichlet sınır koşulu:

$$V = \vec{V} \quad (5.7)$$

Neumann sınır koşulu:

$$([\epsilon] \nabla V) \vec{n} = \sigma \quad (5.8)$$

Burada,  $\sigma$  (S/m veya  $1/\Omega$ ) elektriksel iletkenliktir.

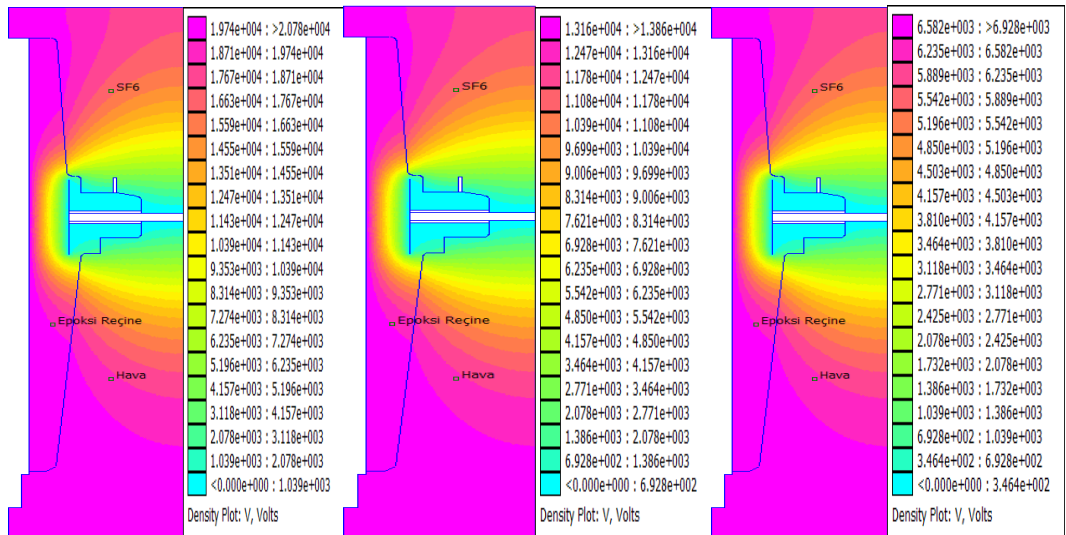
Geçit iletkeni potansiyelleri:

$$36/\sqrt{3} = 20,784 \text{ kV}; 24/\sqrt{3} = 13,856 \text{ kV}; 12/\sqrt{3} = 6,928 \text{ kV}$$

Flanş potansiyelleri: 0 V

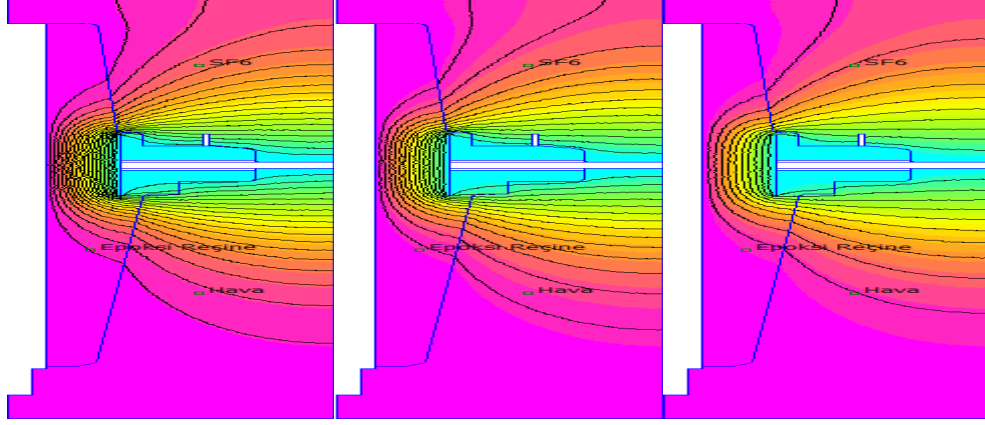
Materyal tanımlamaları (bağıl dielektrik sabitleri):

Hava ve SF<sub>6</sub> için  $\epsilon_r = \epsilon_z = 1$  [37]; Epoksi reçine için  $\epsilon_r = \epsilon_z = 4$  [29]



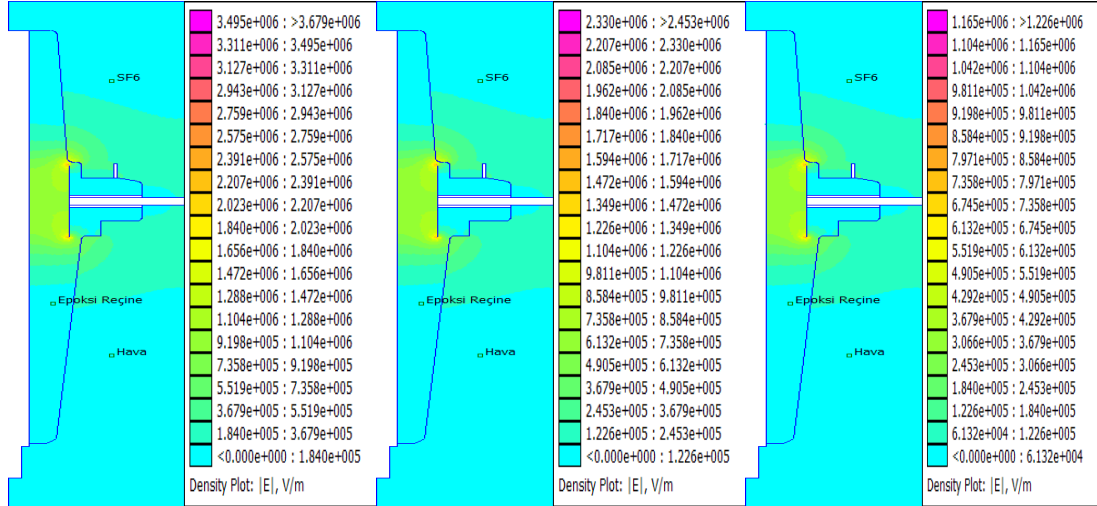
Şekil 5.6: 36 kV, 24 kV ve 12 kV Fiş Tipi Geçit İzolatörleri İçin  $\epsilon_0$  (vakum) =  $8,854 \cdot 10^{-12}$  F/m Alarak  $10^{-8}$  Doğrulukla Elde Edilen Potansiyel Dağılımları

Potansiyelin geçit iletkeni-flanş arasındaki bölgede yoğunlaştığı, bu bölge dışında seyreltiği elektriksel zorlanmanın da buna bağlı olacağı görülmektedir. (Şekil 5.6)



**Şekil 5.7:** 36 kV,24 kV ve 12 kV Fiş Tipi Geçit İzolatörleri İçin Elde Edilen Eşpotansiyel Çizgiler

Eş potansiyel çizgiler potansiyel dağılımının yoğunluğunu ve seyrini göstermesi bakımından önemlidir (Şekil 5.7)



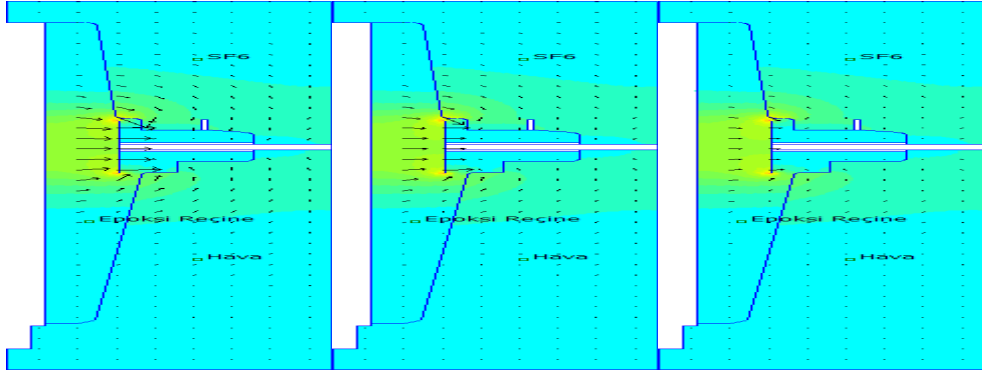
**Şekil:5.8:** 36 kV,24 kV ve 12 kV Fiş Tipi Geçit İzolatörleri İçin Elde Edilen Elektrik Alan Dağılımları

**Tablo 5.2:** FEMM 4.2’de Elde Edilen Elektrik Alan Şiddeti Değerleri

Model	Max. Alan Şiddeti	Min. Alan Şiddeti
36 kV	$3,679.10^6$ V/m = 36,79 kV/cm	$1,840.10^5$ V/m = 1,840 kV/cm
24 kV	$2,453.10^6$ V/m = 24,53 kV/cm	$1,226.10^5$ V/m = 1,226 kV/cm
12 kV	$1,226.10^6$ V/m = 12,26 kV/cm	$6,132.10^4$ V/m = 0,6132 kV/cm

En büyük zorlanma flanşa yakın bölgede olmaktadır (Şekil 5.8). Bu bileşke zorlanma, delinme dayanımı  $E_d$  (epoksi reçine) = 250 kV/cm mertebelerinde olan yalıtım maddesi için delinmesine yol açmayacak veya başka bir deyimle rahatça

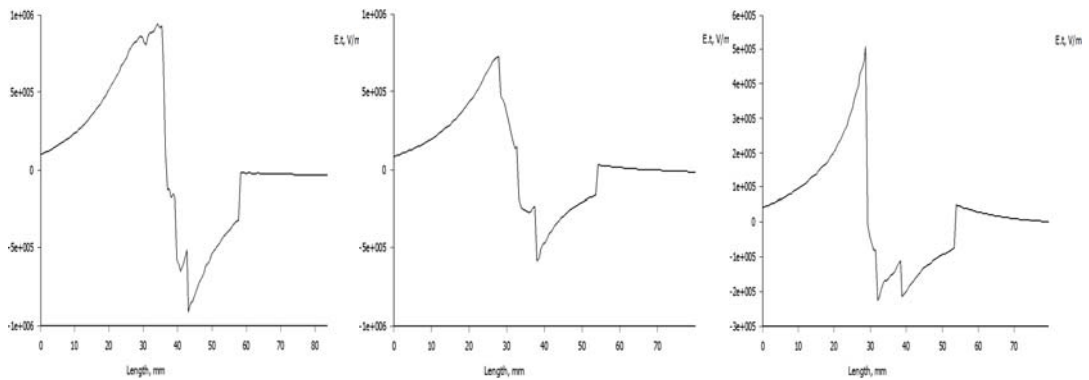
dayanabileceği bir zorlanmadır. Tablo 5.2’den görüleceği gibi aralarında büyük fark olması nedeniyle delinme bakımından kritik bir durum söz konusu değildir. Geçit izolatörü bu iç zorlanma koşullarında sorunsuzca uzun ömürlü olarak çalışabilir.



**Şekil:5.9:** 36 kV,24 kV ve 12 kV Fiş Tipi Geçit İzolatörleri İçin Elde Edilen Elektrik Alan Vektörleri

Elektrik alan vektörleri elektrik alan dağılımının yoğunluğunu ve seyrini göstermesi bakımından önemlidir (Şekil 5.9)

İzolatörde dış yüzeyi boyunca olabilecek boşalmaya yani elektriksel atlamaya neden olabilecek elektriksel zorlanma, izolatör yüzeyi üzerindeki elektrik alanının yüzeye teğet (teğetsel) elektrik alan bileşenidir. İzolatörün hava ve SF<sub>6</sub> gazı ile arakesitini oluşturan bu yüzeydeki alan şiddeti, havanın veya SF<sub>6</sub>’nın delinme dayanımını aşması halinde (epoksi reçineninkini aşması durumu anlamlı değildir, çünkü hava ve SF<sub>6</sub> gazının epoksi reçine ile paralel olması durumunda, delinme dayanımı epoksi reçineye göre çok küçük olan hava veya SF<sub>6</sub> tarafında boşalma (elektriksel atlama) olur) elektriksel atlama gerçekleşir [38-44]. Buna göre üç ayrı model için izolatörün üst bölümünde yüzey boyunca geçit iletkeninden flanşa kadar teğetsel alan değişimi yine sonlu elemanlar yöntemi ile arandığında Şekil 5.10’daki değişimler elde edilir.



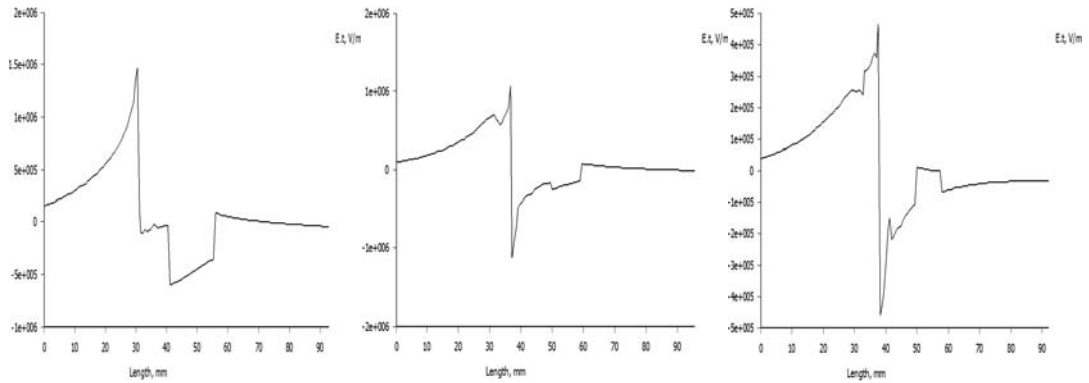
**Şekil 5.10:** 36 kV, 24 kV ve 12kV Fiş Tipi Geçit İzolatörlerin Üst Bölümü Yüzeyi Boyunca Elde Edilen Teğetsel Elektrik Alan Şiddetinin Değişimi



**Tablo 5.3:** FEMM 4.2’de İzolatörlerin Üst Bölümü Yüzeyi Boyunca Elde Edilen Teğetsel Max. Elektrik Alan Şiddeti Değerleri

Model	Teğetsel Max. Alan Şiddetleri
36 kV	$1.10^6$ V/m = 10 kV/cm
24 kV	$5,5.10^5$ V/m = 5,5 kV/cm
12 kV	$5.10^5$ V/m = 5 kV/cm

Şekil 5.10’deki üç ayrı model için de sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen grafikler doğrultusunda oluşturulan Tablo 5.3’den görüleceği gibi teğetsel alan şiddetlerinin 36 kV’luk model için maksimum 10 kV/cm, 24 kV’luk model için 5,5 kV/cm, 12 kV’luk model için ise 5 kV/cm olabileceği, bunun da delinme dayanımı  $75 \text{ kV}_{\text{tepe}}/\text{cm}$  veya  $53,03 \text{ kV}_{\text{etkin}}/\text{cm}$  olan SF<sub>6</sub>’yı delmeye yetmeyeceği ve izolatörlerde elektriksel atlamaya neden olabilecek düzeyde olmadığı görülür [39, 42] Benzer değişim izolatörün alt parçası için geçit iletkeninden flanşa kadar olan yüzey boyunca elde edilen teğetsel alan bileşeninde de görülmektedir (Şekil 5.11).



**Şekil 5.11:** 36 kV, 24 kV ve 12 kV Fiş Tipi Geçit İzolatörlerin Alt Bölümü Yüzeyi Boyunca Elde Edilen Teğetsel Elektrik Alan Şiddetinin Değişimi

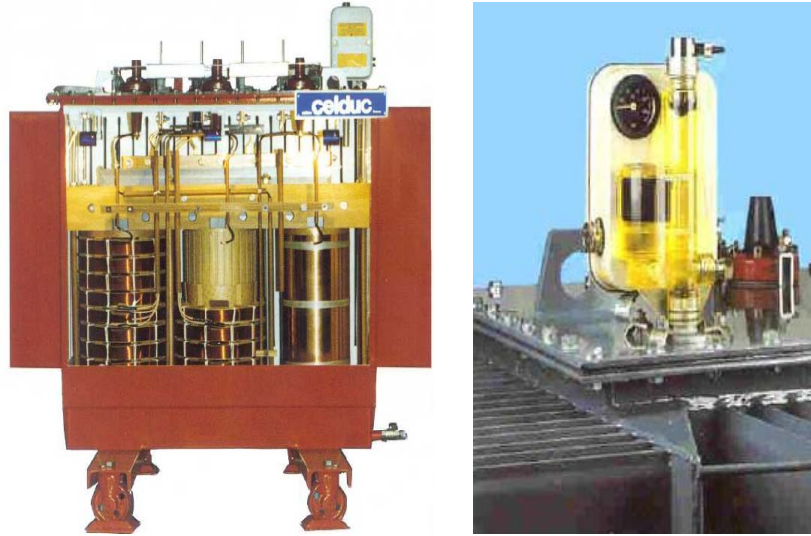
**Tablo 5.4:** FEMM 4.2’de İzolatörlerin Alt Bölümü Yüzeyi Boyunca Elde Edilen Teğetsel Elektrik Alan Şiddeti Değerleri

Model	Teğetsel Max. Alan Şiddetleri
36 kv	$1,5.10^6$ V/m = 15 kV/cm
24 kV	$1.10^6$ V/m = 10 kV/cm
12 kV	$5.10^5$ V/m = 5 kV/cm

Tablo 5.4'den görüleceği gibi alt parça için teğetsel alan şiddetinin 36 kV'luk model için maksimum 15 kV/cm, 24 kV'luk model için 10 kV/cm, 12 kV'luk model için ise 5 kV/cm olabileceği, bunun da delinme dayanımı  $30 \text{ kV}_{\text{tepe}}/\text{cm}$  veya  $21 \text{ kV}_{\text{etkin}}/\text{cm}$  olan havayı delmeye yetmeyeceği ve izolatorlerde elektriksel atlamaya neden olabilecek düzeyde olmadığı görülür.

