KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNDE KULLANILAN KATI VE SIVI YALITIM MALZEMELERİNİN ÖZELLİKLERİ VE ALTERNATİF GERİLİMDE YALITIM TASARIMI

HASAN ALİ YILDIZ

KOCAELİ 2014

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ.ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNDE KULLANILAN KATI VE SIVI YALITIM MALZEMELERİNİN ÖZELLİKLERİ VE ALTERNATİF GERİLİMDE YALITIM TASARIMI

HASAN ALİ YILDIZ

Yrd.Doç.Dr. Hasbi İSMAİLOĞLU
Danışman, Kocaeli Üniv. .....

Prof.Dr. Semra F. ÖZTÜRK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv. .....

Prof.Dr. İrfan GÜNEY
Jüri Üyesi, Acıbadem Üniv. .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 07.07.2014

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

2010 yılında ENPAY A.Ş. bünyesinde yüksek gerilim tasarım mühendisi olarak güç transformatörleri içindeki bazı özel yalıtım parçalarının tasarımını yaparak transformatör sektörüne adımımı attım. Şu an ALSTOM Grid A.Ş. firmasında transformatör tasarım mühendisi olarak görev yapmaktayım. Bu tez kapsamında güç transformatörlerinin yalıtım tasarımı ve katı-sıvı yalıtım malzemelerinin özellikleri hakkında, bu konuların daha iyi anlaşılabilmesi için bir çalışma yapmak istedim.

Bana böyle bir çalışma yapmam için mesleki ve kişisel olarak destek veren herkese teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz - 2014 Hasan Ali YILDIZ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vii
SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR viii
ÖZET ix
ABSTRACT x
GİRİŞ 1
1. SIVI YALITKANLAR 4
1.1. Sıvı Yalıtkanlarda Delinmeye İlişkin Teoriler 5
1.1.1. Elektronik delinme teorisi 6
1.1.2. Zayıf zincir (Weak-link) teorisi 6
1.1.3. Gaz kabarcığı (Bubble) teorisi 9
1.1.4. Kanal (Streamer) teorisi 10
1.2. Yalıtım Dayanımını Etkileyen Faktörler 12
1.2.1. Nemin etkisi 12
1.2.2. Yabancı parçacıkların etkisi 15
1.2.3. Gazların etkisi 17
1.2.4. Hacim etkisi (Volume effect) 19
1.3. Delinme Geriliminin İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi 21
1.3.1. Gauss dağılımı yöntemi 21
1.3.2. Weibull dağılımı yöntemi 23
2. GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNDE KULLANILAN KATI-SIVI YALITIM MALZEMELERİ 25
2.1. Katı Yalıtkanlar 25
2.1.1. Pressboard 27
2.1.2. Özel uygulamalar için kâğıtlar 28
2.1.3. Lamine presboard ve kontraplaklar 30
2.2. Sıvı Yalıtkanlar 31
2.2.1. Mineral yağ 32
2.2.2. Silikon yağ 32
2.2.3. Esterler 32
3. YALITIM TASARIMINA AİT TEMEL TANIMLAR 34
3.1. Transformatör Deneyleri 35
3.2. Tasarım Yalıtım Düzeyi (TYD) 36
3.3. Açıklık Kavramı 38
3.4. Zorlanmaya Maruz Kalan Yağ Hacmi Kriteri ile Tasarım 40
3.5. Birikimli Zorlanma (Kümülatif Stres) Hesabı 41
3.6. Katı Yalıtım Malzemesinin Transformatör İçerisindeki Fonksiyonu 44
4. YALITIM TASARIMI VE UYGULAMALARI 49
4.1. İki Sargı Arasında Yalıtım ve Uygulama 49
4.2. İç Yalıtım 58

4.3. Sargı Sonlarında Yalıtım 63
4.4. Sargı Çıkışlarında Yalıtım 72
5. BENZETİM ÇALIŞMASI 79
5.1. Model 80
5.2. Bölgesel Değerlendirme 83
6. SONUÇLAR 87
KAYNAKLAR 90
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 93
ÖZGEÇMİŞ 94

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Selüloz fiberlerinin elektrot yüzeyindeki zayıf noktalarda toplanarak zayıf zincir (weak-link) oluşturması 8
Şekil 1.2. Yüksek gerilim altında selüloz fiberlerinin köprü oluşturması 8
Şekil 1.3. Elektrot yüzeyindeki mikro-bozukluklarda gaz kabarcıklarının oluşumu 9
Şekil 1.4. Mineral yağ içerisinde (a) yaklaşık düzgün alanda ve (b) düzgün olmayan alanda oluşan kanal yapıları 12
Şekil 1.5. Mineral yağ, sentetik ester ve doğal esterin su tutma kabiliyetleri 13
Şekil 1.6. Mineral yağın su içeriğine bağlı olarak yalıtım dayanımının değişimi 14
Şekil 1.7. Farklı elektrot açıklıklarında suyun yalıtım dayanımına etkileri 15
Şekil 1.8. Elektrik alan uygulanması ile bir su damlacığının şeklinde meydana gelen değişim 15
Şekil 1.9. Farklı ebatlarda metal parçacıkların mineral yağın yalıtım dayanımına etkileri 16
Şekil 1.10. Doğru gerilim altında iki elektrot arasında köprü oluşumu 17
Şekil 1.11. Alternatif gerilim altında gaz kabarcığının deformasyonu 18
Şekil 1.12. Farklı basınç değerlerinde delinme olayı 19
Şekil 1.13. Farklı elektrot açıklık değerlerinde mineral yağdaki delinme geriliminin değişimi 20
Şekil 1.14. Farklı elektrot yüzey alanı değerlerinde mineral yağdaki delinme geriliminin değişimi 20
Şekil 1.15. Minaral yağın sabit elektrot açıklığında delinme gerilimlerinin dağılımı 21
Şekil 1.16. Minaral yağın sabit elektrot açıklıklarında delinme gerilimlerinin dağılımı 23
Şekil 2.1. Selülozun kimyasal yapısı 26
Şekil 2.2. Pressboard üretim şeması 27
Şekil 2.3. Stres halkaları 28
Şekil 2.4. Sargı katları arasında EEK. 30
Şekil 2.5. Lamine presbord ile üretilen bir baskı halkası 30
Şekil 3.1. Tasarımın yalıtım düzeyi faktörleri 38
Şekil 3.2. Katı yalıtım malzemesine etkiyen alan çizgisinin dik ve yatay bileşenleri 39
Şekil 3.3. Krepaj dayanım eğrisi, (a) yağ kanalı ve (b) katı/sıvı arayüzeyindeki dayanım 40
Şekil 3.4. Birikimli zorlanma hesaplamasının diagram ile gösterimi 42
Şekil 3.5. (a) Katı/sıvı arayüzeylerindeki (a,b,c,d) mevcut zorlanmalar, (b) Mevcut zorlanma değerlerinin (a,b,c,d) kümülatif eğrilere dönüştürülmesi 43