#### 5.4.2 Yağ Daldırmalı Tip Transformatör Uygulamaları İçin Fiş Tipi Geçit İzolatörlerinin Isıl Benzetimle Sıcaklık Artışı Optimizasyonu

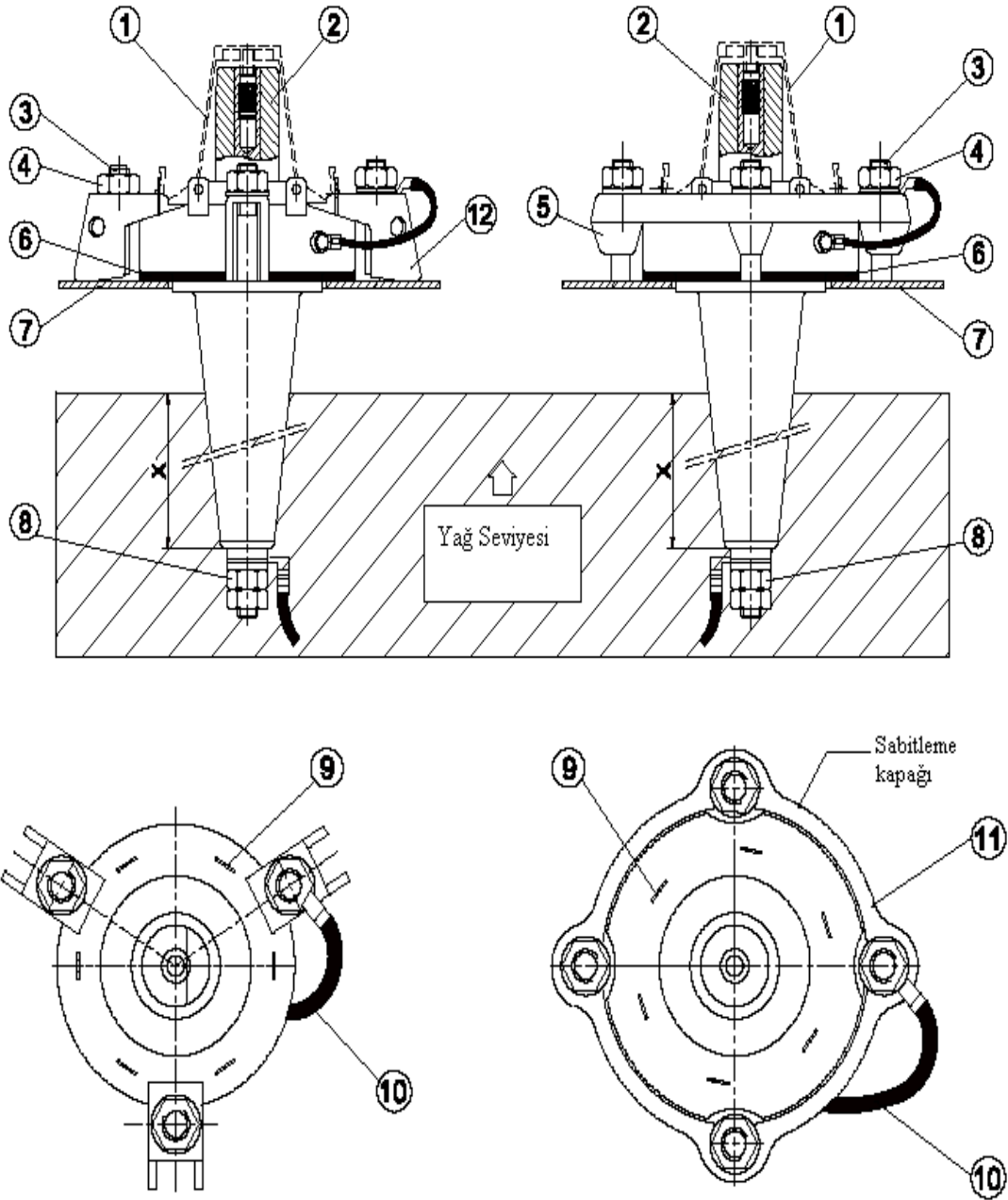
TS 595 EN 60137 standartında belirtildiği gibi cihaz üzerine monte edilen, cihazın kurutma işlemlerine dayanması gerekebilen geçit izolatörleri, hiçbir dış kuvvet uygulanmazsa, mekanik ve elektriksel hasar olmaksızın 12 saat süreyle  $140 \text{ }^\circ\text{C}$ 'lık bir sıcaklığa dayanabilmelidir [8]. Yağ daldırmalı trafolarla kullanılan epoksi reçineli fiş tipi geçit izolatörleri için TS 595 EN 60137 Md. 8.5'de belirtilen sıcaklık artış deneyi [6], ısıl benzetim yoluyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 5.12: Örnek Bir Transformatör Montajı

Şekil 5.12'de görüldüğü gibi fiş tipi geçit izolatörleri yağ daldırmalı transformatörlerde kullanıldığında yağ seviyesi kontrol sistemiyle izolatörün gerilim kademesine bağlı olarak yağ seviyesi ayarlanabilmektedir [43].

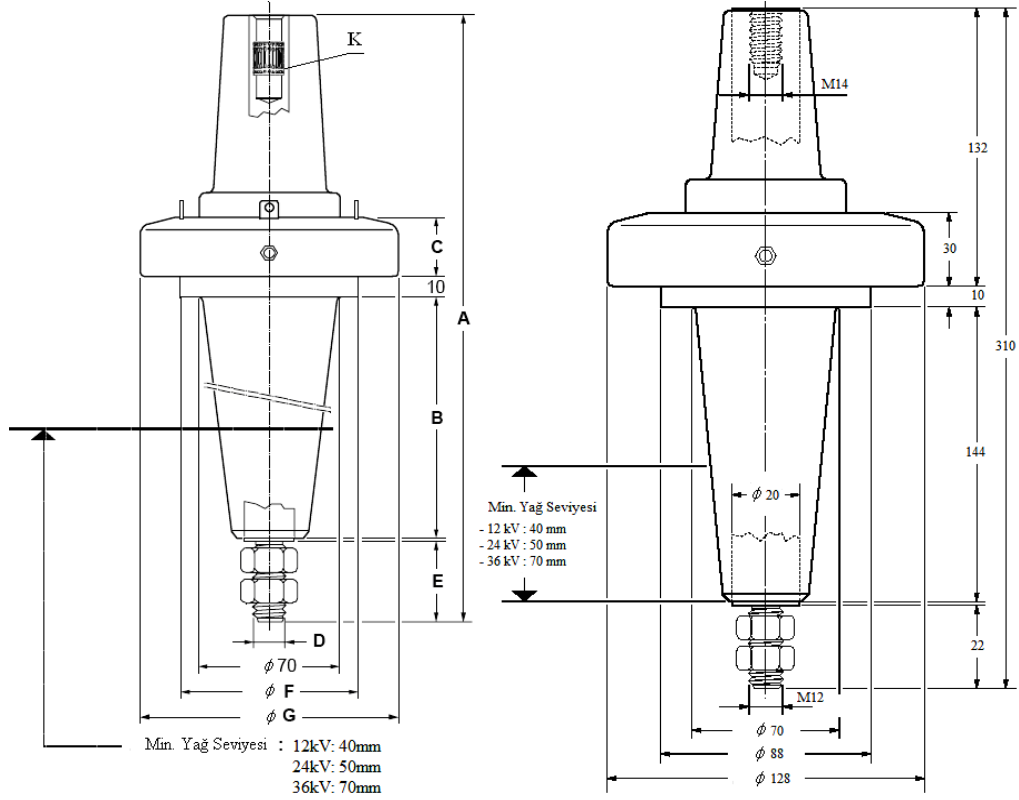
Fiş tipi geçit izolatörünün transformatör montajı şematik olarak Şekil 5.13'de gösterilmiştir [23].



**Şekil 5.13:** Transformatör Montajı Şematik Gösterimi

- |                     |                        |
|---------------------|------------------------|
| 1- Koruma Kapağı    | 7- Trafo               |
| 2- Bağlantı Arayüzü | 8- Bağlantı Civataları |
| 3- Cıvata           | 9- Bağlantı Ayakları   |
| 4- Altı Köşe Somun  | 10- Topraklama Campırı |
| 5- Mengene          | 11- Sabitleme Kapağı   |
| 6- Conta            | 12- Kısaç              |

Geçit izolatörlerinin Tablo 5.5’de belirtilen tasarım boyutlarına bağlı olarak yağ seviyesi yüksekliği gerilim kademesi arttıkça yükselmektedir (Şekil 5.14) [30]. Dolayısıyla trafolarla kullanılırken izolatörlerin tasarımının yapıldığı gerilim kademeleri göz önünde bulundurularak yağ seviyesi yüksekliği ayarlanmaktadır.



**Şekil 5.14:** Gerilim Kademesine Bağlı Yağ Seviyesi Yüksekliği

**Tablo 5.5:** Gerilim Kademense Bağlı Tasarım Karakteristikleri

Voltaj(kV)	Akım(A)	Boyutlar (mm)							
		A	B	C	D	E	F	G	K
12	400	310	144	30	M12	22	88	128	M16
24	400	310	144	30	M12	22	88	128	M16
36	400	310	144	30	M12	22	88	128	M16

İzolatörler gerek normal işletme koşullarında, gerekse sistemde meydana gelecek aşırı gerilimler ve kısa devreler nedeniyle oluşacak çekme, burulma ve eğilme kuvvetlerine, deprem ve titreşim sebebiyle meydana gelecek kuvvetlere dayanacak, ayrıca ani sıcaklık değişimleri, genleşme veya büzülme nedeniyle meydana gelecek zorlamalarda çatlamayacak ve kırılmayacak şekilde tasarımı yapılarak imal edilmelidir [45, 47]. Bu nedenle sonlu elemanlar yöntemiyle yapılacak ısıl benzetim analizleri ile izolatörlerin hem bulunduğu işletme koşullarından hem de çevre şartlarından etkilenme şiddeti hakkında önemli veriler elde edilmiş olur.

Yalıtkan malzemenin içine gömülmüş iletkenli geçit izolatörlerinde en sıcak noktanın sıcaklığı aşağıdaki gibi tayin edilebilir [6].

En büyük iletken sıcaklığı  $\theta_M$ , eşitlik (5.9) ve eşitlik (5.10) ile bulunur.

$$\theta_M = \frac{\left[ 3 \left( \frac{R_C}{R_A} \times \frac{1}{\alpha} + \theta_A \right) - \frac{3}{\alpha} - \theta_1 - \theta_2 \right]^2 - [\theta_1 \times \theta_2]}{3 \left[ 2 \left( \frac{R_C}{R_A} \times \frac{1}{\alpha} + \theta_A \right) - \frac{2}{\alpha} - \theta_1 - \theta_2 \right]} \quad (5.9)$$

$$M = \left[ 3 \frac{R_C}{R_A} \left( \frac{1}{\alpha} + \theta_A \right) - \frac{3}{\alpha} - \theta_1 - \theta_2 \right] - \theta_M \quad (5.10)$$

Eşitlik (5.10)'un sonucu  $M$  pozitifse, iletkenin daha yüksek sıcaklığı  $\theta_M$  dir ve iletkenin en uç iki noktası arasındaki herhangi bir noktasında konumlandırılır.  $M$  sonucu negatif veya sıfırsa, iletkenin daha yüksek sıcaklığı  $\theta_2$  dir.

İletken sıcaklığının en yüksek noktası, daha soğuk uçtan  $L_M$  mesafesinde bulunur.

$$L_M = \frac{L}{1 \pm \sqrt{\frac{\theta_M - \theta_2}{\theta_M - \theta_1}}} \quad (5.11)$$

Burada;

$\alpha$ : İletken direnci  $R_A$  ölçüldüğünde direncin sıcaklık katsayısı

$\theta_1$ : Celsius derece olarak, iletkenin daha soğuk ucunda ölçülen sıcaklığıdır.

$\theta_2$ : Celsius derece olarak, iletkenin daha sıcak ucunda ölçülen sıcaklığıdır.

$\theta_A$ : Celsius derece olarak, iletkenin düzgün referans sıcaklığıdır.

$\theta_M$ : Celsius derece olarak, iletkenin en yüksek sıcaklığıdır.

$L$ : İletkenin uzunluğudur.

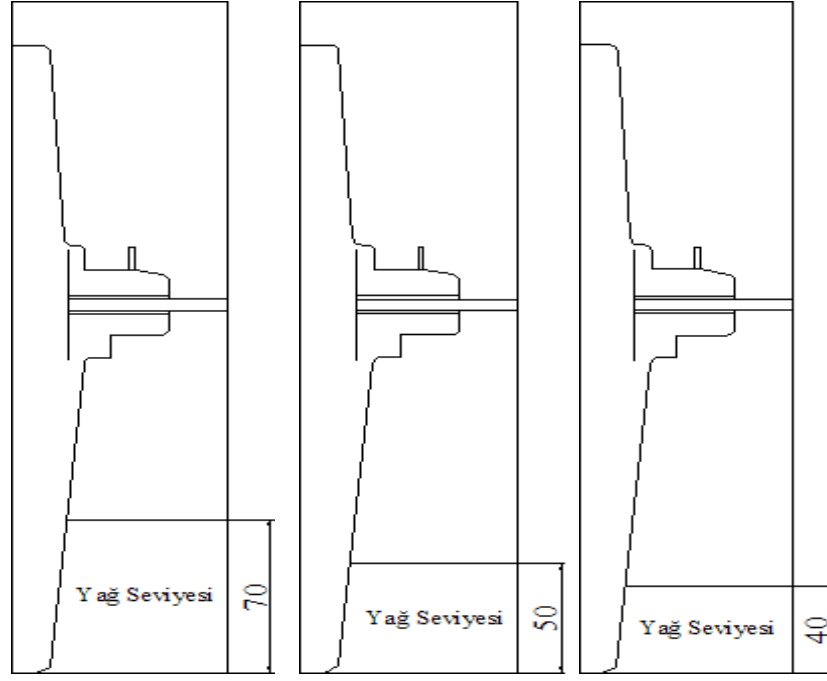
$L_M$ : İletkenin daha soğuk ucundan en yüksek sıcaklık noktasına olan uzaklığıdır.

$R_A$ : Düzgün sıcaklık  $\theta_A$ 'da, iletkenin uçları arasındaki dirençtir.

$R_C$ : Sıcaklığın kararlılığa erişmesinden sonra  $I_r$ 'i taşıyan iletkenin direncidir.

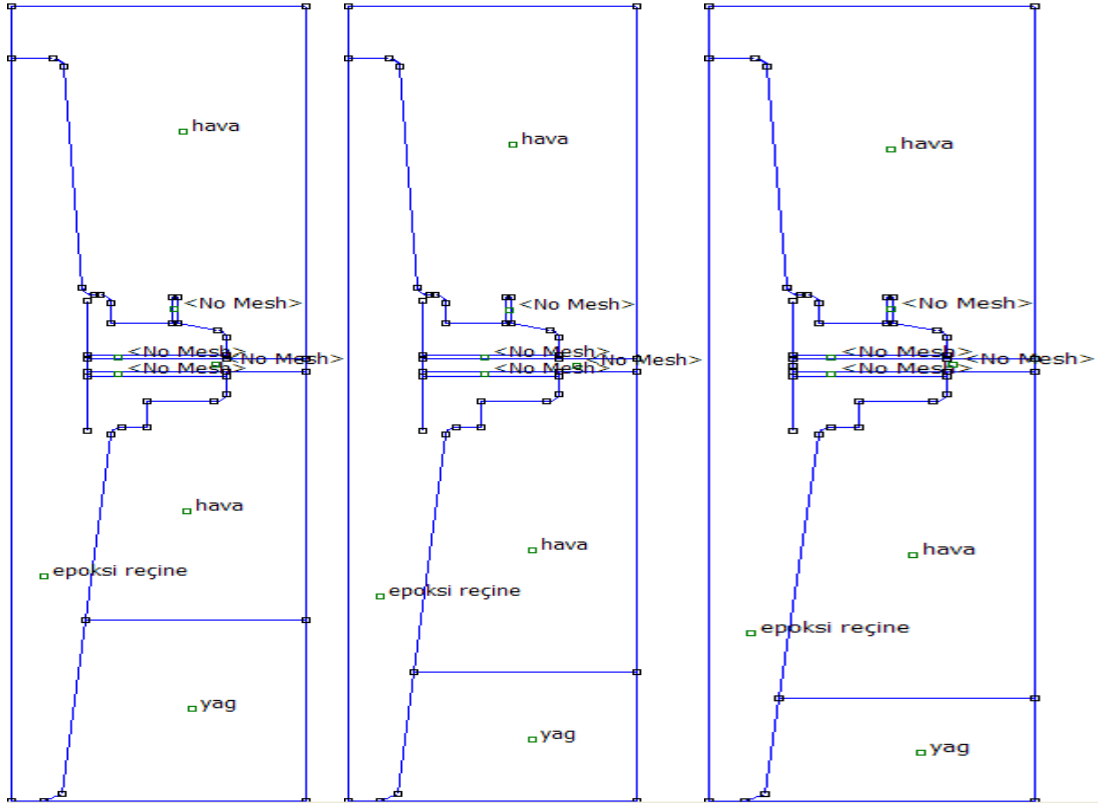
### Isıl analizler

Gerilim kademesine göre minimum yağ yüksekliği gösterilen AutoCAD modelleri hazırlandıktan sonra, FEMM 4.2'de ısı akışı problemi olarak açılan yeni sayfaya Şekil 5.15' deki AutoCAD (.dxf) formatındaki çizimler aktarılmıştır.



**Şekil 5.15:** 36 kV, 24 kV ve 12 kV Fiş Tipi Geçit İzolatörleri İçin AutoCAD Modelleri

Autocad ile çizilen bu modeller sonlu elemanlar programına aktarıldıktan sonra materyal ve iletken tanımlamaları da yapılarak çözümlenir (Şekil 5.16).



**Şekil 5.16:** 36 kV, 24 kV ve 12 kV Geçit İzolatörlerinin FEMM 4.2’de Isıl Analiz İçin Eksenel Simetriden Yararlanarak Bir Yarısı İle Tanımlanması

## Formülasyon

Isı akış yoğunluğu Gauss yasasına uymalıdır, bu yüzden ısı akışı problemleri çözümlenirken elektrostatik problemlere benzer olarak Gauss yasası,

$$\nabla \cdot \vec{F} = q \quad (5.12)$$

$$\vec{F} = k\vec{G} \quad (5.12a)$$

$$G = -\nabla T \quad (5.12b)$$

şeklinde farklı bir diferansiyel biçimde ifade edilir. Bu üç eşitlik birleştirilirse,

$$-\nabla \cdot (k\nabla T) = q \quad (5.13)$$

kısmi diferansiyel denklemini elde edilir. Bu eşitlik,

$$\nabla^2 T = -\frac{q}{k} \quad (5.14)$$

biçiminde yazılarak elektriksel poisson denklemine benzetilir.

Bu bağıntılardaki büyüklükler,  $q$  ( $W/m^3$ ) ısı üretim yoğunluğu,  $k$  ( $W/mK$ ) ısı iletkenlik katsayısı,  $T$  (K) sıcaklıktır.

## Program Girdileri

*Materyal tanımlamaları:*

Havanın ısı iletkenliği  $\lambda_h = 0,0181$  W/mK, epoksi reçinenin ısı iletkenliği  $\lambda_e = 0,35$  W/mK, transformatör yağının ısı iletkenliği  $\lambda_y = 0,110$  W/mK [46].

Transformatördeki yağın değerleri TS 10901 EN 60076-2'de belirtilen standart koşullarında uygun olmalıdır. Buna göre transformatör yağı için en büyük günlük ortalama sıcaklık değeri 90 °C dir [48].

*Toplam Isı Akışı (W):*

$$Q = (\rho\ell / S) \times I_C^2 \quad (5.15)$$

Burada,  $\rho$  iletkenin AA öz direnci,  $\ell$  iletkenin uzunluğu,  $S$  geçit iletkeninin yanal yüzey alanı,  $I_C$  kritik akım değeridir.

Bakırın öz direnci  $\rho = 16,8n\Omega m$  [29], İletken bakır tij boyu  $\ell = 310 \text{ mm} = 0.31 \text{ m}$

$I_c = 400 \text{ A}$  (üç model için de aynı)

Geçit iletkeni (bakır tij) yanal yüzey alanı:

$$S = S_1 + S_2 = 2\pi(r_1 \cdot \ell_1 + r_2 \ell_2) \quad (5.16)$$

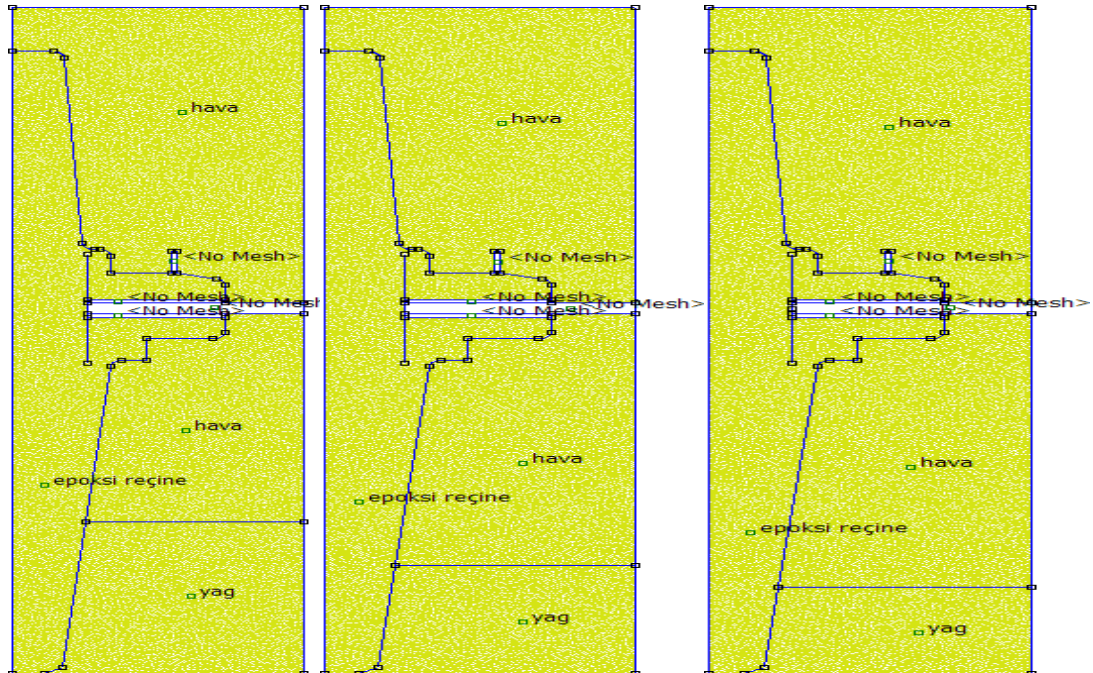
$$S = 2\pi.(6 \times 22 + 10 \times 288) = 18925 \text{ mm}^2 = 18925 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$Q = ((16,8 \cdot 10^{-9} \Omega m \times 0,31 \text{ m}) / 18925 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2) \times 400^2 = 4,4 \cdot 10^{-2} \text{ W (ısı akışı)}$$

*Sınır koşulları:*

TS 595 EN 60137 standardına göre hava yalıtımlı kanalda çalışan transformatör geçit izolatörleri için, hava tarafı uygun bir oda içerisinde kapatılmalıdır. Deney sırasında oda içindeki hava, kendi kendine ısıtma veya dolaylı olarak, ortam havasının  $40K \pm 2K$  üzerine ısıtılmalıdır [6]. Bu nedenle programda analizlere başlamadan önce dış ortam sıcaklığı  $345 \text{ K}$ 'e ayarlanmıştır. Bunun yanı sıra yağ üstü sıcaklığı da ara bölgede bulunan hava sıcaklığına getirilmiştir.

Geçit izolatörünün izin verilen sıcaklık sınırları TS 595 EN 60137 Md. 4.8'de belirtilen kalaylı havada,  $\text{SF}_6$ 'da ve yağda en büyük sıcaklık artışı için  $60 \text{ K}$  en büyük sıcaklık için ise  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  değerlerini aşmazsa deneyin dolayısıyla yapılan ısıl benzetim analizlerinin olumlu sonuç verdiği kabul edilir.

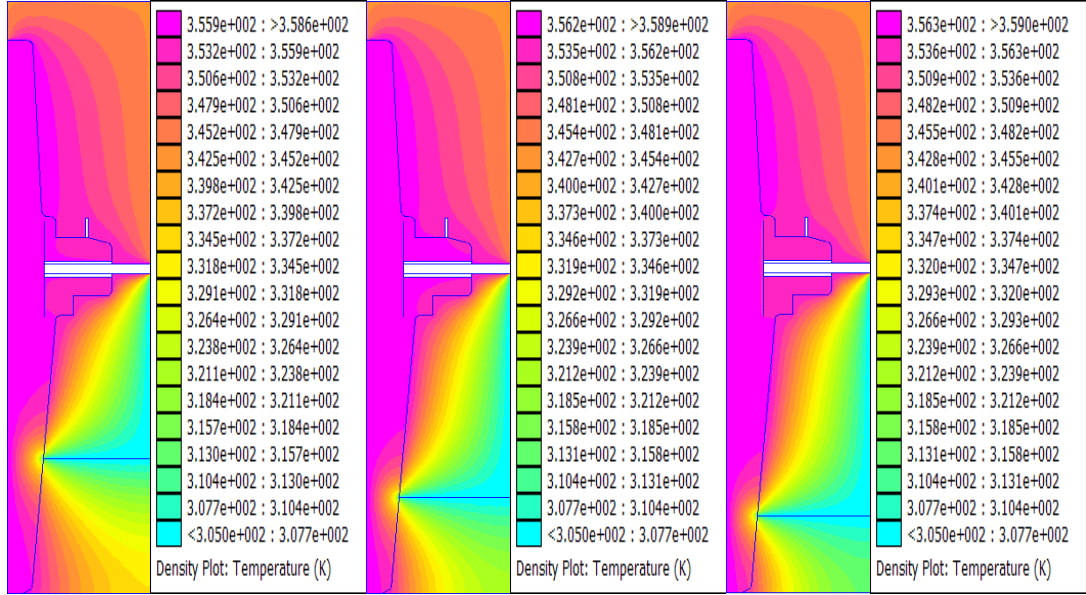


Şekil 5.17: Üçgen Sonlu Elemanlardan Oluşturulan Sonlu Elemanlar Ağı



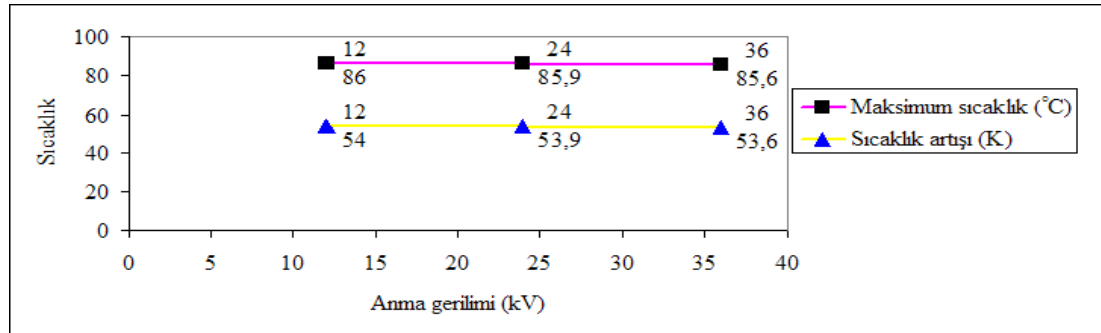
Programda Şekil 5.17'deki üçgen meshler (ağlar) elde edildikten sonra analizlere başlanabilmektedir.

Analizler sonucunda Şekil 5.18 deki sıcaklık dağılımları elde edilmiştir.



Şekil 5.18: 36 kV, 24 kV ve 12 kV Geçit İzolatörlerinin FEMM 4.2’de Elde Edilen Sıcaklık Dağılımları

Sıcaklık dağılımlarından da görüleceği gibi gerilim kademesi değeri düştükçe azalan yağ seviyesi yüksekliğine bağlı olarak izolatör yüzeyindeki en sıcak noktanın sıcaklık değeri gittikçe artmaktadır (Şekil 5.19). Bu sonuçtan hareketle yağ seviyesi düzeyinin azalmasıyla birlikte havayla temas halinde olan yüzey genişliğindeki artma, izolatörlerin ısınmasını artırmaktadır [49, 50]; fakat her üç gerilim kademesi için de kritik bir durum söz konusu değildir. Standartlarda belirtilen en büyük sıcaklık artışı değeri olan 60 K’den daha az bir ısınma gözlemiştir ki; bu da bize her üç gerilim kademesinde izolatörlerin güvenli bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 5.19: 36 kV, 24 kV ve 12 kV Geçit İzolatörlerin Sıcaklık Dağılım Eğrisi

## 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Sınırların kalktığı küresel rekabet ortamında, sektörde faaliyet gösteren diğer firmalarla yarışta öne çıkmak, müşteri beklentilerine cevap vermek ve memnuniyetini en üst seviyeye çıkarmak, ürün kalitesinin artırılması, etkin pazarlama faaliyetleri ile yapılabileceği gibi günümüz ekonomisinde tasarım yolu ile bu hedefe ulaşmış birçok kuruluş bulunmaktadır.

İzolatörler telgraf hatlarının kullanımı ile haberleşmede ilk adımın atılmasıyla birlikte insanların yaşam alanına girmiş ve günümüze kadar çeşitli evrimlerden geçerek en az kondansatörler kadar geniş bir pazara hitap eder duruma gelmiştir. Bu noktada teknolojik üstünlükler, firmalar için rekabet ortamında en önde giden unsur olarak öne çıkmıştır. Öyleki mevcut ar-ge yatırımlarıyla ve alınan teşviklerle, artık birçok yerli firmamız yurt dışı pazarında da etkin bir şekilde yer edinmeye başlamıştır. Çalışmada tasarımı gerçekleştirilen epoksi reçineli fiş tipi geçit izolatörleri için belirtilen teknolojik üstünlüklerin tümü yurt dışı pazarında dahi çok kısa bir zaman önce kullanılmaya başlanmıştır.

Fiş tipi geçit izolatörleri fiziksel yapıları dışında diğer tüm özellikleriyle klasik yapıdaki geçit izolatörleriyle benzerlik göstermektedir; fakat tasarım yöntemi tamamen farklı olup TSE ve IEC standartlarıyla ayrıca tanımlanmıştır. Bunun yanında tasarım yapılırken göz önünde bulundurulması gereken en önemli konu kullanılacak olan hammaddenin tüm özellikleriyle incelenip değerlendirilmiş olmasıdır. Özellikle epoksi reçineler konusunda birçok araştırmacı tarafından yayınlanmış çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Ayrıca fiş tipi geçit izolatörlerinin diğer tüm izolatör modelleriyle ortak birçok özelliği olması nedeniyle diğer izolatörlerde meydana gelen arıza ve kirlenme sorunları fiş tipi geçit izolatörleri için de geçerli olmaktadır.

Özellikle bina içi orta gerilim gaz yalıtımlı hücre (GIS) ve yağ daldırmalı transformatör uygulamaları için geliştirilen fiş tipi geçit izolatörleri, kullanıma oranı gün geçtikçe artan ve gerek sağladığı güvenlik gerekse ergonomik yapısı nedeniyle şartnamelerle kullanımı zorunlu hale getirilen bir üründür. Bu nedenle çalışmada

gerçekleştirilen elektrostatik ve ısı analizler ile fiş tipi geçit izolatörlerinin farklı koşullardaki davranışlarının incelenerek analiz edilmesi tüketicilerin klasik deney sonuçları dışında bilgisayar destekli analiz sonuçları aracılığıyla da bilgilendirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Orta gerilim gaz yalıtımlı hücre uygulamalarında fiş tipi geçit izolatörlerinin SF<sub>6</sub> gazıyla birlikte kullanılması nedeniyle, çalışmada elektrostatik yasalarına göre karşılaştırmalı analizlerle yapılan elektriksel zorlanma ve ömür analizleri, tasarımda kullanılan modelin üç orta gerilim kademesi için de (36 kV, 24 kV, 12 kV) uygun olduğunu göstermiştir.

Yağ daldırılmalı trafolar da son yıllarda sıkça kullanılmaya başlayan fiş tipi geçit izolatörleri, trafo üreticileri tarafından tüketicilerin isteğine bağlı olarak üç gerilim kademesi için de trafo üretimlerinde kullanılmaktadır. Bu nedenle TS 595 EN 60137 Md. 8.5'de geçen sıcaklık artış deneyi özellikle izolatörlerin kullanıldığı işletmelerin güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Çalışmada gerçekleştirilen ısı analizler sonucunda üç gerilim kademesi için de izolatörlerin güvenli bir sıcaklık aralığında çalıştığı ve işletmeler açısından tehlike arz etmeyeceği gösterilmiştir.

Kondansatör tasarımında olduğu gibi izolatör tasarımında da modellemeler ve sonlu elemanlar yöntemi analizleri iki boyutlu olarak yapılmıştır; fakat piyasadaki birçok program ile bu analizler izolatörler için de üç boyutlu olarak yapılabilir. Ayrıca epoksi reçineler konusunda yapılan bilimsel çalışmalar sıklıkla takip edildiği takdirde izolatörler için daha üstün özellikte reçine üretimi de geliştirilebilir. Bunun yanı sıra izolatörlerin içerisinde kullanılan geçit iletkeni (tij) için seçilen malzeme cinsi katkısız (saf) bakır olması durumunda, tasarlanan ya da üretilen izolatörler daha üstün bir kaliteye sahip olacaktır.

## KAYNAKLAR

### KISIM 1

- [1] **Bayram, M.**, 2000. Kuvvetli Akım Tesislerinde Reaktif Güç Kompanzasyonu, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [2] <http://tr.wikipedia.org/wiki/Kondansat%C3%B6r>, Aralık 2007.
- [3] **EMO İstanbul Şubesi**, 1983. Reaktif Güç Kompanzasyonu Seminer Notları. Öznur Ofset, İstanbul
- [4] **TS EN 60831-1**, 2001. Kondansatörler-Şönt Güç Kondansatörleri-Kendini Onaran Tip-Beyan Gerilimi 1000 V'a Kadar (1000 V Dahil) Olan A.A. Sistemleri İçin-Bölüm 1: Genel Performans, Deney ve Beyan Değerleri-Güvenlik Kuralları-Tesis Edilmesi ve İşletilmesi İçin Kılavuz, *Türk Standartları Enstitüsü*, Kasım 2001, Ankara.
- [5] **TS EN 60831-2**, 2001. Kondansatörler-Şönt Güç Kondansatörleri-Kendini Onaran Tip-Beyan Gerilimi 1000 V'a Kadar (1000 V Dahil) Olan AA Sistemleri İçin Bölüm 2: Yaşlanma Deneyi, Kendini Onarma Deneyi ve Tahrip Deneyi,*Türk Standartları Enstitüsü*, Kasım 2001, Ankara.
- [6] **Kalenderli, Ö., Kocatepe, C. ve Arıkan, O.**, 2005. Çözümlü Problemlerle Yüksek Gerilim Tekniği, Cilt 1, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [7] **Tagare, D.M.**, 2002. Electrical Power Capacitors, Design and Manufacture, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi.
- [8] **Birouche, C., Bitam-Megherbi, F., Moudoud, M., Mekious, M. and Megharbi, M.**, 2005. High frequency numerical model for parasitic inductance calculation for rectangular capacitor with metallized films, *Proceedings of the XIV<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering*, Tsinghua University, Beijing, China, August 25-29.
- [9] **EDE Grup**, 2007. Capacitor Catalog, İstanbul.
- [10] **Blomquist, W.C.**, 1950. Capacitors for Industry: Their Selection, Application, and Economics for Power-Factor Improvement of Industrial Plants, New York: Wiley.
- [11] **Sarjeant, W.J., Zirnheld, J. and MacDougall, F. W.**, 1998. Capacitors, *IEEE Transactions on Plasma Science*, **26**, no. 5, October 1998, pp. 1368-1392.
- [12] **Güler, Ö.**, 1995. Reaktif Güç Kompanzasyonu ve Sakıncaları, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [13] **Öztürk, O.İ.**, 1998. Statik VAR Kompanzatörü İle Reaktif Güç Kontrolü ve Kompanzasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [14] **Tomago, A., Shimizu, T., Iijima, Y. and Yamauchi, I.**, 1977. Development of Oil-Impregnated, All-Polypropylene-Film Power Capacitor, *IEEE Trans. Electr. Insul.*, **EI-12**, No. 4, August 1977.
- [15] <http://www.bollrefilms.com/en/dielectric/default.html>, December 2007.
- [16] <http://www.steinerfilm.de/homeflash.html>, December 2007.
- [17] **Schneuwly, P., Groning, L. and Schlapbach, L.**, 1998. Breakdown Behavior of Oil-Impregnated Polypropylene as Dielectric in Film Capacitors, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **5**, No. 6, December 1998.
- [18] **Ducati Energia Spa**, 2006. Catalog of Low Voltage Power Factor Correction Capacitors and Equipment, Ducati Energia, Bologna.
- [19] **EPCOS AG**, 2007. Applications Notes, Munich, Germany.
- [20] **Youmneg, L., Zhaolin, L.**, 2000. Application Research of Polypropylene Film, *Proceeding of the 6<sup>th</sup> International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, June 21-26, 2000, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China.
- [21] **Gonzaga, D.P., Murakami, C.R., Chierige, G.O. and Altafim, R.A.C.**, 1998. Electrical Characterization of Castor-Oil Resins, *Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Arlington, Virginia, USA, June 7-10, pp. 181-185.
- [22] **Mammootty, K.P., Ramu, T.S.**, 1983. Properties of Castor Oil Impregnated All Polypropylene and Polypropylene-Paper Capacitors, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, **EI-18**, No.5, October 1983, pp.541-550.
- [23] **TS 12519**, 1998. Bitkisel Yağlar-Hint Yağı (Eczacılık ve Sanayide Kullanılan), *Türk Standartları Enstitüsü*, Aralık 1998, Ankara.
- [24] **Pirani, S., Rinaldi, P.**, 2003. Measurements of Small Diametral Vibrations in Metallized Polypropylene Capacitors Subjected to Current Pulses, by Means of Laser Vibrometry, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **18**, no. 1, January 2003, pp. 277-282.
- [25] **Fuchang, L., Xin, D., Jin, L. and Zonggan, Y.**, 2000. Influence Factors for the Self-Healing of Metallized Polypropylene Capacitors, *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 461-465.
- [26] **Yossida, Y., Nishimatsu, M.**, 1986. Power Capacitors, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, **EI-21**, No. 6, December 1986.
- [27] **El-Husseini, M.H., Venet, P., Rojat, G. and Fathallah, M.**, 2001. Effect of the Geometry on the Aging of Metalized Polypropylene Film Capacitor, *IEEE-PESC Conference*, pp. 2061-2066.
- [28] **Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Karakaş, A., Yumurtacı, R. ve Arıkan, O.**, 2003. Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, İstanbul.