Şekil 3.6. Bariyer sistemi ve YG sargısının üst bölgesindeki zorlanmalar 45
Şekil 3.7. Düzgün olmayan alanda bariyerli sistem (örneğin sargı çıkış düzeneği) 46
Şekil 3.8. Düzgün alanda bariyerli sistem ile toplam hacminin düşürülmesi (örneğin sargılar arasındaki ana yalıtım) 47
Şekil 4.1. Yağ kanallarının kısmi deşarja başlama değerleri 51
Şekil 4.2. YG ve AG sargıları arasındaki yağ kanalının bölünmesi 52
Şekil 4.3. Yalıtım düzeni seçenek-1 53
Şekil 4.4. Yalıtım düzeni seçenek-2 54
Şekil 4.5. Önerilen yalıtım düzeni 56
Şekil 4.6. İki sargı arası yalıtım 57
Şekil 4.7. Kritik yol boyunca alan değişimi 58
Şekil 4.8. Sargı yalıtkanın işletme geriliminde kalınlığa bağlı dayanım eğrisi 59
Şekil 4.9. Sargı yalıtkanının darbe gerilimi altında kalınlığa bağlı dayanım eğrisi 60
Şekil 4.10. İki disk arasındaki yalıtkanın işletme gerilimi altında kalınlığa bağlı dayanımı 61
Şekil 4.11. İki disk arasındaki yalıtkanın darbe gerilimi altında kalınlığa bağlı dayanımı 61
Şekil 4.12. Dış köşe koruyucu yerleşimi 62
Şekil 4.13. İç köşe koruyucu yerleşimi 62
Şekil 4.14. Tipik bir sargı sonu yalıtım örneği 64
Şekil 4.15. Sargı için yapılmış analiz eğrisi (A-C) 65
Şekil 4.16. S.E.Y ile analiz edilmiş bir yalıtım sistemi. 66
Şekil 4.17. 4. Diskteki lokal maksimum stres 66
Şekil 4.18. Sargı sonu ile halka açılı arasındaki alan (A-B) 67
Şekil 4.19. A-B noktaları arasındaki stres değişimi 67
Şekil 4.20. Sargı sonu için yapılmış bir analiz (Test gerilimi:230 kV, marj: %40) 68
Şekil 4.21. Krepaj zorlanması için yapılan örnek analiz 69
Şekil 4.22. Krepaj zorlanması için yapılan örnek analizde A-B arası alan değişimi 70
Şekil 4.23. Krepaj zorlanması için yapılan örnek analiz (kümülatif eğri ve dayanım eğrisi) (Test gerilimi:230 kV, marj: 67%) 70
Şekil 4.24. Ekranlanmış sonlandırma halkası çizimi 71
Şekil 4.25. Sabit 2-3 mm radyusa sahip sistem (RS:Regülasyon sargısı) 71
Şekil 4.26. Sabit 2-3 mm radyusa sahip sistem 72
Şekil 4.27. 400 kV altı transformatörlerde sargı çıkışı taslak çizimi 73
Şekil 4.28. 400 kV'luk ortadan girişli transformatörlerde sargı çıkış düzeneği taslak çizimi 75
Şekil 4.29. Bushing ekranı bölgesinde (A bölgesi) yapılan analiz 76
Şekil 4.30. Dirsek bölgesinde (C bölgesi) yapılan analiz 77
Şekil 4.31. 500 kV seviyesinde sargı çıkış düzeneği resmi 78
Şekil 5.1. Ağ modeli 81
Şekil 5.2. Eşpotansiyel çizgileri 82
Şekil 5.3. Genel model için elektrik alan dağılımı 82

Şekil 5.4. Birinci bölgedeki alan dağılımı 83
Şekil 5.5. Birinci bölgedeki kritik yol boyunca alan değişimi ve dayanım eğrileri..... 83
Şekil 5.6. İkinci bölgedeki alan dağılımı..... 84
Şekil 5.7. İkinci bölgedeki kritik yol boyunca alan değişimi ve dayanım eğrileri..... 84
Şekil 5.8. Üçüncü bölgedeki alan dağılımı..... 85
Şekil 5.9. Üçüncü bölgedeki kritik yol boyunca alan değişimi ve dayanım eğrileri..... 85
Şekil 5.10. Dördüncü bölgedeki alan dağılımı 86
Şekil 5.11. Dördüncü bölgedeki kritik yol boyunca alan değişimi ve dayanım eğrileri..... 86

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Örnek popülasyona ait ortalama değer, standart sapma, basıklık ve eğirilik değerleri 22
Tablo 2.1. Yalıtkan sıvıların temel özellikleri 33
Tablo 3.1. Bir dakikalık AC eşdeğer seviyesine dönüştürme faktörleri 37
Tablo 3.2. Karşılaştırma için yıldırım darbe gerilimi / AC test gerilimi oranları 38
Tablo 3.3. Örnek bir yol boyunca değişen gerilimler 42
Tablo 3.4. Verilen örnek yol için birikimli zorlanma hesabı 43

SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR

ε	: Dielektrik sabiti
υ	: Hız, (m/s)
ή	: Viskosite, (cP)
σ	: Yüzey gerilmesi, (N)
d	: Mesafe, (mm)
E	: Elektrik alan, (kV/mm)
F	: Kuvvet, (N)
r	: Çap, (mm)
U	: Potansiyel, (V)

Kısaltmalar

AG	: Alçak Gerilim
EEK	: Epoksi Emdirilmiş Kağıt
ESH	: Ekranlanmış Sonlandırma Halkası
KP	: Kontraplak
LB	: Lamine Pressboard (Lamine Presbord)
PSP	: Pressboard (Presbord)
RS	: Regülasyon Sargısı
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
SRYK	: Sentetik Reçine ile Yapıştırılmış Kağıt
TYS	: Tasarımın Yalıtım Seviyesi
YG	: Yüksek Gerilim

GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNDE KULLANILAN KATI VE SIVI YALITIM MALZEMELERİNİN ÖZELLİKLERİ VE ALTERNATİF GERİLİMDE YALITIM TASARIMI

ÖZET

Günümüzde iletim sistemlerindeki gerilim seviyesinin artması transformatörlerin de gerilim seviyelerinin giderek artmasına ve yalıtım maliyetinin transformatör maliyetinde önemli yer tutmasına neden olmaktadır. Güç transformatörlerinde genellikle yağ ve selüloz bazlı katı yalıtım malzemesi ve bu malzemelerin birbirleri ile etkileşimine dayalı bir yalıtım sistemi kullanılmaktadır. Bu sistemde delinmenin gerçekleştiği zayıf nokta genellikle yağdır. Günümüzde hala yağdaki delinme işleminin tüm aşamalarını açıklayabilen bir teori bulunmamasına karşın çeşitli yaklaşımlarla bu durum açıklanmaya çalışılmaktadır.

Tez kapsamında ilk kısımda alternatif gerilim etkisinde sıvı yalıtım malzemesinin delinme olayının açıklanabilmesi için literatürde oluşturulmuş teoriler irdelenmiş ve sıvı yalıtım malzemesinin yalıtım dayanımına etkiyen etmenler açıklanmıştır. Güç transformatörlerinin yalıtım tasarımı kullanılan katı ve sıvı malzemelerin etkileşimine bağlı olduğundan ikinci kısımda güç transformatörlerinde kullanılan katı ve sıvı yalıtım malzemelerinin özellikleri irdelenmiştir. Üçüncü kısımda yalıtım tasarımında karşılaşılabilecek bazı temel tanımlar/kavramlar açıklanmıştır. Dördüncü kısımda, transformatör içerisindeki bölgelerde yalıtım tasarımı ile ilgili temel bilgiler açıklanmış ve örnekler verilmiştir. Beşinci kısımda ise örnek bir transformatör için benzetim çalışmaları yapılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Güç Transformatörü, Katı Yalıtkanlar, Sıvı Yalıtkanlar, Yalıtım Tasarımı.

FEATURES OF SOLID AND LIQUID INSULATION MATERIALS WHICH ARE USING AT POWER TRANSFORMER AND AC INSULATION DESIGN

ABSTRACT

With the steady increase in transmission system voltages, the voltage ratings of power transformers have also increased and the cost of insulation content became a significant portion of the transformer cost. The system based on the combination of a solid and a liquid insulation and interaction between them is the most frequently used insulating system in power transformers. Oil is the weakest point of the system where the breakdown usually starts. Althought there are some approachs which try to explain oil breakdown process there is still no comprehensive theory on this matter.

This master thesis covers the different oil breakdown theories under AC field in the first chapter. Also the impacts such as moisture, impurity etc. on breakdown strength of insulation material are discussed. In the second chapter, since the design of the power transformers depends heavily on the interaction between solid and liquid insulation materials, features of solid and liquid insulation materials are explained briefly. In third chapter, some special descriptions about the insulation design terminology are clarified. In forth chapter, insulation design method and practise carry out with the explanations for the different transformer regions. In last chapter, simulation belong to one of Generator Step Up transformer is carried out and results are evaluated.

Key Words: Power Transformer, Solid Insulations, Liquid Insulations, Insulation Design.

GİRİŞ

Yalıtım tasarımı transformatör tasarımının en önemli aşamalarından biridir. Özellikle yüksek gerilim transformatörlerinin tasarımında, yalıtım tasarımı transformatörler için hayati önem taşır. Transformatör içindeki çeşitli yalıtım hataları yüksek maliyetli ve ciddi transformatör arızalarına neden olabilmektedir. Bu arızalar tüm sistemi de etkileyebilmektedir. Bu nedenle modern transformatörlerde güvenilir bir yalıtım sisteminin oluşturulması önemlidir.

İletim sistemlerindeki gerilim seviyesinin giderek artması transformatörlerinde gerilim seviyelerinin giderek artmasına ve yalıtım maliyetinin transformatör maliyetinde önemli yer tutmasına neden olmaktadır. Yalıtım mesafeleri, kullanılacak yalıtım yağı miktarını etkilediği gibi bakır ve sac miktarını önemli ölçüde etkiler. Örneğin, yüksek gerilim ve alçak gerilim sargıları arasında presbord ve yalıtım yağından oluşan yalıtım düzeneğinde aradaki mesafelerde oluşabilecek bir artış sargı çapının artmasına ve buna bağlı olarak kullanılan bakır, yalıtım yağı, sac ve çelik miktarının artmasına neden olur. Transformatörün güç ve gerilim seviyesi arttıkça bu değişimin maliyete etkisi daha fazla artacaktır. Buna ek olarak transformatörlerin güç (MVA) değerleri arttıkça ağırlık ve boyutlarda taşıma kısıtlarının aşılması söz konusu olabilmektedir. Bu bağlamda, optimize edilmiş bir yalıtım tasarımı yalıtım malzemelerinin, bakır ve sac miktarının minimize edilmesinde önemli rol oynadığı gibi boyut kısıtlarının aşılmamasında da etkili olacaktır. Bahsedilen nedenler ve uluslararası pazardaki rekabetin giderek artması yalıtım tasarımının öneminin giderek artmasına neden olmaktadır. Optimize bir yalıtım tasarımı ile transformatör içindeki yalıtım malzemelerinin ve dolaylı olarak aktif kısmın miktarlarının azaltılması sağlanabilmektedir.

Yalıtım sisteminin yeterliliğinin değerlendirilebilmesi için güç transformatörleri içinde kullanılan katı ve sıvı yalıtım sistemine ait delinme süreçlerinin nasıl gerçekleştiğinin iyi bilinmesi önemlidir. Her ne kadar gerilim dağılımı ve elektrik alan istenen kesinlikte hesaplanıp, malzeme özellikleri çok iyi bilinse de katı ve

sıvı malzemelerdeki delinme süreçleri yeterince açık değildir. Bu konu ile ilgili literatürde henüz tam bir sonuca varılmamış olsa da, yapılmış çalışmalara ait test verilerine dayanarak bazı sonuçlara ulaşılabilinmektedir. Bu sonuçlar ve tamamıyla üreticilerin tecrübelerine dayalı veriler toplanarak pratikte pek çok durumda sorunsuz çalışan tasarım yöntemleri oluşturulmuştur. Yapılan tasarımlar, transformatöre bir dizi yalıtım deneyleri uygulanarak değerlendirilebilir.