- [29] **Brown, R.W.**, 2006. Linking Corrosion and Catastrophic Failure in Low-Power Metallized Polypropylene Capacitors, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, **6**, no. 2, June 2006, pp. 326-333.
- [30] **El-Husseini, M.H., Venet, P., Rojat, G., Al-Majit, A. and Fathallah, M.**, 2001. Improving Pulse Handling Capability of Metalized Polypropylene Films Capacitors, *IEEE-PESC Conference*, pp. 2481-2486.
- [31] **El-Husseini, M.H., Venet, P., Rojat, G. and Joubert, C.**, 2002. Thermal Simulation for Geometric Optimization of Metallized Polypropylene Film Capacitors, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **38**, no. 3, May/June 2002., pp. 713-718.
- [32] **Joubert, Ch.**, 1996. Etude des hénomènes Electromagnétiques dans les condensateurs à films métallisés-Nouvelle génération des condensateurs, *Thèse de doctorat*, Ecole Centrale de Lyon.
- [33] **Taylor, D.M., Fernandez, O.**, 2005. Thermal Instability of Electromechanical Films of Cellular Polypropylene, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **12**, No. 4, August 2005.
- [34] **Franco, S.**, 1996. Polypropylene Capacitors for Snubber Applications, Cornell Dubilier Electronics, pp. 1337-1342.
- [35] **Zienkiewicz, O.C.**, 1977. The Finite Element Method, McGraw-Hill, London
- [36] **Jin, J.**, 1993. The Finite Element Method in Electromagnetics, Wiley, New York.
- [37] **Kalenderli, Ö.**, 1997. Elektrik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi Ders Notları, İ.T.Ü.
- [38] <http://staff.ttu.ee/~alahe/alem.html>, December 2007.
- [39] **Meeker, D.**, FEMM 4.2, Finite Element Method Magnetics, Copyright 1998-2006, California.
- [40] **Stugg, W.T.**, 1986. Handbook of Electrical and Electronic Insulating Materials, IEEE Dielectric and Electrical Insulation Society, *The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.*, New York.
- [41] <http://www.engineeringtoolbox.com/>, December 2007.
- [42] **Vuillermet, Y., Chadebec, O., Lupin, J.M., Saker, A., Meunier, G. and Coulomb, J.L.**, 2007. Optimization of Low-Voltage Metallized Film Capacitor Geometry, *IEEE Transactions on Magnetics*, **43**, no. 4, April 2007.
- [43] **General Atomics Energy Products**, Engineering Bultein Capacitors, San Diego.
- [44] **Qingquan, L., Yunjie, Z. and Shouguo, S.**, The Influence of Impregnants on the Breakdown Behaviour of Polypropylene Films, *Dong Fung Insulation Materials Works*, Mian Yang 621000, Sichuan, China, pp. 541-544.
- [45] **Xiaoguang, Qi.**, 2006. High Current and Field Characteristics of Metalized Film Capacitors, *PhD Thesis*, University of Connecticut, Storrs.

- [46] **Kalenderli, Ö., Yılmaz, G.**, 1996. The Effect of Thickness and Area on the Electric Strength of Thin Dielectric Films, *Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Montreal, Quebec, Canada, June 16-19, 1996., pp. 478-481.
- [47] <http://lem.univ-montp2.fr/>, December 2007.
- [48] **Transmisison and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society**, 1992. IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors, *IEEE Std.*, No: 1036-1992.
- [49] **Kan, İ.G.**, 2004. Elektrik Elektronik Formül ve Tablolar, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [50] **Matsch, L.W.**, 1964. Capacitors, Magnetic Circuits, and Transformers, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.
- [51] **Yasufuku, S., Umemura, T. and Yasuda, Y.**, 1978. Dielectric Properties of Oil-Impregnated All Polypropylene Film, Power Capacitor Insulation System, *IEEE Trans. Electr. Insul.*, **EI-13**, No.6, December 1978.
- [52] **Takeoka, H., Saito, T., Shiota, K., Sasaki, T., Okabe, S. and Nishimori, T.**, 2003. Development of polypropylene Film Capacitor Using Double Metallizing Technology, *Proceeding of the 7<sup>th</sup> International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Nagoya, June 1-5 2003., pp. 1198-1201.
- [53] **Brown, R.W.**, 2007. Modeling of Capacitor Parameters Related to the Metal Film Layer With Partial Edge Disconnection, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, pp 1-7.

## KISIM 2

- [1] **Fırat, A.H.**, 2006. Yüksek Gerilim Elemanları ve Devre Şemaları, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [2] **Tosun, İ.**, 2007. Enerji İletimi ve Dağıtımı, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [3] **Saner, Y.**, 2004. Güç İletimi (Enerji Taşınması), Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [4] **EDE Grup**, 2007. Catalog of Post Insulators for Medium Voltage, İstanbul.
- [5] **ALCE**, 2005. Post Insulators and Bushings for Medium Voltage. İstanbul.
- [6] **TS 595 EN 60137**, 2006. Yalıtkan Geçit İzolatörleri-1kV'un Üzerindeki Alternatif Gerilimler İçin, *Türk Standartları Enstitüsü*, Şubat 2006, Ankara.
- [7] **TS EN 50181**, 2004. Geçiş İzolatörleri Fiş Tipi Sıvı ile Doldurulmuş Transformatörler Dışındaki Donanım İçin Kullanılan Gerilimi 1 kV'un Üstünde 36 kV'a kadar (36 kV dahil) Akımı 250 A'den 1,25 kA'e kadar, *Türk Standartları Enstitüsü*, Nisan 2004, Ankara.
- [8] **TEDAŞ Genel Müdürlüğü**, 1996. Orta Gerilim Mesnet İzolatörleri Teknik Şartnamesi, Eltem-Tek Elektrik Tesisleri Müh. Hiz ve Tic. A.Ş., Haziran 1996.
- [9] **Çetin, E., Özer, N.L. ve Çetin, M.**, Porselen İzolatörlerde İzolasyon Problemleri, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **11**, Sayı 2, 287-292.
- [10] **Rumeli, A.**, 1973. Yüksek Gerilim İzolatörlerinin Kirlenme Atlama Gerilimlerinin Hesaplanması, TUBİTAK Mühendislik Araştırma Grubu, Ankara.
- [11] **Gençoğlu, T.M., Cebeci, M.**, İzolatör Kaçak Akımlarının Yüzeysel Atlama Gerilimlerinin Çevresel Faktörlere Bağımlılığı, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **22 (1-2)**, 37-39.
- [12] **Janos, D.**, Harici Tip Yüksek Gerilim İzolatörlerinin İşletilmesi ve Bakımı, *Elektrik Mühendisliği Mecmuası*, Sayı 279, 112-119.
- [13] **Looms, J.S.T.**, 1990. Insulators for High Voltages, Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom.
- [14] **Rumeli, A.**, 1969. İzolatörlerde Kirlenme ve Atlama Problemi, *Elektrik Mühendisliği Mecmuası*, **13**, Sayı 156.
- [15] **Kalenderli, Ö., Parlak, Ş.A.**, 2000. Alçak Basınçta Reçine İzolatörlerde Atlama, *ELECO'2000 Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, s. 146-149, 8-12 Kasım, Bursa.
- [16] **Kaleseramik Çanakkale Kalebodur Seramik Sanayi A.Ş.**, İzolatör Kataloğu, Çan, Çanakkale.
- [17] <http://www.insulators.com/service/> December 2007.



- [18] [http://www.jordan-siegburg.de/english/insulators\\_01.html](http://www.jordan-siegburg.de/english/insulators_01.html), December 2007.
- [19] <http://www.insulators.be/en/index.htm>, December 2007.
- [20] **RISHO**, 2007. Risho Epoxy Resin Mold Insulators.
- [21] **Elliott Industries, Inc.**, 2005. ELRIM Cycloaliphatic Epoxy Bushings Catalog, Bossier City, LA, USA.
- [22] **Euromold**, 2006. Catalog of Medium Voltage Separable Connectors and Bushings, Nexans, Erembodegem, Germany.
- [23] **ELMEK Elektromekanik San. ve Tic. A.Ş.**, 2006. RBUS Catalogue, İstanbul.
- [24] **Rumeli, A., Wilkins, R.**, 1971. Epoksi Reçinelerin Yüksek Gerilim İzolasyonlarında Kullanılması, *Elektrik Mühendisliği Mecmuası*, **15**, Sayı 171-172.
- [25] **Arabul, H.**, 1967. Epoxy Reçine (Epoxy Resin) Maddesinin Yüksek Gerilim Altında Çalışan Ölçü Transformatörlerinde Kullanılması, *Elektrik Mühendisliği Mecmuası*, Sayı 126.
- [26] **Lee, H. and Neville, K.**, 1957. Epoxy Resins; Their Applications and Technology, Mc Graw-Hill Book Company, New York.
- [27] **Kind, D. and Karner, H.**, 1985. High Voltage Insulation Technology, Friedr. Vieweg & Sons, Braunschweig/Wiesbaden.
- [28] **Alston, L.L.**, 1966. High Voltage Technology, Oxford University Press, Great Britain.
- [29] **Stugg, W.T.**, 1986. Handbook of Electrical and Electronic Insulating Materials, IEEE Dielectric and Electrical Insulation Society, *The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.*, New York.
- [30] **Elastimold Supply**, 2001. E-Catalogue, Accessories for Medium Voltage Power Cables 12 kV-24 kV-36 kV, Nexans, 02/2001, Erenbodegem, Germany.
- [31] **Meeker, D.**, FEMM 4.2, Finite Element Method Magnetics, Copyright 1998-2006, California.
- [32] **ELİMSAN Şalt Cihazları ve Elektromekanik San. ve Tic. A.Ş.**, 2004. Medium, and High Voltage Switchgear Equipments Catalogue, Elimsan Grup, Uzuntarla, İzmit.
- [33] **Zienkiewicz, O.C.**, 1977. The Finite Element Method, McGraw-Hill, London
- [34] **Jin, J.**, 1993. The Finite Element Method in Electromagnetics, Wiley, New York.
- [35] <http://staff.ttu.ee/~alahe/alem.html>, December 2007.
- [36] **Kalenderli, Ö.**, 1997. Elektrik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi Ders Notları, İ.T.Ü., İstanbul.
- [37] <http://www.beyondchem.com/sf6.htm>, December 2007.
- [38] **Kalenderli, Ö., Kocatepe, C. ve Arıkan, O.**, 2005. Çözümlü Problemlerle Yüksek Gerilim Tekniği, Cilt 1, Birsen Yayınevi, İstanbul.

- [39] **Kitak, P., Pihler, J. and Ticar, I.**, 2005. Optimisation algorithm for the design of bushing for indoor SF<sub>6</sub> switchgear applications, *IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, **152**, No. 5, September 2005.
- [40] **Pihler, J., Ticar, I. and Vorsic, J.**, 1998. Epoxy Bushing Used in Medium Voltage Switchgear, *IEEE International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics*, June 22-25, Vösters, Sweden.
- [41] **Kitak, P., Pihler, J., Ticar, I., Stermecki, A., Biro, O. and Preis, K.**, 2007. Potential Control Inside Switch Device Using FEM and Stochastic Optimization Algorithm, *IEEE Transactions on Magnetics*, **43**, No. 4, April 2007.
- [42] **Güemes, J.A., Postigo, M. and Hernando, F.E.**, 2000. Influence of Leader Shields in the Electric Field Distribution in Bushings, *The University of the Basque Country, Dpto. De Ingeniera Electrica, Plaza de la Casilla, 3-48012, Bibao-Spain*, pp. 698-703.
- [43] **Celduc Transfo**, Catalog of Oil Immersed Transformer, Sorbiers, France.
- [44] **Tang, L.**, 2002. Modelling of HVDC Wall Bushing Flashover Due to Uneven Wetting, *PhD Thesis*, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada, April 2002.
- [45] **Transformers Committee of the IEEE Power Engineering Society**, 1995. IEEE Guide for Application of Power Apparatus Bushings, *IEEE Std.*, No: C57. 19. 100-1995.
- [46] <http://www.engineeringtoolbox.com/>, December 2007.
- [47] **Özkaya, M.**, 1996. Yüksek Gerilim Tekniği, Cilt 1, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [48] **TS 10901 EN 60076-2**, 1998. Güç Transformatörleri-Bölüm 2-Sıcaklık Artışı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [49] **Zeng, D.**, 2000. An Experimental Thermal Siphon Bushing, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **15**, No. 1, January 2000.
- [50] **Cedaspe S.p.A.**, 2004. Catalog of Accessories for Electric Transformers, Giuliano Milanese.
- [51] **TS 60660**, 2006. İzolatörler-Anma Gerilimi 1 kV'tan 300 kV'a Kadar Olan (300 kV Hariç) Sistemler İçin Organik Malzemedan Bina İçi Mesnet İzolatörlerinin Deneyleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Nisan 2006, Ankara.
- [52] **TS 4237**, 1984. Anma Gerilimi 1000 V'tan Büyük 300 kV'a Kadar Olan Sistemlerde Kullanılan Organik Malzemedan Bina İçi Mesnet İzolatörlerinin Deney Metodları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Nisan 1984, Ankara.
- [53] **Kaleseramik Çanakkale Kalebodur Seramik Sanayi A.Ş.**, Kaleseramik İzolatör Fabrikası Yüksek Gerilim Laboratuvarı Deneyleri, Çan, Çanakkale.

## KISIM 1

### Ek A MATEMATİKSEL DENKLEMLER

#### A.1 Elektrostatik Alan Formülleri

Elektrostatik alan formülleri şunlardır [1, 3, 6, 7, 49-52]:

Elektrik alan formülü:

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{kq}{r^2} \quad (\text{A.1})$$

Elektrostatik kuvvet:

$$F = q \times E \quad (\text{A.2})$$

Elektrik yükleri arası kuvvet:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (\text{A.3})$$

Bir elektriksel yükün oluşturduğu potansiyel:

$$V = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (\text{A.4})$$

Elektriksel yük yoğunluğu:

$$\sigma = \frac{q}{S} \quad (\text{A.5})$$

Sonsuz büyüklükte yüklü levhanın oluşturacağı elektrik alan şiddeti:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (\text{A.6})$$

İki paralel levha arasındaki elektriksel potansiyel farkı:

$$\Delta V_p = \frac{\sigma \cdot d}{\epsilon} \text{ veya } \Delta V_p = E \cdot d \quad (\text{A.7})$$

İki paralel silindirselsel yüzey arasındaki potansiyel farkı:

$$\Delta V_s = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon} \ln(b/a) \quad (\text{A.8})$$

Kapasite tanımı:

$$C = \frac{Q}{U} \quad (\text{A.9})$$

Paralel levhalı düzlemsel kondansatörün kapasitesi:

$$C_p = C_o \cdot \epsilon_r = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} \quad (\text{A.10})$$

*S: Elektrot yüzey alanı; d: Elektrot açıklığı*

$$C_p = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r L l}{d} \quad (\text{A.11})$$

$\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$  (F/m); *L: Film boyu; l: Aktif genişlik; d: Elektrot açıklığı (dielektrik kalınlığı)*

Dielektriğin hacmi:

$$M = S \cdot d \quad (\text{A.12})$$

Silindirselsel kondansatörün kapasitesi:

$$C_s = \frac{2\pi\epsilon\ell}{\ln(b/a)} \quad (\text{A.13})$$

*ℓ: Silindir levhaların boyu; a: Mandrel yarıçapı; b: Dış silindir yarıçapı*

Küresel kondansatörün kapasitesi:

$$C_{\text{küresel}} = \frac{Q}{U} = 4\pi\epsilon \frac{r_1 \cdot r_2}{r_2 - r_1} = 4\pi\epsilon_0 \epsilon_r \frac{r_1 \cdot r_2}{r_2 - r_1} \quad (\text{A.14})$$

Paralel bağlı kondansatörlerde kapasite:

$$C_p = C_1 + C_2 + \dots \quad (\text{A.15})$$

Seri bağlı kondansatörlerde kapasite:

$$C_s = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots} \quad (\text{A.16})$$

Elektrik akımı tanımı:

$$I = \frac{dQ}{dt} = C \times \frac{dV}{dt} = C \times 2\pi \cdot f \cdot V \quad (\text{A.17})$$

Kondansatör akımı:

$$I = C \frac{dV}{dt} \quad (\text{A.18})$$

Kondansatör yüklenme (şarj) denklemi:

$$V_c = V_0 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (\text{A.19})$$

Yüklenme (şarj) zaman sabiti:

$$\tau = RC \quad (\text{A.20})$$

Kondansatör boşalma (deşarj) denklemi:

$$V_c = V_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (\text{A.21})$$

Kondansatörde biriken enerji:

$$W = \frac{1}{2} CU^2 \quad (\text{A.22})$$

(A.7), (A.10) ve (A.12) formüllerinden,

$$W = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot M \cdot E^2 \quad (\text{A.23})$$

Paralel levhalı kondansatör plakaları arasındaki elektrostatik güç:

$$P = 4,5 \cdot \varepsilon_r \cdot S \cdot E \quad (\text{A.24})$$

$S$  (m<sup>2</sup>);  $E$  (V/μm)

Paralel levhalı kondansatör plakaları arasında oluşan elektrostatik kuvvet:

$$f = \frac{\sigma^2}{2\varepsilon} \cdot S \text{ veya } f = \frac{\varepsilon \cdot S \cdot U^2}{2d^2} \quad (\text{A.25})$$

Hava aralıklı plakalar arasındaki elektrik alan:

$$E_h = \frac{\sigma}{\varepsilon_h} \quad (\text{A.26})$$

Yağ aralıklı plakalar arasındaki elektrik alan:

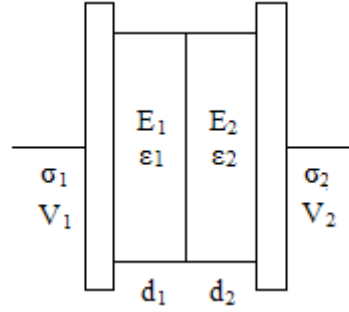
$$E_y = \frac{\sigma}{\epsilon_y} \quad (\text{A.27})$$

diğer bir ifadeyle,

$$E_m = \sqrt{\frac{\epsilon_s^2 e_s}{\epsilon_e e_e}} E_o \quad (\text{A.28})$$

$e_s$  = PP kalınlığı;  $e_e$  = Elektrot kalınlığı;  $\epsilon_s$  : Polipropilenin dielektrik katsayısı;  $\epsilon_e$  = Yağın dielektrik katsayısı;  $E_m$  = Yağ boşluğunda oluşan elektrik alan;  $E_o$  = PP film karşıt elektrik alanı.

Çift dielektrikli plakalar arasındaki elektrik alan  $E_1$  ve  $E_2$ :



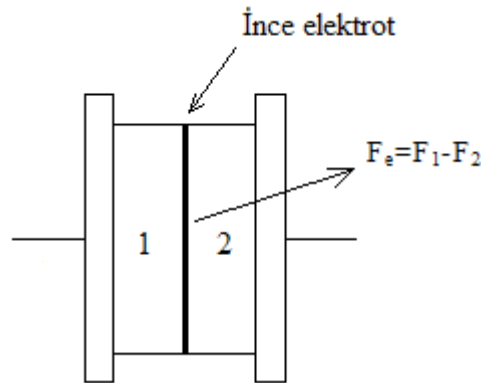
Şekil A.1: Seri Kondansatör

$$E_1 = \frac{D}{\epsilon_1} = \frac{\epsilon_2 \Delta V}{\epsilon_2 d_1 + \epsilon_1 d_2} \quad (\text{A.29})$$

$$E_2 = \frac{D}{\epsilon_2} = \frac{\epsilon_1 \Delta V}{\epsilon_2 d_1 + \epsilon_1 d_2} \quad (\text{A.30})$$

$$D = E_1 \epsilon_1 = E_2 \epsilon_2 \quad (\text{A.31})$$

Çift dielektrikli plakalar arasındaki kuvvetler:

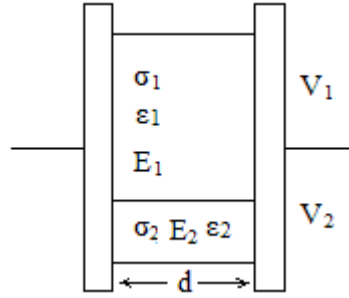


Şekil A.2: İki Tabanlı Sistem

$$F_1 = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2^2 \Delta V^2 S}{2(\varepsilon_2 d_1 + \varepsilon_1 d_2)^2} \quad (\text{A.32})$$

$$F_2 = \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_1^2 \Delta V^2 S}{2(\varepsilon_2 d_1 + \varepsilon_1 d_2)^2} \quad (\text{A.33})$$

Çift dielektrikli (paralel dizilmiş) plakalarda yük yoğunluğu:

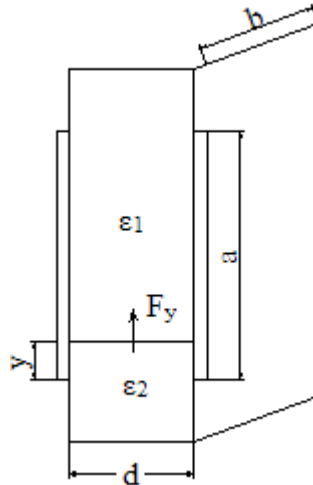


Şekil A.3: Paralel Kondansatör

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon_1 \Delta V}{d} \quad (\text{A.34})$$

$$\sigma_2 = \frac{\varepsilon_2 \Delta V}{d} \quad (\text{A.35})$$

Çift dielektrikli (paralel dizilmiş) plakalarda dielektrikler arasında oluşan kuvvet:



Şekil A.4: Paralel Düzendeki İki Tabakalı Sistem

$$F_y = \frac{\Delta V^2 b (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{2d} \quad (\text{A.36})$$

$$\varepsilon_2 > \varepsilon_1 \text{ ise } F_y \text{ yukarı yöndedir.} \quad (\text{A.36a})$$

$$\varepsilon_2 < \varepsilon_1 \text{ ise } F_y \text{ aşağı yöndedir.} \quad (\text{A.36b})$$

## A.2 ω Domeninde Kondansatör Büyüklükleri

ω Domeninde kondansatör büyüklükleri şunlardır [1, 3, 6, 7, 49-52]:

Bir fazlı kondansatörde akım:

$$I = \omega \cdot C \cdot U_n \quad (\text{A.37})$$

Üç fazlı üçgen bağlı kondansatörde akım:

$$I = \sqrt{3} V_{FF} \cdot \omega \cdot C_{\Delta} \quad (\text{A.38})$$

Üç fazlı üçgen bağlı ( $C_Y = 3 C_{\Delta}$ ) kondansatörde reaktif güç:

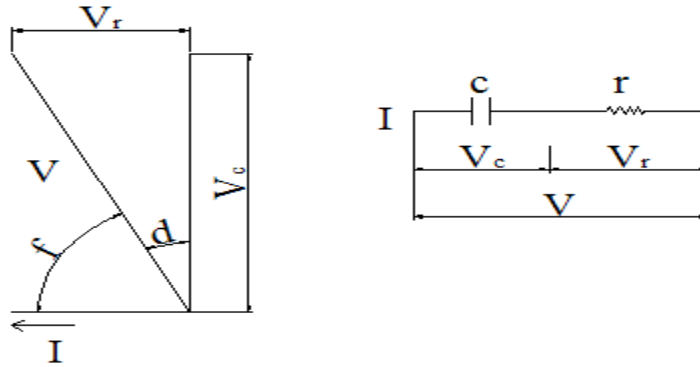
$$Q_C = \sqrt{3} V_{FF} I_F \text{ veya } Q_C = 3 V_{FF}^2 \cdot \omega \cdot C_{\Delta} \quad (\text{A.39})$$

Kondansatör empedansı:

$$(\text{İdeal}) Z_C = \frac{1}{j\omega \cdot C} = -jX_C \quad (\text{A.40})$$

$$(\text{Pratikte}) Z_C = R - jX_C \quad (\text{A.41})$$

Bir kondansatörde kayıp açısı faktörü (KAF):



Şekil A.5: tanδ (Watt/kVAr)

$$\frac{V_r}{V_c} = \frac{I \times r}{I \times 1/\omega C} = r \cdot \omega \cdot C = \tan \delta \quad (\text{A.42})$$

$$\text{tg} \delta = r_s \cdot \omega \cdot C_s \text{ (Seri eşdeğer durumda)} \quad (\text{A.43})$$

$$\text{tg} \delta = \frac{1}{r_p \cdot \omega \cdot C_p} \text{ (Paralel eşdeğer durumda)} \quad (\text{A.44})$$

Çift dielektrikli kondansatörde eşdeğer dielektrik sabiti:

$$\epsilon_{esd} = \frac{d\epsilon_1\epsilon_2}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1}; d = d_1 + d_2 \quad (\text{A.45})$$

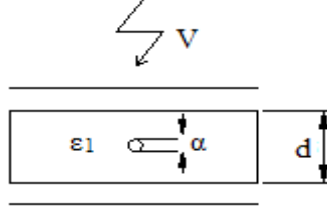


Çift dielektrikli kondansatörde eşdeğer (KAF):

$$tg \delta_{esd} = \frac{(v_1/\varepsilon_1)tg \delta_1 + (v_2/\varepsilon_2)tg \delta_2}{v_1/\varepsilon_1 + v_2/\varepsilon_2} \quad (\text{A.46})$$

$v_1, v_2$ : dielektriklerin hacmi

Hacminde hava kabarcığı bulunan dielektrik malzeme, hava kabarcığı içindeki alan şiddeti:



Şekil A.6: Dielektrik Malzeme

$$E_h = \frac{V}{(d - \alpha) + (\alpha \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2})} \quad (\text{A.47})$$

### A.3 Paralel Sarımlı Kondansatör Formülleri

Paralel sarımlı kondansatör formülleri şunlardır [1, 3, 6, 7, 16, 18, 49-52]:

Kondansatör  $C$  değeri:

$$C_n = 3.183 \frac{Q_n}{U_n^2} (\mu\text{F}) \quad (\text{A.48})$$

$Q_n$ : Anma gücü (kVAr);  $U_n$ : Anma gerilimi;  $C_n$ : Kapasite ( $\mu\text{F}$ )

Aktif Genişlik  $l$  (mm):

$$l = L - 2e_2 - e_1 \quad (\text{A.49})$$

$L$  (mm): Dielektrik genişlik (Film genişliği);  $e_1$  (mm): Kayma miktarı;  $e_2$  (mm): metalsiz kenar

Band Uzunluğu  $H_b$  (m):

$$H_b = \frac{26 \cdot C \cdot d}{l} \quad (\text{A.50})$$

$d$  ( $\mu\text{F}$ ): Dielektrik kalınlık

Sarım ağırlığı  $P$  (gr):

$$P = 0,0018 \times d \times L \times H_b \quad (\text{A.51})$$

Sarım Yüzey Alanı  $S$  (mm<sup>2</sup>):

$$S = 0,15707\phi_0^2 + 2 \times d \times H_b \quad (\text{A.52})$$

$\phi_0$ : Mekik çapı (mm)

Sarım Çapı  $\phi$  (mm):

$$\phi = \sqrt{1,27 \times S} \quad (\text{A.53})$$

Sarım net tur sayısı  $N$  (spin):

$$N = \frac{(\phi - \phi_0)10^3}{4 \times d} \quad (\text{A.54})$$

Bobin aktif hacmi  $V_0$  (cm<sup>3</sup>):

$$V_0 = 0,7854 \times \phi^2 \times (L + e_1) \times 10^{-3} \quad (\text{A.55})$$

Sonlandırma filmi uzunluğu  $h$  (mm):

$$h = d_0 \times N_0 \times 10^{-3} \quad (\text{A.56})$$

$d_0$  (µm): Sonlandırma filmi kalınlığı;  $N_0$  (spin): Sonlandırma filmi spin sayısı

Sarım brüt çapı  $\phi_n$  (mm):

$$\phi_n = \phi + 2h \quad (\text{A.57})$$

Sarım brüt yüksekliği  $H$  (mm):

$$H = H_0 \quad (\text{A.58})$$

$H_0$  (mm): Mekik genişliği

Sarım Brüt Hacmi  $V_n$  (cm<sup>3</sup>):

$$V_n = 0,7854 \times \phi_n^2 \times (L + e_1) \times 10^{-3} \quad (\text{A.59})$$

Kondansatör anma gücü  $Q_n$  (kVAr):

$$C_n (\mu F), U_n (kV), f (Hz)$$

$$Q_n = 6,2832 \times f \times C_n \times U_n^2 \times 10^{-3} \quad (\text{A.60})$$

3 fazlı kondansatörde anma gücü  $Q_{3n}$  (kVAr):

$$Q_{3n} = 18,85 \times f \times C_n \times U_n^2 \times 10^{-3} \quad (\text{A.61})$$

Belli bir anma gücüne karşılık kapasite değeri  $C_n$  ( $\mu\text{F}$ ):

$Q_{3n}$  (kVAr),  $U_n$  (kV),  $f$  (Hz)

$$C_n = \frac{Q_{3n} \times 18.85}{f \times U_n^2} \quad (\text{A.62})$$

$U_e$  'deki çıkış gücü  $Q_{resa}$ :

$$Q_{resa} = Q_n \cdot \left(\frac{U_e}{U_n}\right)^2 \quad (\text{A.63})$$

$U_e$  : İşletme gerilimi

Toplam harmonik değişim THD:

$$\text{THD}\% = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} \quad (\text{A.64})$$

$I_k$  —  $\rightarrow$  Harmoniklerin etkin değerleri

Rezonans frekansı  $f_r$  (Hz):

$$f_r = f_1 \cdot \sqrt{\frac{S_{CC}}{Q}} \quad (\text{A.65})$$

$S_{CC}$  : Sistemin kısa devre gücü;  $Q$ : Kurulu reaktif güç

Kompanzasyon gücü:

$$Q_C = P \cdot (\tan \varphi_0 - \tan \varphi_1) = P \cdot k \quad (\text{A.66})$$

$\varphi$  : Empedansın faz açısı

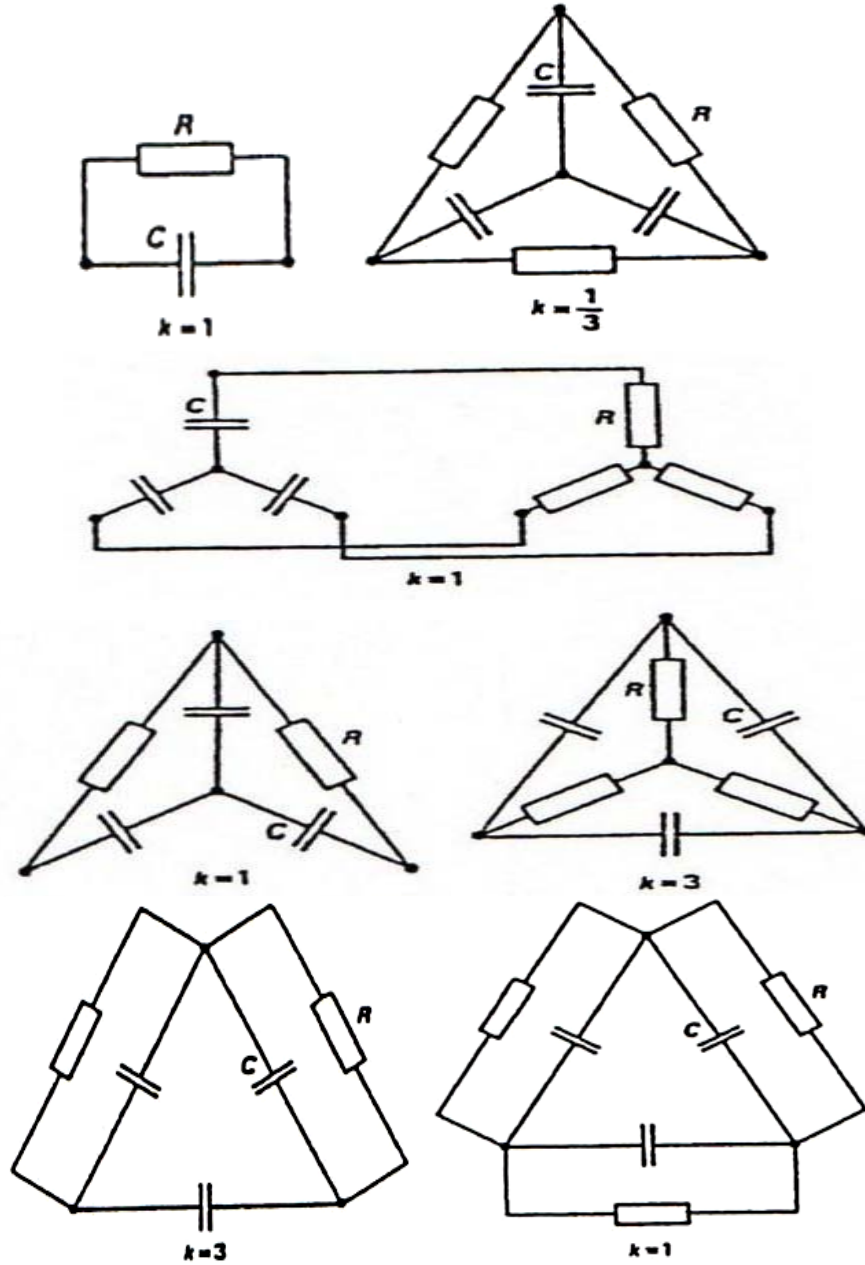
Korona Başlangıç Gerilimi [14]:

$$U_C = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_c}} \cdot \sqrt{d \times t} \cdot E_i$$

$U_C$ : Korona başlangıç gerilimi,  $\varepsilon_i$ : Emprenye yağ dielektrik katsayısı,  $\varepsilon_c$ : Elektrotlar arasındaki bileşik yalıtkanın dielektrik katsayısı,  $d$ : Elektrotlar arasındaki mesafe,  $t$ : Elektrot kalınlığı,  $E_i$ : Emprenye yağ delinme dayanımı

## Ek B EŞDEĞER MODELLER

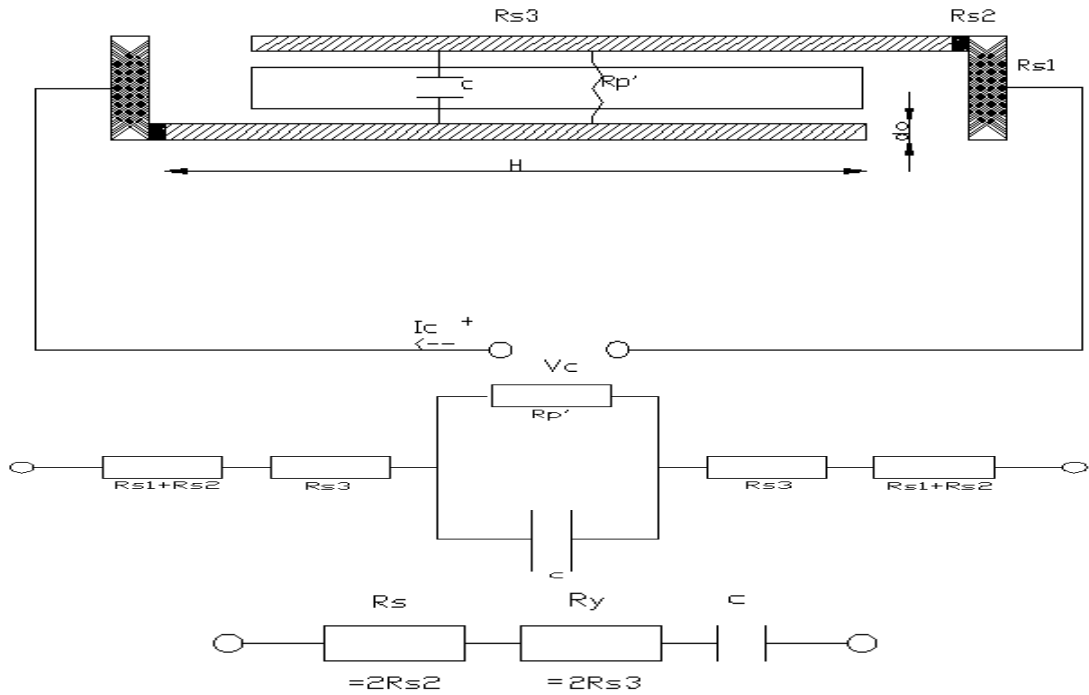
### B.1 Direnç Bağlama Modelleri



Şekil B.1: Kondansatör Birimlerinde Bulunan Dirençlerin Bağlanması Yönteminde Esas Alınan k Değerleri [4]

Direnç bağlama modellerinin oluşturulmasında Şekil B.1'de gösterilen k değerleri esas alınır [4].