Mükemmel bir yalıtım performansı sağlamak için malzeme üzerindeki elektriksel zorlanmanın azaltılması çoğu zaman yeterli bir sonuç vermez. Çünkü transformatörler içindeki yalıtımın dayanımı pek çok parametreye bağlı olarak değişir. Bu parametreleri, uygulanan gerilimin dalga şekli ve süresi, elektrotun şekli ve yüzey yapısı, yalıtım malzemesinin kısmi boşalma başlama karakteristiği, yalıtım ortamı, elektriksel zorlanmaya maruz kalan yağ hacmi v.b. gibi sıralayabiliriz. Düzgün olmayan elektrik alan dağılımının en aza indirilmesi, katı yalıtım malzemesinin yüzeyinde oluşabilecek krepaj yollarından kaçınılması, emprenye işleminin düzgün bir şekilde yapılabilmesi, boşluklardan kaçınılması, sargılarda oluşabilecek yüksek kısmi zorlanmaların giderilmesi uzun ömürlü bir yalıtım tasarımı için bazı önemli adımlardır. Bununla birlikte üretim süreçlerinin de sıkı bir denetim içinde olması gerekir. Transformatörün üretim ortamının ve işçiliğinin olabildiğince temiz olması, ileride kısımlarda açıklanacağı gibi, yalıtım malzemesinin ömrünün kısalmasında etkin rol oynayan nem miktarının olabildiğince düşük olması yalıtım sisteminin ömrünü arttırmaktadır.

Yalıtım tasarımının en az hata ile yapılabilmesi için transformatör içindeki elektrot biçimlerinin değişik test gerilimlerindeki elektriksel zorlanma seviyelerinin doğru olarak hesaplanması gerekir. Günümüzde bu hesaplar bilgisayar ortamında uygun bir sayısal yöntemle (genellikle SEY) yapılmaktadır. Bu şekilde yüksek kesinlikte belirlenen düzeyler, deneyler ile elde edilmiş dayanım eğrileri ile karşılaştırılarak uygunluğu irdelenir.

Çalışmanın ilk bölümünde yalıtım sıvılarındaki farklı delinme teorileri incelenmiştir. Delinme teorilerine ek olarak, sıvı yalıtım malzemesinin yalıtım dayanımını etkileyen faktörler açıklanmıştır. İkinci bölümde, güç transformatörlerinde kullanılan katı ve sıvı yalıtım malzemelerinin çeşitleri ve özellikleri incelenmiştir. Üçüncü

bölümde, güç transformatörlerinin yalıtım tasarımı ile ilgili bazı tanımlar irdelenmiştir. Dördüncü kısımda, güç transformatörleri içerisindeki farklı bölgeler için tasarım metotları örneklerle birlikte verilmiştir. Son olarak, örnek bir güç transformatörü için uygun analiz programı kullanılarak dielektrik analizler yapılmıştır.

1. SIVI YALITKANLAR

Sıvı yalıtkanlardan yağ yüzyılı aşkın süredir güç transformatörleri, yüksek gerilim kabloları, kondansatörler, devre kesiciler v.b. gibi pek çok yüksek gerilim aygıtında yalıtım amacı ile kullanılmaktadır. Yağ, yalıtılması istenen ortama, hiçbir boşluk kalmayacak şekilde dolarak etkin bir yalıtım ortamı sağlar ve oluşabilecek arkların sönümlendirir. Yağ, ayrıca konveksiyon yolu ile bulunduğu ortamda ısı iletimini gerçekleştirir. Transformatör içinde kullanılan yağ, ısı iletimi kapasitesi bakımından hava ve nitrojenden on kat daha etkindir. Yüzyılı aşkın bir süredir petrol kökenli yağlar yalıtım sıvısı olarak kullanılmaktadır. Petrol kökenli yağlar dışında, yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren uygulamalarda ise silikon yağ gibi sentetik yağlar kullanılmaktadır.

Geçtiğimiz yüzyılda güç transformatörlerinde genellikle petrol kökenli mineral yağlar yalıtım sıvısı olarak kullanılmıştır. Ancak herhangi bir arıza durumunda çevreye saçılan mineral yağların olumsuz etkileri ve petrol rezervlerinin bir gün son bulacağının bilinmesi ile başlayan alternatif yalıtım sıvısı arayışı, günümüzde ester sıvılarını gitgide daha da önemli hale getirmektedir.

Yalıtım sıvıları, kabaca mineral, organik ve sentetik olmak üzere başlıca üç grupta ele alınabilir;

- Mineral kökenli yağlar 1900 yılların başında petrol rafinelerinin gelişmesi ile kullanılmaya başlanmıştır. Petrol kökenli yağlar farklı özelliklere sahip moleküllerden oluşan neredeyse renksiz sıvılardır. Petrol kökenli yağlar kendi içlerinde kabaca parafinik (C_nH_{2n+2}), naftenik (C_nH_{2n}) ve aromatik (C_nH_n) olarak ayırmaktadırlar.
- Farklı özelliklere sahip sentetik yalıtım sıvılarının gelişimi ise 1960'lı yıllarda petrokimya endüstrisinin gelişimi ile başlamıştır. Uygulamaya özel olarak bir sentetik yalıtım sıvısı geliştirmek mümkün olabilmektedir.

- Organik yalıtım sıvılarının kullanımı ise 20. yüzyılın sonlarında başlanmıştır. Günümüzde, özellikle çevre duyarlılığının da giderek artması ile bitkisel yağlar ya da esterler gibi organik yalıtım sıvılarının kullanımı giderek artmaktadır.

Sıvı yalıtkanlar, hidrokarbon moleküllerinin birleşiminden oluştuklarından çok zayıf bir şekilde kutuplanırlar. Yalıtım amacı için kullanılacakları zaman sıvıların nem ve diğer yabancı maddelerden arındırılmış olmaları gerekir. Yalıtım yağının dayanımını etkileyen en önemli faktör, içinde asılı şekilde bulunabilecek su zerrecikleridir. Yalıtım yağı içinde bulunabilecek %0,01 oranında su yağın dielektrik dayanımının su içermeyen yağa oranla %20 düşmesine neden olmaktadır. Sıvı yalıtkanların en kötü yanları yabancı maddelerin etkileriyle saflıklarının çok kolay bir şekilde bozulabilmesidir. İşletme durumunda transformatör içinde sürekli olarak 95°C civarında yüksek bir ısıyla yavaş ve sürekli bir yaşlanmaya maruz kalır. Sıvı yalıtkanların rengi yaşlanmanında etkisi ile oluşan asit ve reçine (yada çamurumsu yapı) nedeni ile zamanla koyulaşır. Bazı asitler katı yalıtım malzemesinin ve transformatör içindeki metal parçaların korozyona uğramasına neden olur. Çamur şeklindeki oluşumlar çekirdek, sargılar veya yağ kanalları arasında yağın sirkülâsyonunu düşürür ve bu nedenle yağın ısı iletim kapasitesi önemli ölçüde düşer [1-11].

Aşağıda sıvı yalıtım malzemesinin delinme işleminin açıklanabilmesi için literatürde oluşturulmuş teoriler özetlenmiştir ve sıvı yalıtım malzemesinin yalıtım dayanımına etkiyen etmenler açıklanmıştır. Yalıtım tasarımında kullanılan tasarım eğrilerinin oluşturulmasında kullanılan literatürde kabul görmüş istatistiksel yöntemlere de değinilecektir.

1.1. Sıvı Yalıtkanlarda Delinmeye İlişkin Teoriler

Gaz yalıtkanlardan farklı olarak, sıvı yalıtkanlarda (mineral yağda dahil) delinme olayının tüm aşamalarını açıklayabilen bir teori bulunmamaktadır. Bu konu günümüzde hala araştırılan bir konudur. Bunun nedeni üretim, aktarım işletme sırasında yalıtım sıvısı içine karışan kirletici maddeler nedeniyle sıvı yalıtkanların hiçbir zaman tam olarak saf olamamasıdır. Bu maddeler yalıtım sıvısının delinmesinde önemli rol oynar. Buna bağlı olarak bir yalıtım sıvısının yalıtım dayanımının, malzemenin moleküler yapısından çok malzeme içindeki yabancı

maddelere bağlı olduğu kabul edilir. Literatürde verilen çalışmaların bir kısmı sıvı yalıtkanlardaki delinme olayını fiziki açıdan açıklamaya çalışırken, diğer bir kısmı da çeşitli faktörler altında sıvı yalıtkanın dayanımındaki değişimi açıklamaya çalışmaktadır. Sıvı yalıtkanların delinme teorisi ile ilgili temel olarak dört teori bulunmaktadır; Elektronik delinme teorisi, Zayıf zincir (weak-link) teorisi, Gaz kabarcığı (bubble) teorisi ve Kanal (streamer) teorisi [1-4].

1.1.1. Elektronik delinme teorisi

Bu teoriye göre katottan elektronlar yayılır ve yayılan elektronlar anoda doğru giderken sıvı moleküllerin atomları ile çarpışırlar. Bu çarpışmada aktarılan enerji elektronların kendi atomlarından ayrılmasına yeterli ise açığa çıkan bu elektronlar da ilk elektronla birlikte anoda doğru sürüklenir. Böylece sıvı içerisinde, gazlardaki delinme olayındaki gibi tam delinme ile sonuçlanan bir elektron çığı oluşabileceği varsayılmaktadır. Bu teori, 1940 larda sıvı yalıtkanlardaki delinme olayının açıklanmasında kullanılan en popüler teoriydi. Felici'nin sıvı yalıtkanlarda çarpışma ile iyonizasyonun MV/cm mertebelerinde bir elektrik alan şiddetine kadar oluşamayacağını göstermesi ile geçerliliğini yitirdi. Bunun nedeni sıvı yalıtkanlardaki elektron çarpışmaları çoğunlukla elastik değildir ve elektronlar çarpışma yoluyla iyonizasyon için yeterli momentumu kazanamazlar. Diğer nedeni ise sıvı moleküllerine negatif iyon şeklinde bağlı olan elektron sayısının önemli derecede olmasıdır [1-4].

1.1.2. Zayıf zincir (Weak-link) teorisi

1940 ve 1980 yılları arasında araştırmacılar, sıvı yalıtkanlardaki delinme olayının tek bir hipoteze ya da faktöre bağlı olarak tanımlanamayacağı konusunda birleştiler. Zayıf zincir teorisi, sıvının yalıtım dayanımının, aslında sıvının doğasında olmayan pek çok faktöre bağlı olarak değiştiğini savunur. Yalıtım dayanımı, sıvı içerisinde asılı olarak duran selüloz parçaçıklarına, kimyasal eklentilere, çözünmüş durumdaki su ve gazlara, elektrot geometrisine, uygulanan gerilimin şekline v.s. bağlı olarak değişebilir. Bu teoriye göre delinmenin başlayacağı bir zincir oluşturabilecek zayıf noktalar elektrot yüzeyinde ya da yalıtkan sıvı içerisinde bulunablir [1-11].

Ticari olarak kullanılan sıvı yalıtkanların içinde selüloz fiberleri ya da katı yabancı maddeler bulunabilir. Bu katı maddelerin dielektrik katsayıları (ε_1) her zaman sıvı yalıtım malzemesinin dielektrik katsayısından (ε_2) farklıdır. Bu partiküllerin çapı r olan küre şeklinde olduğunu düşünelim. Bu partiküller E, elektrik alanı altında kutuplanırlar ve Denklem (1.1) gibi bir F kuvvetine maruz kalırlar.

$$F = r^3 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2} \tag{1.1}$$

Bu kuvvet $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ ise alanın daha yüksek olduğu bölgeye doğrudur. Eğer ise $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$ (ε_1 hava kabarcığı durumunda) kuvvet, alanın daha düşük olduğu bölgeye doğrudur. Bu kuvvet, katı malzemenin dielektrik katsayısının (ε_1) artması ile büyümektedir. Eğer $\varepsilon_1 \rightarrow \infty$ olduğu varsayılırsa kuvvet ifadesi;

$$F = r^3 \frac{1 - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}}{1 + \frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} E \frac{dE}{dx} \tag{1.2}$$

$$F = r^3 E \frac{dE}{dx} \tag{1.3}$$

biçimine dönüşür.