## B.2 Elektriksel Eşdeğer Model



Şekil B.2: Elektriksel Eşdeğer Model Bağlantı Biçimleri [7]

$$R_s \cong 2 \times (R_{S1} + R_{S2}) \cong 2 \times R_{S2} \quad (\text{B.1})$$

$$R_y \cong 2 \times R_{S3} \quad (\text{B.2})$$

Elektriksel eşdeğer modelin oluşturulmasında Şekil B.2'de gösterilen bağlantı biçimleri kullanılır [7].

### Açıklamalar

İletken direnci dikkate alınmamıştır.

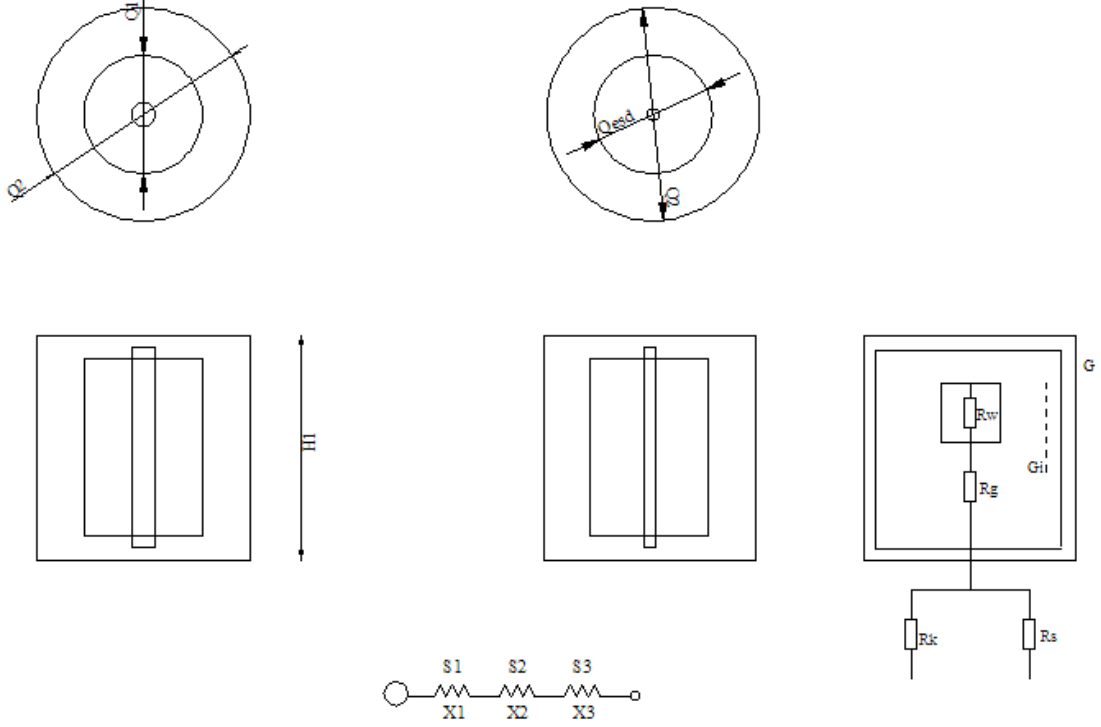
1.  $R_{S1} \ll R_{S2}$  dir.
2.  $R'_p$  çok yüksek değerli olup  $\infty$  kabul edilir.

$$\tan \delta_e = \tan \delta_{RS} + \tan \delta_{RY} \quad (\text{B.3})$$

$$R_F = 1,2 / G \cdot d_0, R_{S3} = H_A / G \cdot d_0 \cdot L_A \quad (\text{B.4})$$

$R_{S1}$  : Mikronize metal direnci ( $\Omega$ );  $R_{S2}$  : Temas direnci ( $\Omega$ );  $R_{S3}$  : Metal yüzey direnci ( $\Omega$ );  $R'_p$  : Dielektrik malzeme hacimsel direnci ( $\Omega$ );  $d_0$  : Metal yüzey kalınlığı ( $\mu\text{m}$ );  $R_F$  : Metal levha birim alan direnci;  $G$ : Kondüktans = iletkenlik (siemens (S)) ,  $G_{Al}$  :  $35 \text{ m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ ,  $G_{zn}$  :  $17 \text{ m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$ ;  $H_A$  : Metal levha genişliği (m);  $L_A$  : Metal levha aktif sarım uzunluğu (mm).

### B.3 Isıl Eşdeğer Devre Modeli

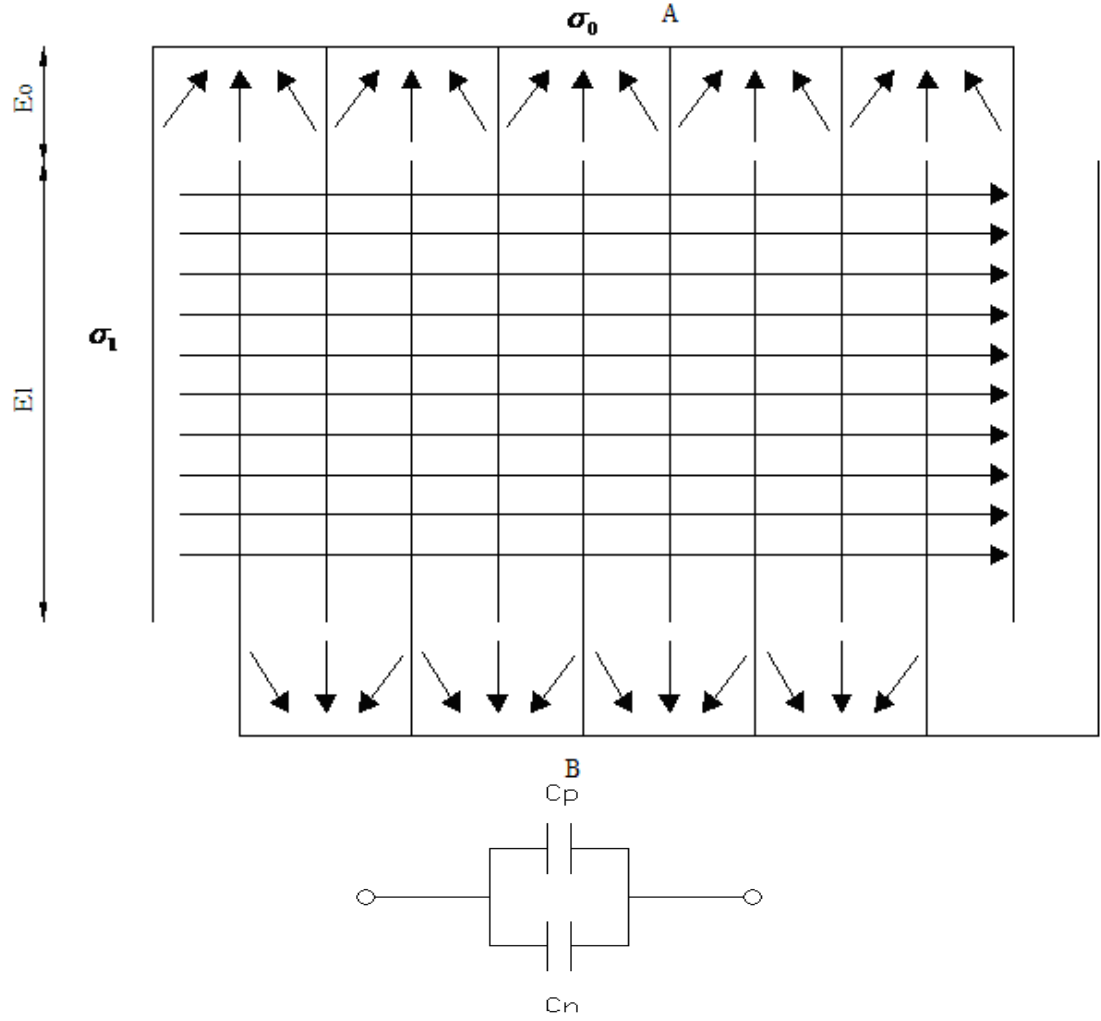


Şekil B.3: Isıl Eşdeğer Modelleri

$R_w$ : Elementin ısı direnci;  $G_i$ : Yalıtımın ısı direnci,  $G$ : Dış yüzey;  $R_g$ : Yağ ve dış yalıtımın ısı direnci;  $R_k$ : Radyasyon yüzeyinin ısı direnci;  $R_s$ : Konveksiyon ısı direnci;  $\Phi_1, H_1$ : ( $C_n/3, Q_n/3$ ) Anma değerindeki kondansatör elementinin iç çapı ve yüksekliği;  $\Phi_2, H_2$ : ( $C_n, Q_n$ ) Anma değerindeki kondansatörün nihai çapı ve yüksekliği;  $\Phi_{esd}$ : ( $C_n/3, Q_n/3$ ) Anma değerindeki kondansatörün en sıcak bölgesi (ısı ağırlık merkezine veya ısı dağılımı açısından tüm kapasitenin yığılı olduğu farz edilen ağırlık merkezine denk düşen çap ve silindir yüzeyi;  $\lambda_i$ : Isı iletim katsayıları;  $S_i$ : Yüzey alanı

Isıl eşdeğer devre modeli Şekil B.3'de gösterilen eşdeğer modeller kullanılarak oluşturulur [7].

#### B.4 Şematik Elektrostatik Alan Modeli



Şekil B.4: Elektrostatik Alan Çizgileri [7]

$$E_0 = \sigma_0 / \epsilon_{pp} \quad (\text{B.5})$$

$$E_1 = \sigma_1 / \epsilon_{pp} \quad (\text{B.6})$$

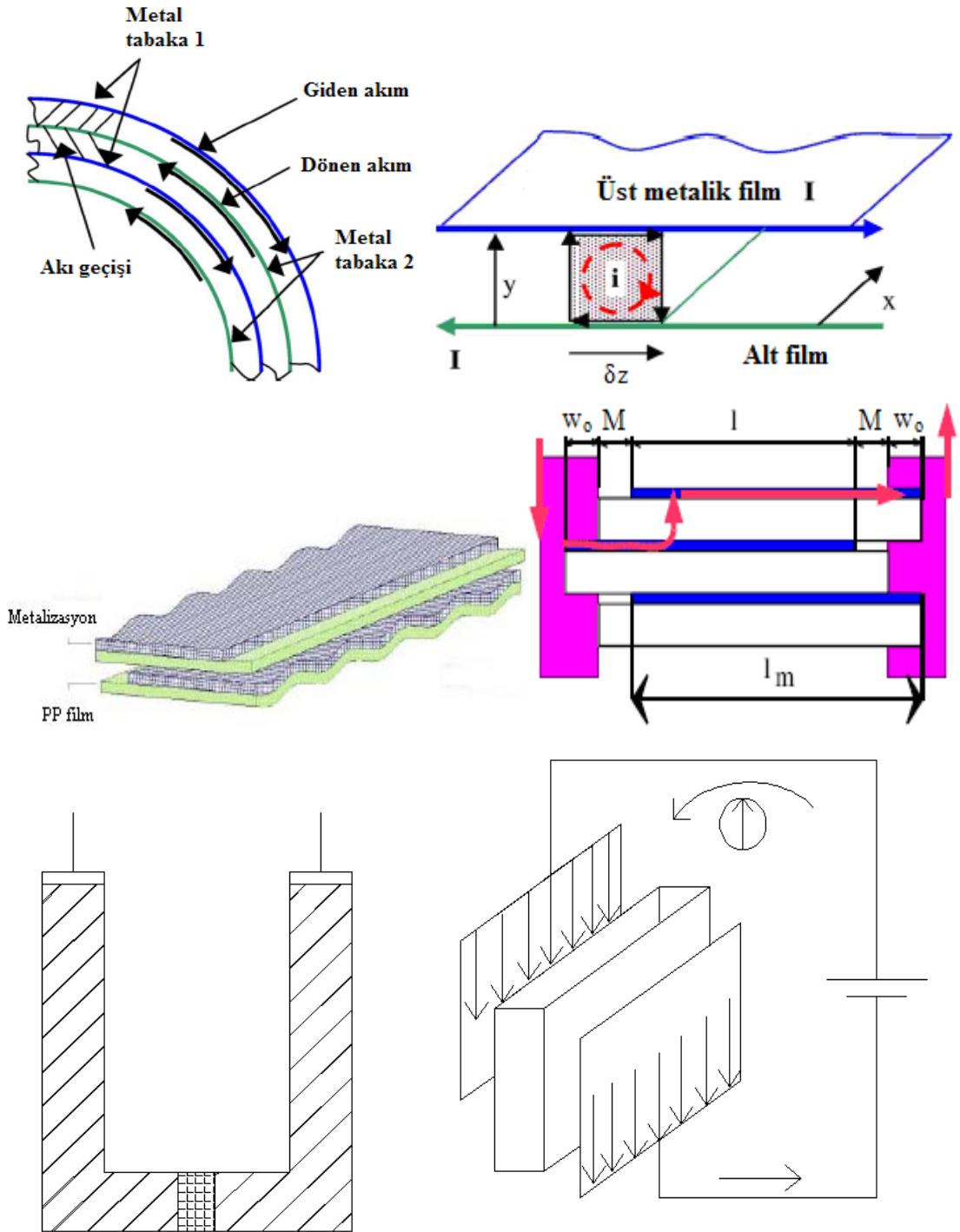
$$\Delta V_{P_0} = \sigma_0 d / \epsilon_{pp} = E_0 d \quad (\text{B.7})$$

$$\Delta V_{P_1} = \sigma_1 d / \epsilon_{pp} = E_0 d \quad (\text{B.8})$$

$\sigma_0$  = Taban elektrotlarındaki yük yoğunluğu;  $\sigma_1$  = Aktif alan tabakalarındaki yük yoğunluğu

Şematik elektrostatik alan modeli için Şekil B.4'de gösterilen elektrostatik alan çizgileri kullanılır [7].

## B.5 Şematik Akım Modeli



Şekil B.5: Kondansatör Bobini İçerisindeki Şematik Akım Yolu

$l_m$ : elektrot genişliği,  $l$ : etkin genişlik,  $w_0$ : kaydırma aralığı,  $M$ : sınır açıklığı

Kondansatör bobini içerisindeki akım yolu, Şekil B.5’de şematik olarak gösterilen modellerdeki gibi yönelmektedir [16, 32, 53].



## B.6 Şematik Aşırı Basınç Sistemi Modeli

$F_i$ : İletken telin kopma mukavemeti (veya alüminyum tüp çentik açma mukavemeti);  $S_0$ : İç basıncın kuvvet tatbik ettiği yüzey;  $F_0, F_1, F_S$ : İç basınçtan doğan kuvvetler;  $F_K$ : İç basıncın eşik değeri. (Çentik açma mukavemeti veya tel kopma mukavemetinin, iç basıncın yol açtığı kuvvete eşit duruma geldiği an);  $F_P$ : İletken telin kopmasına (veya çentiğin açmasına yol açan ve aşırı iç basınçtan kaynaklanan kuvvet)

*İnceleme*: Belli bir  $C_n, Q_n, V_0$  hacmine haiz bir kondansatörde  $F_K$  kuvvetlerinin hesabı ve uygun  $F_i$  kopma mukavemetinin tespiti için; kritik dönemdeki büyüklükler:  $T_K, P_K, F_K, C_K$  dir.

### Termo dinamik süreç

Sabit bir hacimde, iç ısıların artması ile yükselen ve arıza nedeniyle ortaya çıkan ve miknatsı da sürekli artan gazın oluşturduğu basınç değerleri bu süreci oluşturur.

### Önceden bilinen tespit edilen değerler

- Filmin kalınlığı ve genişliği (d, H)
- Kondansatörün kapasitesi ve anma gücü ( $C_n, Q_n$ )
- Alüminyum tüpün et kalınlığı

### Bilinen değerlerden oluşan değerler

- Kondansatör elemanının boyutları ve hacmi ( $Q_n, V_n$ )
- Buna göre kullanılacak alüminyum tüpün boyutları ve iç hacmi ( $Q_a, V_a$ )

### Deneyde tespit edilebilecek değerler

Alüminyum tüpteki çentiğin açma mukavemeti ve açma mesafesi ( $F_K, \Delta y$ )

### İletken telin haiz olacağı özellikler

Uygun akım yoğunluğu verecek kesit ( $J_n$ )

Söz konusu kesitteki telin kopma mukavemeti çentik açma mukavemeti  $F_{t_k} \leq F_1$

Sabit hacimli bir ortamda, arıza nedeniyle zincirleme (kontrol dışına çıkan) elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda, kütlesi de sürekli artmaya başlayan gazın basıncı ve ısısının yükselmesi şeklinde ortaya çıkan süreç, karmaşık termodinamik yasalarına bağlıdır. Basınç-sıcaklık eğrisinin teorik hesabı oldukça karmaşıktır. Buna karşılık,  $F_K \geq F_i$  koşulundan hareketle çentiği açacak basınç değerinin  $P_K \geq \frac{F_i}{S_0}$

olacağı söylenebilir. Yani kritik basınç  $F_i / S_0$  değerine ulaştığında, aşırı basınç mekanizması tetiklenecektir [7, 9, 18, 19].