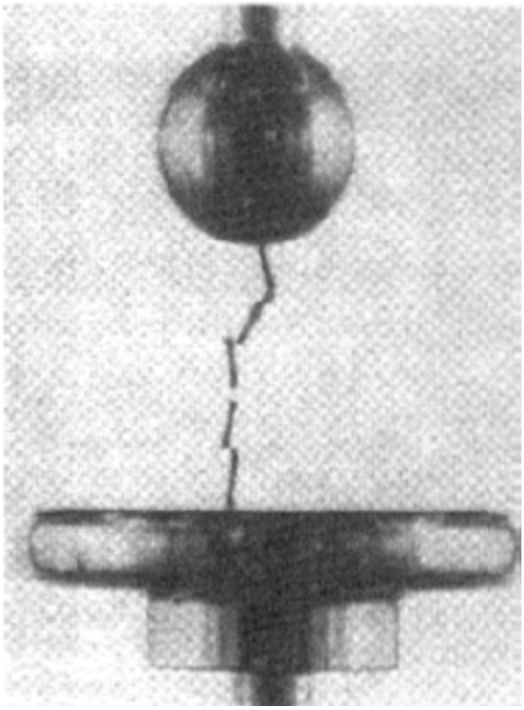
Düzgün olmayan bir alan içerisinde oluşan bu kuvvet, parçacıkları alanın yüksek olduğu bölgeye doğru çeker. Transformatör içerisinde de katı partiküllerin dielektrik katsayılarının yağdan daha büyük olmasından dolayı uygulanan elektrik alanın etkisi ile parçacıklar kutuplanırlar ve elektrik alanın yoğun olduğu noktaya doğru hareket ederler. Denklemden de görülebileceği üzere düzgün olmayan alan değerinin ve parçacıkların büyüklüklerinin artmasıyla oluşacak kuvvetin değeri de artmaktadır [1-4,8].

Bu parçacıklar, viskositesi ή olan yağ içinde υ hızı ile hareket ederken engelleyici bir kuvvet ile karşılaşır. Herhangi bir parçacık elektrot yüzeyine ulaştığında, burada sanki elektrodun bir uzantısıymış gibi davranır ve daha fazla parçacığı kendine doğru çeker (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Selüloz fiberlerinin elektrot yüzeyindeki zayıf noktalarda toplanarak zayıf zincir (weak-link) oluşturması [1]

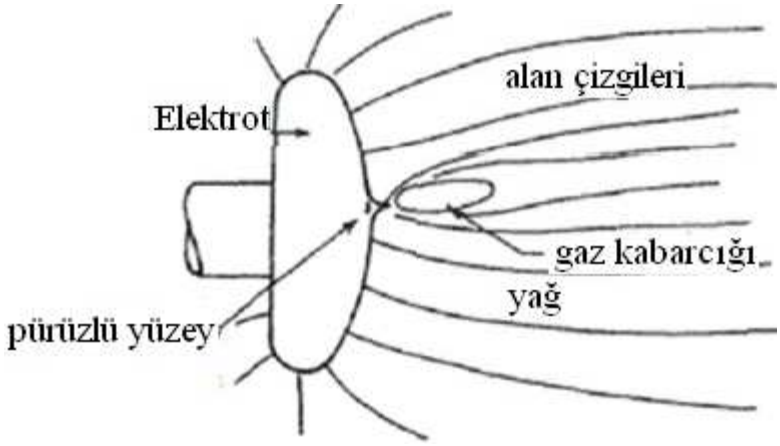
Düzgün bir alan içerisinde ise (örneğin, küresel elektrot sistemleri) alanın yüksek olduğu bölge düzgün alanlı bölgenin içidir. Burada $dE/dx \rightarrow 0$ olacağından katı parçacıkların üzerine etkiyen kuvvet sıfır olur. Bu nedenle parçacıklar, alanın düzgün olduğu bölgeye doğru sürüklenir. Parçacıkların dielektrik katsayılarının ortamın dielektrik katsayısından daha büyük olmasından dolayı parçacıkların yoğunlaştığı bölgede bir akı yoğunluğu oluşur. Diğer parçacıklar da oluşan bu bölgeye doğru hareket eder ve zamanla sıralanarak köprü gibi bir yapı oluşur (Şekil 1.2). Delinme, oluşan köprü şeklindeki yapıda elektrik alan değerinin kritik bir değeri aşmasından sonra gerçekleşir [1-4].



Şekil 1.2. Yüksek gerilim altında selüloz fiberlerinin köprü oluşturması [1]

1.1.3. Gaz kabarcığı (Bubble) teorisi

Düzgün olmayan bir alanda elektrot yüzeyinde ortaya çıkan sızıntı akımları yüzeye eşit olarak dağılmaz. Uygulanan elektrik alan nedeni ile Şekil 1.3'deki gibi elektrik alan çizgilerinin yoğunlaştığı pürüzlü ve bozuk yüzeylere doğru yoğunlaşır. Mikron mertebesindeki küçük pürüzlü noktalarda oluşan ve aynı büyüklükteki sıvı hacminde ısı kaybına neden olan yüksek yoğunluklu sızıntı akımı, sıvının kaynama noktasının üzerine çıkan hızlı bir sıcaklık artışına neden olur. Bu ani sıcaklık yükselmesi 1 μs gibi çok kısa bir sürede gerçekleştiğinden ısı yayımı ve iletkenliğin etkisi sınırlıdır. Böylece, mikron mertebesindeki pürüzlü yüzeyde Şekil 1.3'de görülen hava kabarcığı oluşur [1-4].



Şekil 1.3. Elektrot yüzeyindeki mikro-bozukluklarda gaz kabarcıklarının oluşumu [1]

Gaz kabarcıklarının oluşumunu açıklamak için üç farklı yaklaşım daha önerilebilir [1-4]:

- Elektrot üzerinde mikron mertebesindeki pürüzlü yüzeyde sıkışmış olan gazın açığa çıkması,
- Yüksek yoğunluğa sahip elektrik alana maruz kalmasından dolayı oluşan elektrostriktif basınç farkı nedeniyle sıvının gerilmesi ve bu gerilme sonrası oluşan boşluklar,
- Bazı sıvı moleküllerinde elektrokimyasal ayrışma sonrasında açığa çıkan gaz nedeni ile gaz kabarcığı oluşması.

Yukarıda belirtilen her açıklamada gaz kabarcıklarının oluşum nedenlerinin temel olarak, elektrot yüzeyinde ya da elektrot açıklığı boyunca elektrik alanın yoğunlaşmasını sağlayan mikron mertebesindeki bozukluklar olduğu görülmektedir.

Dielektrik katsayısı ε_2 olan hava kabarcığı içerisindeki elektrik alan şiddeti için;

$$E_b=\frac{3E_0}{\varepsilon_2+2} \tag{1.4}$$

denklemi verilebilir [1-3].

Bu denklemde, E_0 hava kabarcığı içermeyen yalıtım sıvısı içerisindeki alan şiddetini göstermektedir. E_b iyonizasyon değerine ulaştığında sıvı yalıtkan ayrışır ve delinme gerçekleşir. Kao, hava kabarcıklarının delinme dayanımı için;

$$E_b=\frac{1}{\varepsilon_1-\varepsilon_2}\left\{\frac{2\pi\sigma\,(2\varepsilon_1-\varepsilon_2)}{r}\left[\frac{\pi}{4}\sqrt{\left(\frac{V_b}{2rE_0}-1\right)}\right]\right\}^{1/2} \tag{1.5}$$

biçiminde bir eşitlik önermiştir [11].

Bu denklemde σ sıvının yüzey gerilmesi (surface tension), ε_1 yalıtım sıvısının dielektrik katsayısı, ε_2 hava kabarcığının dielektrik katsayısı, r hava kabarcığının başlangıçtaki çapı (hava kabarcığı başlangıçta küreseldir sonrasında alan etkisiyle uzar) ve V_b değeri ise hava kabarcığındaki gerilim düşümüdür. Bu ifadeye göre yalıtım sıvısı içerisinde delinme gerçekleşmesi için gerekli kritik alan hava kabarcığının başlangıçtaki çapına bağlıdır ve bu değer dışardan etkiyen basınç ve sıcaklık ile değişir [2].

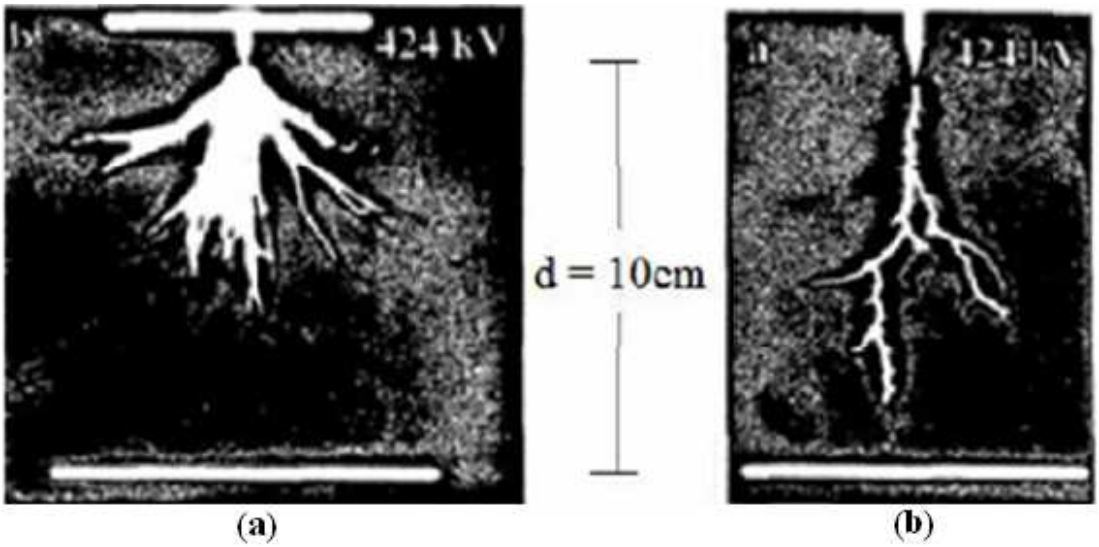
1.1.4. Kanal (Streamer) teorisi

1970'li yılların başlarında yüksek hızda fotoğraflama teknolojisinin gelişmesi ile birlikte kanal teorisi, sıvı yalıtkanlardaki delinme olayının açıklanmasında kullanılmaya başlandı. Bu teoriye göre sıvıların yalıtım dayanımı, uygulanan basınca ve aşırı zorlanmaya maruz kalmış sıvılarda oluşan gaz kabarcıklarına bağlıdır. Geçmişte delinme gerçekleşmeden önce gözlenen baloncuklar nedeni ile 'gaz kabarcığı teorisi (bubble theory)' olarak da adlandırılmıştır. 1980'li yıllarda

mikroskobik tekniğinin yüksek hızlı kameralarla kullanılabilmesi, sıvı yalıtkanlardaki delinme olayının daha detaylı bir şekilde incelenebilmesini sağlamıştır. Boşalma süreci kanal (streamer) boşalması olarak da adlandırılabilir [1,4,5].

Genel olarak düzgün alanda kanal oluşumunun ve oluşan kanalın yayılmasının yüksek elektrik alan sonucunda gerçekleşebileceği (0,5 MV/cm) kabul edilir [4,5]. Fakat oluşabilecek küçük bir kanal bile yalıtım sıvısı içinde zayıf zincir (weak-link, köprü) oluşumu ile yayılarak delinme ile sonuçlanabilir. Bu nedenle düzgün alanda yalıtım sıvısının delinme gerilimi kanal oluşumu ile belirlenir. Oluşan kanalın yayılarak tam delinme ile sonuçlanması, yalıtım sıvısının kalitesine bağlıdır. Yani yalıtım sıvısının kısmi deşarj başlangıç değeri (ya da kanal oluşum değeri) bu sıvının yalıtım dayanım değeridir. Çünkü alternatif gerilim altındaki saf olmayan yalıtım sıvılarında kanal oluşumu (kısmi deşarj) sıvı içerisinde zayıf zincirlerin oluşmasına, oluşan zayıf zincirler ise sıvı yalıtım malzemesinin delinmesine neden olmaktadır.