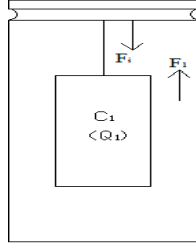
$F_i$  (veya  $F_K \geq F_i$ ) değeri ilgili kondansatör için deneyle tespit edilecek ve bu süreç içinde çentikten önce alüminyum tüpün diğer kısımlarında aşırı bir deformasyon veya delinme oluşmamasıdır. Dolayısıyla çentiğin profili ve et kalınlığı uygun

olmalıdır, aksi durumda aşırı basınç mekanizması tetiklenmeden önce tüpün parçalanması söz konusudur.

Buna ek olarak, çentiğin  $\Delta y$  açma mesafesi, herhangi bir elektriksel ark oluşumuna yol açmayacak kadar olmalıdır.

### NORMAL ÇALIŞMA

İlk durum



$$T_0, P_0, V_0$$

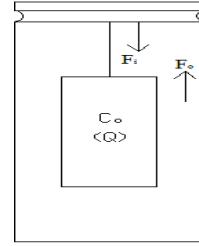
$$F_0 = P_0 S_0$$

$$F_0 \ll F_i$$

Devreye giriş

$$T_0 = T_{ortam}$$

Ara dönem



$$T_1, P_1, V_1$$

$$F_1 = P_1 S_0$$

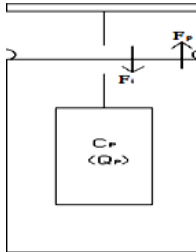
$$F_1 < F_i$$

Ara dönem

$$T_1 > T_{ortam}$$

### ANORMAL ÇALIŞMA

Kararlı durum



$$T_S, P_S, V_0$$

$$F_S = P_S S_0$$

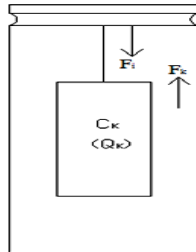
$$F_S \leq F_i$$

Kararlı dönem

$$T_S > T_{ortam}$$

$$\Delta T = T_S - T_{ortam} = sbt$$

Kritik durum



$$T_K, P_K, V_0$$

$$F_K = P_K S_K$$

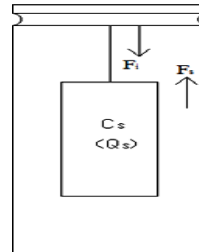
$$F_K = F_i$$

Kritik dönem

$$T_K > T_{ortam}$$

$$\Delta T \uparrow$$

Kopma durumu



$$T_p, P_p, V_p$$

$$F_p = P_p S_0$$

$$F_p \gg F_i$$

Kopma anı

$$T_p > T_{ortam}$$

$$\Delta T \rightarrow \Delta T$$

Şekil B.6: Aşırı Basınç Sistemi

## EK C (k) FAKTÖRÜ CETVELİ

Kondansatör gücünün hesabında k faktörü cetveli kullanılarak sonuca kısa sürede ulaşılabilir [3, 18].

**Tablo C.1: k Faktörü Cetveli**

ARZU EDİLEN COS Ø'ye YUKSELTMEK İÇİN "k" FAKTORU CETVELİ																
	Cosφ2	0.70	0.75	0.80	0.82	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.90	0.92	0.94	0.95	0.96	0.97
	tgφ2	(1.02)	(0.88)	(0.75)	(0.70)	(0.64)	(0.62)	(0.59)	(0.57)	(0.53)	(0.48)	(0.43)	(0.36)	(0.33)	(0.29)	(0.25)
Cosφ1	tgφ1															
0.44	2.29	1.27	1.40	1.53	1.58	1.64	1.66	1.69	1.71	1.75	1.80	1.85	1.92	1.95	1.99	2.03
0.45	1.98	0.96	1.10	1.23	0.28	1.34	1.36	1.39	1.41	1.45	1.50	1.55	1.62	1.65	1.69	1.73
0.50	1.73	0.71	0.85	0.98	1.03	1.09	1.11	1.14	1.16	1.20	1.25	1.30	1.37	1.40	1.44	1.48
0.52	1.64	0.62	0.76	0.89	0.94	1.00	1.02	1.05	1.07	1.11	1.16	1.21	1.28	1.31	1.35	1.39
0.54	1.56	0.54	0.68	0.81	0.86	0.92	0.94	0.97	0.99	1.03	1.08	1.13	1.20	1.23	1.27	1.31
0.56	1.48	0.46	0.60	0.73	0.78	0.84	0.86	0.89	0.91	0.95	1.00	1.05	1.12	1.15	1.19	1.23
0.58	1.41	0.39	0.53	0.66	0.71	0.77	0.79	0.82	0.84	0.88	0.93	0.98	1.05	1.08	1.12	1.16
0.60	1.33	0.33	0.45	0.58	0.63	0.69	0.71	0.74	0.76	0.80	0.85	0.90	0.97	1.00	1.04	1.08
0.62	1.27	0.25	0.39	0.52	0.57	0.63	0.65	0.68	0.70	0.74	0.79	0.84	0.91	0.94	0.98	1.02
0.64	1.20	0.18	0.32	0.45	0.50	0.56	0.58	0.61	0.63	0.67	0.72	0.77	0.84	0.87	0.91	0.95
0.66	1.14	0.12	0.26	0.39	0.44	0.50	0.52	0.55	0.57	0.61	0.66	0.71	0.78	0.81	0.85	0.89
0.68	1.08	0.06	0.20	0.33	0.38	0.44	0.46	0.49	0.51	0.55	0.60	0.65	0.72	0.75	0.79	0.83
0.70	1.02		0.14	0.32	0.32	0.38	0.40	0.43	0.45	0.49	0.54	0.59	0.66	0.69	0.73	0.77
0.72	0.96		0.08	0.27	0.26	0.32	0.34	0.37	0.39	0.43	0.48	0.53	0.60	0.63	0.67	0.71
0.74	0.91		0.03	0.21	0.21	0.27	0.29	0.32	0.34	0.38	0.43	0.48	0.55	0.58	0.62	0.66
0.76	0.86			0.16	0.16	0.22	0.24	0.27	0.29	0.33	0.38	0.43	0.50	0.53	0.57	0.61
0.78	0.80			0.11	0.10	0.16	0.18	0.21	0.23	0.27	0.32	0.37	0.44	0.47	0.51	0.55
0.80	0.75			0.05	0.05	0.11	0.13	0.16	0.18	0.22	0.27	0.32	0.39	0.42	0.46	0.50
0.82	0.70					0.06	0.08	0.11	0.13	0.17	0.22	0.27	0.34	0.37	0.41	0.45
0.84	0.65						0.03	0.06	0.08	0.12	0.17	0.22	0.29	0.32	0.36	0.40
0.86	0.59								0.02	0.06	0.11	0.16	0.23	0.26	0.30	0.34
0.88	0.54										0.06	0.11	0.18	0.21	0.25	0.29
0.90	0.48											0.06	0.12	0.15	0.19	0.23
0.92	0.43												0.07	0.10	0.14	0.18
0.94	0.36													0.03	0.07	0.11

## **EK D TS EN 60831-1 STANDARTINDA BELİRTİLEN DENEYLER**

Türk Standartları Enstitüsü'nün TS EN 60831-1 nolu standardı gereği kendini onaran tip beyan gerilimi 1000 V'a kadar (1000 V dahil) olan alternatif akım sistemleri için şönt güç kondansatörlerinin tesis edilmesi ve işletilmesi için aşağıdaki deneylerin yapılması gerekir [4].

### **D.1 Rutin Deneyler**

Kapasite ölçümü ve çıkış gücü hesabı (Madde 7)

Kondansatörün kayıp açısının ( $\tan\delta$ ) ölçümü (Madde 8)

Bağlantı uçları arasındaki beyan gerilimi (Madde 9.1)

Bağlantı uçları ve kondansatör kabı arasındaki gerilim deneyi (Madde 10.1)

İç boşalma düzeninin deneyi (Madde 11)

Sızdırmazlık deneyi (Madde 12)

### **D.2 Tip Deneyler**

Isıl kararlılık deneyi (Madde 13)

Yükseltelen sıcaklıktaki kondansatörün kayıp açısının tanjantının ( $\tan\delta$ ) ölçümü (Madde 14)

Bağlantı uçları arasındaki gerilim deneyi (Madde 9.2)

Bağlantı uçları ve kondansatör kabı arasındaki gerilim deneyi (Madde 10.2)

Bağlantı uçları ve kondansatör kabı arasındaki yıldırım darbe gerilimi deneyi (Madde 15)

Boşalma deneyi (Madde 16)

Yaşlanma deneyi (Madde 17)

Kendini onarma deneyi (Madde 18)

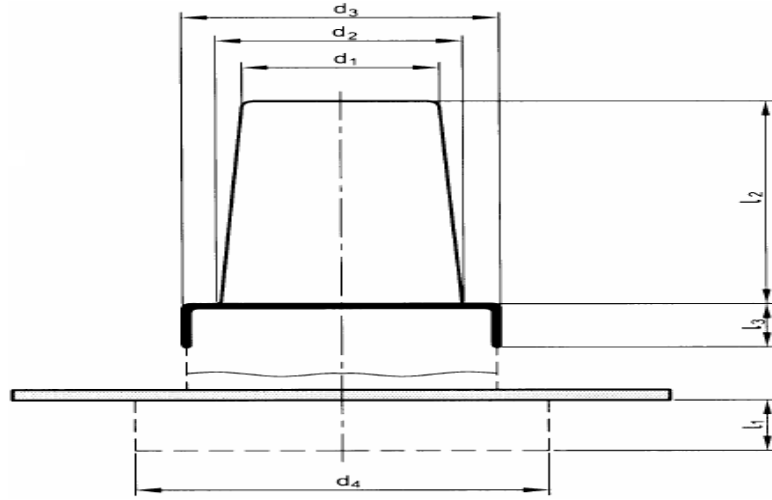
Tahribat deneyi (Madde 19)

## KISIM 2

### EK A TS 50181 STANDARTI TASARIM MODELİ

#### A.1 Dışa Konik Biçimli Tip

Dışa konik biçimli fiş tipi geçit izolatörleri tasarımları için gerekli boyutlar aşağıda verilmiştir [7].

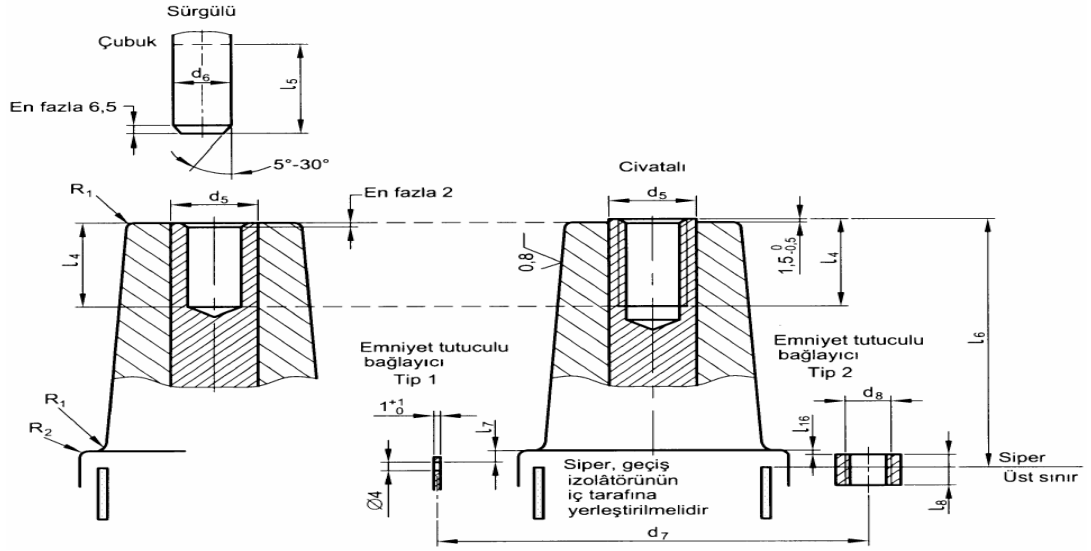


Şekil A.1: Dışa Konik Biçimli Fiş Tipi Geçit İzolatörlerinin Dış Boyutları

Tablo A.1: Dışa Konik Biçimli Fiş Tipi Geçit İzolatörlerinin Boyutları

$U_r$ (kV)	$I_r$ (A)	$d_1$ (mm)	$d_2$ (mm)	$d_3$ (mm)	$d_4$ (mm)	$l_1$ (mm) en fazla	$l_2$ (mm)	$l_3$ (mm) en az	Kontak tipi	Arayüz tipi
12-24	250	$31^{+0,1}_{-0,3}$	32,5	48,5	132	205	$48^0_{-0,2}$	9	Sürgülü	A
36		$46 \pm 0,2$	56	70	132	205	$90 \pm 0,2$	11	Sürgülü	B
12-24-36	400	$46 \pm 0,2$	56	70	137	205	$90 \pm 0,2$	11	Sürgülü	B
12-24-36	630	$46 \pm 0,2$	56	70	137	205	$90 \pm 0,2$	11	Cıvatalı	C
12-24	800/ 1250	$39,9 \pm 0,2$	52,1	76,2	137	205	$81 \pm 0,2$	14,8	Cıvatalı	D
36		$39,9 \pm 0,2$	61,5	76,2	165	240	$103,7 \pm 0,2$	21	Cıvatalı	E

**Not:**  $l_1 \times d_4$  bölümü, fiş tipi geçit izolatörlerin cihaz içindeki kısmını gösterir. Geçit izolatörleri, bir donanımın ayrılmaz bir parçası olduğunda  $l$  ve  $d_4$  değerleri çizelgeden farklı olabilir ve bu malzeme imalatçısı tanımlanmış olmalıdır.



**Şekil A.2:** Dışı Konik Biçimli Fiş Tipi Geçit İzolatörlerinin Arayüz Ayrıntıları

**Tablo A.2:** Dışı Konik Biçimli Fiş Tipi Geçit İzolatörlerinin Arayüz Boyutları

Ur(kV)	Ir(A)	Geçit İzolatörü Konağı						l <sub>5</sub> (mm)	l <sub>6</sub> en fazla (mm)	Yarıçap		Emniyet tutucu Tip 1 veya 2			l <sub>7</sub> (mm) ±2	l <sub>8</sub> en az (mm)	l <sub>16</sub> (mm) ±1	Arayüz tipi
		Tip	Malzeme*	d <sub>5</sub> anma (mm)	d <sub>6</sub> (mm)	Diş	l <sub>4</sub> en az (mm)			r <sub>1</sub> en fazla	r <sub>2</sub> en fazla	Konum d <sub>7</sub> ±0,5	Gerekli numara en az	d <sub>8</sub> Tip2				
12-24	250	Sürgülü	Cu	-	7,9 <sup>+0,02</sup> <sub>-0,05</sub>	-	32	30	54	1	2x 45°	90	2	M6	3,5	8	2	A
36	250	Sürgülü	Cu	-	14 <sup>+0</sup> <sub>-0,04</sub>	-	40	38	97	3	3	102	2	M8	5,5	10	2	B
12-24- 36	400	Sürgülü	Cu	-	14 <sup>+0</sup> <sub>-0,04</sub>	-	40	38	97	3	3	102	2	M8	5,5	10	2	B
12-24- 36	630		Cu	22 en az	-	M16	29	-	97	3	3	** 102	** 2	** M8	-	10	-	C
12-24	800	Cıvatalı	Cu veya Al	32	-	M16	29	-	88	3	3	** 102	** 2	** M8	-	10	-	D
36									111									E
12-24	1250	Cıvatalı	Cu	32	-	M16	29	-	88	3	3	** 123	** 2	** M8	-	10	-	D
36									111									E

**Notlar:**

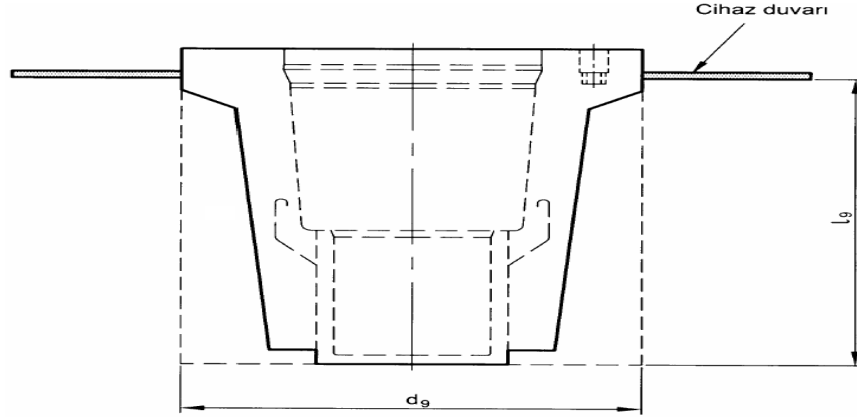
\*Ayrılabilir bağlayıcıların geçit izolatörlerine bağlantısında kablo iletkenleri, kablo başlıkları ve geçit izolatörü iletken malzemelerinin birbirine uymasına dikkat edilmelidir. Farklı metallerin birleştirilmesi durumunda uygun önlemler alınmalıdır.

Geçit izolatörlerinde alüminyum iletkenlerin kullanılması durumunda ve vida dili gerektiğinde, uygun derecede bir alüminyum veya alüminyum alaşımı kullanılmalıdır.

\*\*Emniyet tutucusu isteğe bağlıdır.

## A.2 İe Konik Biçimli Tip

İe konik biçimli fiş tipi geçit izolatörleri tasarımları için gerekli boyutlar aşığıda verilmiştir [7].

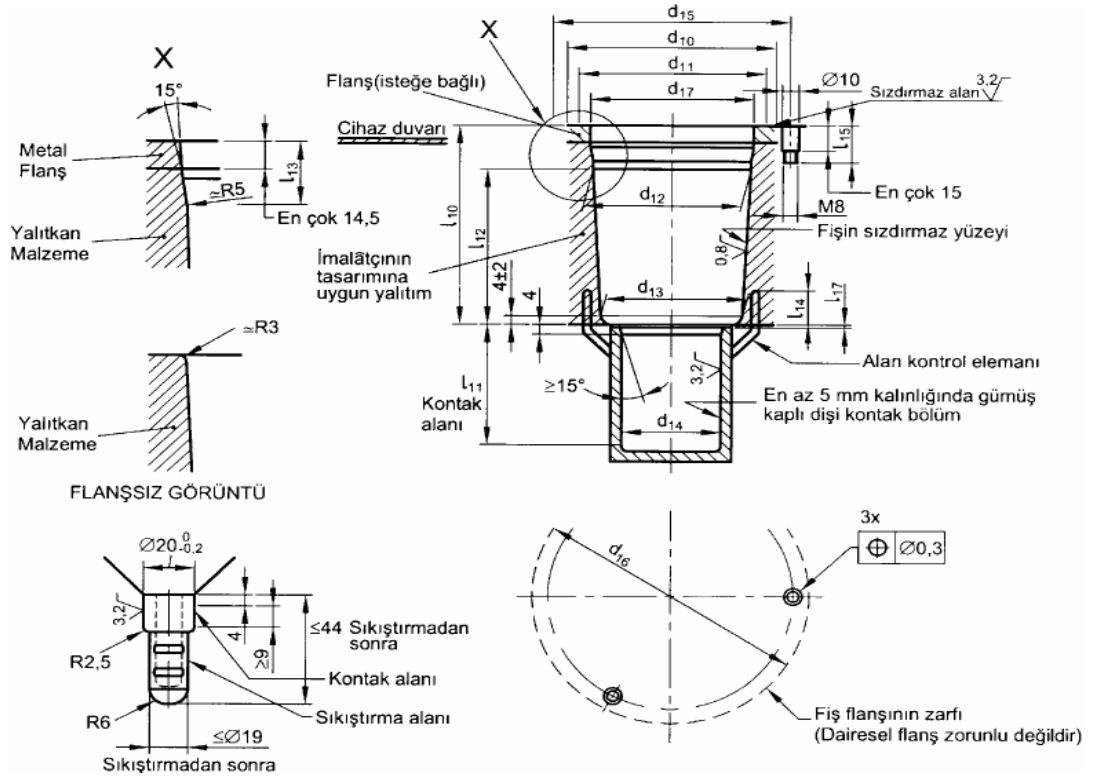


Şekil A.3: İe Konik Biçimli Fiş Tipi Geçit İzolatörlerin Dış Boyutları

Tablo A.3: İe Konik Biçimli Fiş Tipi Geçit İzolatörlerinin Boyutları

$U_r$ (kV)	$I_r$ (A)	$d_9$ en fazla (mm)	$l_9$ en fazla (mm)	Arayüz tipi
12-24-36	250	132	205	0
12-24-36	400-630	137	205	1
12-24-36	800	137	205	2
12-24-36	1250	165	240	3

**Notlar:**  $l_9 \times d_9$  bölümü, fiş tipi geçit izolatörünün cihaz içindeki kısmını gösterir. Geçit izolatörleri, bir donanımın ayrılmaz bir parçası olduğunda  $l_9 \times d_9$  değerleri, çizelgeden farklı olabilir ve bu malzeme imalatçısı tarafından tanımlanmış olmalıdır.



Şekil A.4: İçe Konik Biçimli Fiş Tipi Geçit İzolatörlerinin Arayüz Ayrıntıları

Tablo A.4: İçe Konik Biçimli Fiş Tipi Geçit İzolatörlerinin Arayüz Boyutları

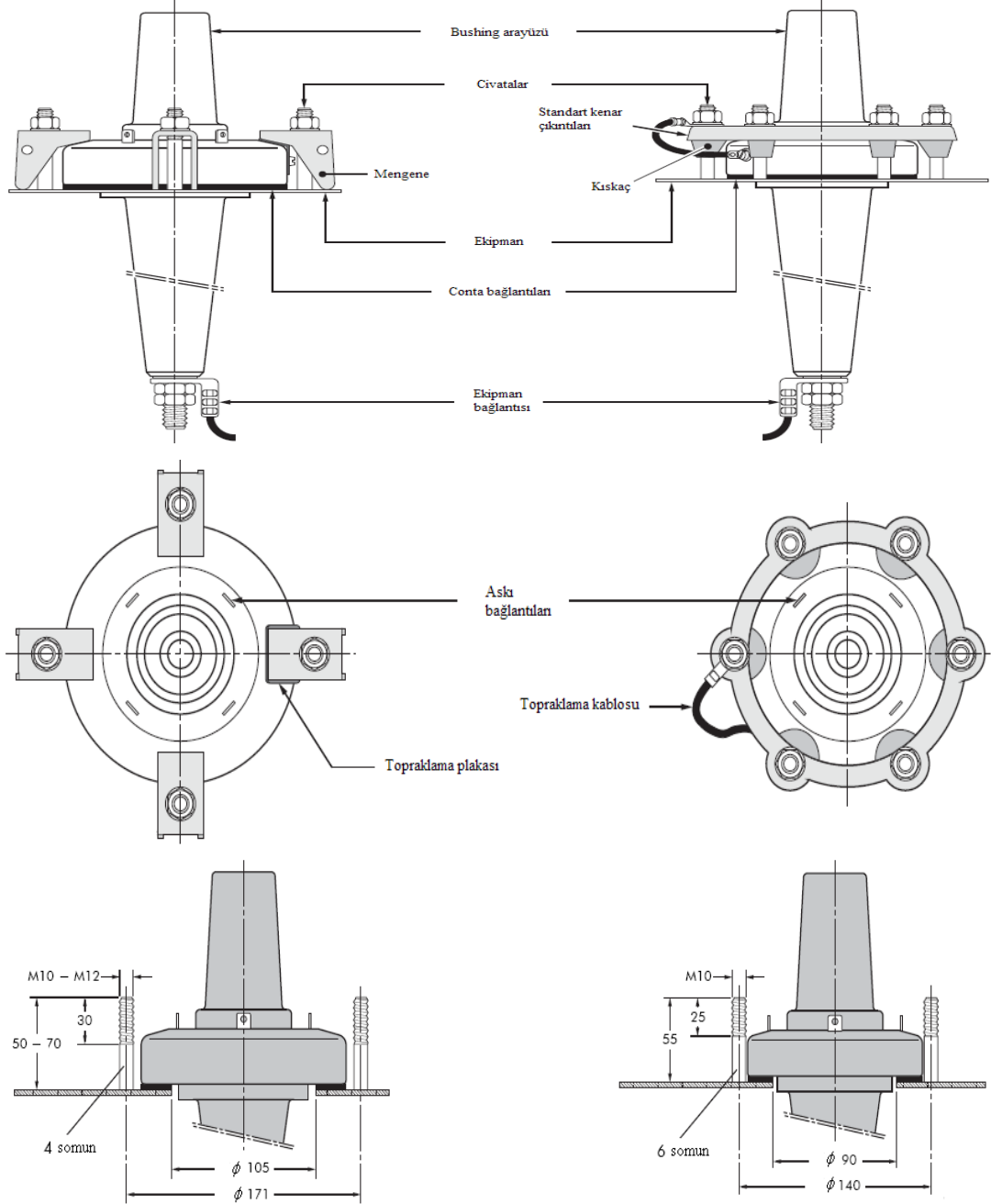
U <sub>r</sub> (kV)	I <sub>r</sub> (A)	d <sub>10</sub> (mm)	d <sub>11</sub> (mm)	d <sub>12</sub> ± 0,4 (mm)	d <sub>13</sub> ± 0,4 (mm)	d <sub>14</sub> +0,1 0 (mm)	d <sub>15</sub> (mm)	d <sub>16</sub> fazla (mm)	d <sub>17</sub> fazla (mm)	l <sub>10</sub> ± 1,3 (mm)	l <sub>11</sub> en az (mm)	l <sub>12</sub> ± 0,2 (mm)	l <sub>13</sub> (mm)	l <sub>14</sub> +2 -1 (mm)	l <sub>15</sub> +5 0 (mm)	l <sub>17</sub> (mm)	Kontakt tipi	Arayüz tipi
12-24-36	250	en az 69	en fazla 62	53,2	47,5	*	88	108	59,5	83	44	59	20 <sub>0</sub> <sup>+1</sup>	14	23	1 <sub>-0,5</sub> <sup>+1</sup>	Sürgülü	0
12-24-36	400 630	en az 79	en fazla 72	59,8	54	36	95	115	63,5	83	46,5	59	20 <sub>0</sub> <sup>+1</sup>	14	23	0	Sürgülü	1
12-24-36	800	en az 86	en fazla 79	68,8	60	39	102	122	69,5	83	46,5	59	20 <sub>0</sub> <sup>+1</sup>	14	23	0	Sürgülü	2
12-24-36	1250	115 <sub>-1</sub> <sup>0</sup>	95 <sub>-1</sub> <sup>0</sup>	87,8	79,7	55	130	150	92,5	110	82	81	24 <sub>0</sub> <sup>+1,5</sup>	19	32	0	Sürgülü	3

Dişi bölüm, ayrılabilir bağlayıcı kontak çubuk ayrıntısının kurallarına uygun olarak tasarlanmalıdır.



## EK B TRANSFORMATÖR MONTAJ YÖNTEMLERİ

Transformatör montajında geçit izolatörleri aşağıda belirtilen yöntemlerle monte edilerek kullanılabilir [22, 30].



Şekil B.1: Transformatör Montaj Modelleri

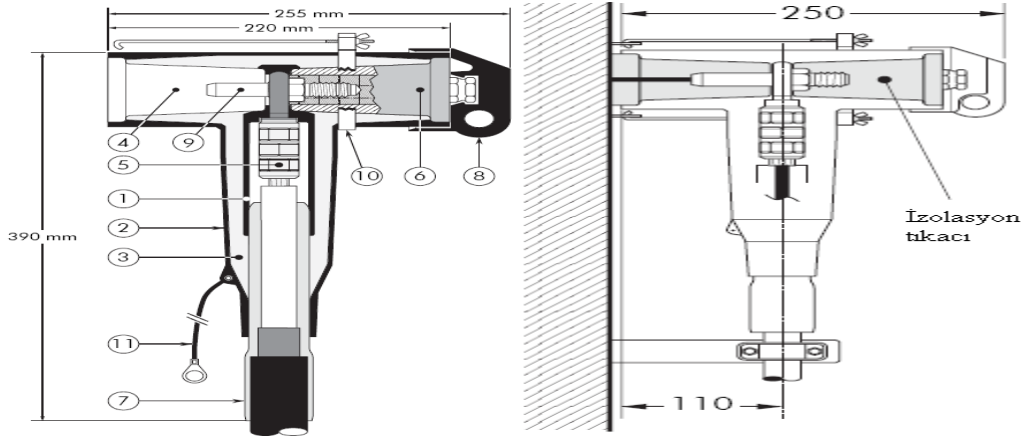
## EK C KABLO BAŞLIKLARI AYRINTILARI

TS 595 EN 60137 Md.3.21’de tanımlandığı üzere kablo konektörü olmaksızın fiş tipi geçit izolatörünün kullanılması ve deneyi mümkün değildir [6].



Şekil C.1: Kablo Başlıkları İçin Örnek Resimler

Şekil C.1’de örnek modelleri gösterilen kablo başlıkları Şekil C.2’de gösterildiği gibi kullanılabilir [22, 30].



Şekil C.2: Kablo Başlıklarının Kullanım Yöntemi

- |                          |                          |
|--------------------------|--------------------------|
| 1. İç EPDM iletken       | 7. Kablo indirici        |
| 2. Dış EPDM iletken      | 8. İletken kauçuk başlık |
| 3. EPDM tabakası         | 9. Mengene bağlantısı    |
| 4. Tip D – 400 A arayüzü | 10. Ara tutucu           |
| 5. İletken bağlantısı    | 11. Topraklama kablosu   |
| 6. Yalıtkan tıkaç        |                          |

## **EK D TEDAŞ ORTA GERİLİM MESNET İZOLATÖRLERİ TEKNİK ŞARTNAMESİNDE BELİRTİLEN DENEYLER**

Epoksi reçine izolatörlere yapılması gereken deneyler şunlardır [8, 51, 52]:

### **D.1 Epoksi Reçine İzolatörlere Uygulanan Tip Deneyleri**

- Boyutların doğrulanması (TS 4237/IEC 660, Madde 27)
- Kuruda, yıldırım darbe gerilimine dayanma deneyi (TS 4237/IEC 660, Madde 15)
- Kuruda, şebeke frekanslı gerilime dayanma deneyi (TS 4237/IEC 660, Madde 16)
- Kısmi boşalma sönüm gerilimi deneyi (TS 4237/IEC 660, Madde 17)
- Yıldırım darbesinde delinme deneyi (TS 4237/IEC 660, Madde 18)
- Mekanik dayanıklılık deneyi (TS 4237/IEC 660, Madde 19)
- Normal ortam sıcaklığında yük altında eğilme deneyi (TS 4237/IEC 660, Madde 20)
- Mekanik eğilme dayanımının sıcaklığa bağımlılığı deneyi (TS 4237/IEC 660, Madde 21)
- Su emme deneyi (TS 4237/IEC 660, Madde 22)
- Yaşlanma ve rutubet deneyi (TS 4237/IEC 660 Madde 23)
- Tutuşma deneyi (TS 4237/IEC 660, Madde 24)
- Sıcaklık çevrimi deneyi (TS 4237/IEC 660, Madde 25)
- Dielektrik kayıp faktörü ( $\tan \delta$ ) veya güç faktörünün ( $\cos \phi$ ) ölçülmesi

### **D.2 Epoksi Reçine İzolatörlere Uygulanan Numune Deneyleri**

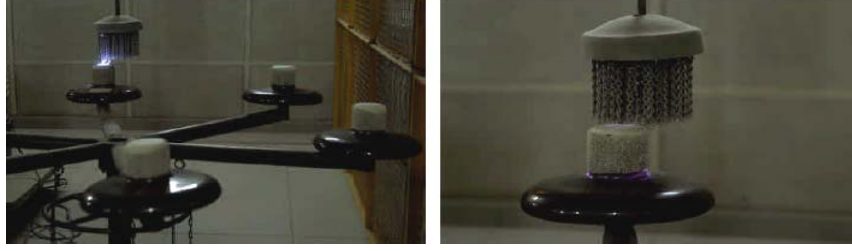
- Boyutların doğrulanması (TS 4237/IEC 660-Madde 27)
- Kısmi boşalma sönüm gerilimi deneyi (TS 4237/IEC 660, Madde 17)
- Normal ortam sıcaklığında yük altında eğilme deneyi (TS 4237/IEC 660, Madde 20)
- Normal sıcaklıkta mekanik dayanıklılık deneyi (TS 4237/IEC 660, Madde 19)

### **D.3 Epoksi Reçine İzolatörlere Uygulanan Rutin Deneyler**

- Gözle muayene (TS 4237/IEC 660, Madde 30)
- Elektriksel rutin deney (TS 4237/IEC 660, Madde 31)

#### D.4 Yüksek Gerilim Laboratuvarı Rutin Deney Örnekleri

Bir yüksek gerilim laboratuvarında gerçekleştirilmiş rutin deney örnekleri aşağıda gösterilmiştir [53].



Şekil D.1: Yüksek Frekanslı Gerilim Deneyi



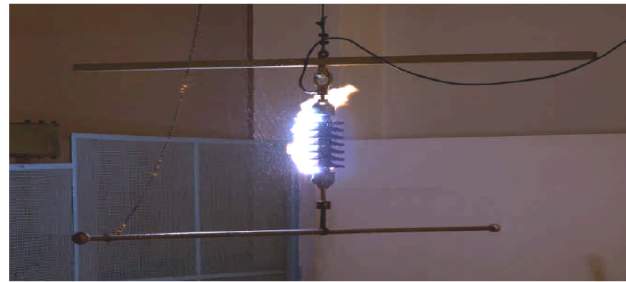
Şekil D.2: Mekanik Çekme Deneyi



Şekil D.3: Mekanik Eğme Deneyi



Şekil D.4: Endüstriyel Frekanslı Yüksek Gerilim Deneyi



Şekil D.5: Yaşta Endüstriyel Frekanslı Gerilim Deneyi

## **EK E TS 595 EN 60137 STANDARTINDA BELİRTİLEN DENEYLER**

Türk Standartları Enstitüsü'nün TS 595 EN 60137 numaralı standardı gereği 1 kV'un üzerindeki alternatif gerilimler için dökme veya kalıplanmış reçine yalıtımlı yalıtkan geçit izolatörlerine standardın onuncu maddesinde açıklanan ve yapılması gereken deneyler şunlardır [6]:

### **E.1 Tip Deneyleri**

Kuruda ve yaşta güç frekanslı gerilim dayanım deneyi (Madde 8.1)

Kuruda yıldırım darbe gerilimi dayanım deneyi (Madde 8.2)

Sıcaklık artışı deneyi (Madde 8.5)

Isıl kısa süreli akım dayanımının doğrulanması (Madde 8.6)

Konsol yük dayanım deneyi (Madde 8.7)

Boyutların doğrulanması (Madde 8.11)

### **E.2 Rutin Deneyler**

Kuruda güç frekanslı gerilim dayanım deneyi (Madde 9.3)

Kısmi boşalma miktarının ölçülmesi (Madde 9.4)

Uygulanabilirse bağlantı ucu yalıtım deneyleri (Madde 9.5)

Gözle muayene ve boyut kontrolü (Madde 9.10)

## ÖZGEÇMİŞ

Özgür Karahan, 1982 yılında Ceyhan'da doğdu. Orta öğretimini 1998 yılında Adana Özel Çukurova Bilfen Lisesi'nde tamamladı. 2004 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi'nde Elektrik Mühendisliği diplomasını aldı. Lisans eğitiminden sonra kısa bir süre topraklama tesislerinde Test Kontrol Mühendisi olarak çalıştı. 2005 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölümünde Yüksek Lisans eğitime başladı ve yine aynı tarihlerde Apple IMC'de Teknik Servis Mühendisi olarak çalışmaya başladı burada bir buçuk yıl süresince çalıştıktan sonra 2007 yılı başlarında Ede Grup'da Üretim Mühendisi olarak çalışmaya başladı; buradan ayrıldıktan sonra ise, yine özel bir şirkette Ar-Ge Mühendisi olarak profesyonel iş yaşamını sürdürdü.