Düzgün olmayan alanda kanal oluşumuna, sivri uçlu elektrodun etrafında oluşan büyük elektrik alan şiddeti (MV/cm) neden olur. Eğer elektrotlar arasındaki ortalama elektrik alan şiddeti oluşan kanalın diğer elektroda yayılması için yeterli değilse kanal yayılmaya devam etmez. Oluşan kanallar, ancak gerilim yeteri kadar yükseltilirse diğer elektroda kadar yayılır ve delinme ile sonuçlanır. Bu nedenle, düzgün olmayan alanda delinme olayı, oluşan kanalın yayılma karakteristiğine bağlı olarak değişir. Kanalın yayılma karakteristiği ise sıvı yalıtım malzemesinin kalitesinden çok uygulanan gerilim ve sıvı yalıtım malzemesinin türüne bağlıdır [4,5]. Şekil 1.4'te mineral yağ içinde (a) yaklaşık düzgün alanda ve (b) düzgün olmayan alanda oluşmuş kanal yapıları görülmektedir. İki yapı karşılaştırıldığında, yaklaşık düzgün alanda yıldırım darbe gerilimi uygulanması ile oluşan kanal yapısının daha fazla kola ayrıldığını söyleyebiliriz [4].



Şekil 1.4. Mineral yağ içerisinde (a) yaklaşık düzgün alanda ve (b) düzgün olmayan alanda oluşan kanal yapıları [4]

1.2. Yalıtım Dayanımını Etkileyen Faktörler

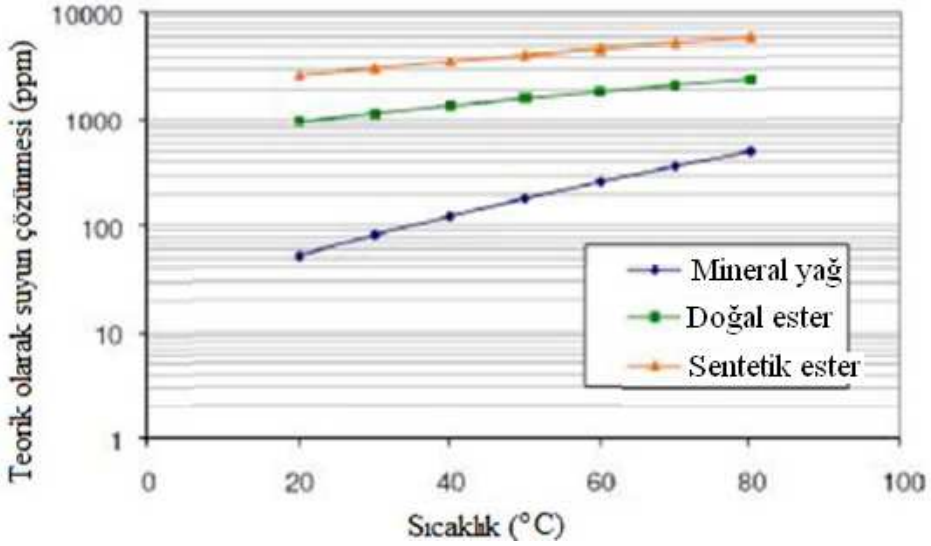
1.2.1. Nemin etkisi

Transformatör içerisindeki suyun temel olarak üç kaynağı vardır: Yağ içerisinde artık olarak kalan su, atmosferden alınan nem ve transformatör içerisindeki selüloz bazlı malzemenin yaşlanması sonrasında açığa çıkan su. Transformatörler üretim aşamasında yoğun bir kurutma işlemine tabi tutulur. Etkili bir kurutma işlemi ile selüloz bazlı malzeme içerisindeki nem miktarı %0,5'in altına düşürülmektedir. Yeterli kurutma işlemi yapılmadığında, malzeme içerisindeki artık su miktarı daha fazla olmakta ve bu su işletme boyunca transformatör yağına nüfus etmektedir. Su transformatör içine transformatör yapısının yetersiz olması nedeniyle nem biçimiyle atmosferden de girebilir. Buna ek olarak, selüloz bazlı malzemelerin yüksek sıcaklıkla yaşlanması ile yüksek miktarda su açığa çıkmaktadır. Ortamdaki su miktarı, selüloz bazlı malzemenin daha da hızlı yaşlanmasına ve daha fazla su üretmesine neden olmaktadır [4,7,8,10].

Su, transformatör yağı içerisinde üç farklı şekilde bulunabilir: Çözünmüş, çözünmemiş ve su damlacığı. Çözünmüş su, sıvı moleküllerinin polar (yüklü, kutuplanmış) gruplarına hidrojen bağları ile sıkı bir şekilde bağlı durumdadır. Ayrışmış (çözünmemiş) olan su molekülleri, yalıtım sıvısı içerisinde monomer veya küme halinde asılı olarak bulunurlar. Su damlacıkları ise yalıtım sıvısı doyuma

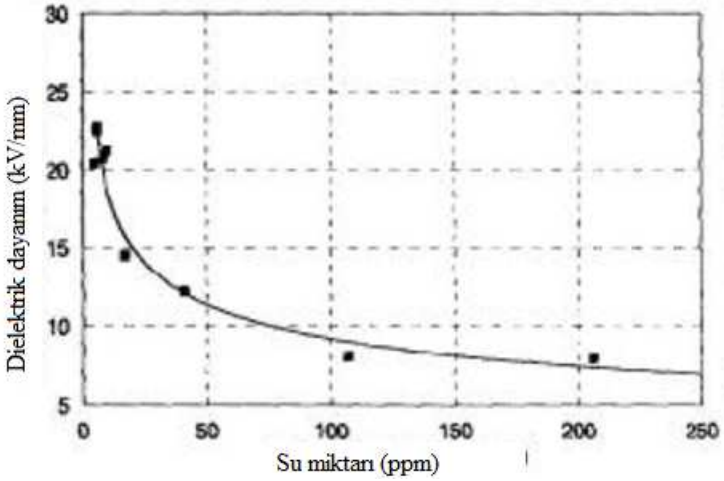
ulaştıktan sonra oluşur. Su damlacıkları, yalıtım sıvısı içerisinde asılı olarak bulunabileceği gibi su damlacığının boyutuna bağlı olarak kazanın altında toplu olarakta bulunabilirler [1,4-11].

Suyun mineral yağ içerisindeki durumu, yalıtım sıvısının moleküler yapısına bağlıdır. Su molekülleri polar moleküllerle kolayca bağ oluşturabildiğinden, polar yapıya sahip yalıtım sıvıları daha fazla çözünmüş su tutabilir [4]. Örneğin alternatif yalıtım sıvısı olarak çeşitli uygulamalarda kullanılan ester sıvıları, polar moleküler yapılarından dolayı 20 °C de mineral yağdan 20 kat daha fazla su tutabilmektedir (Şekil 1.5).



Şekil 1.5. Mineral yağ, sentetik ester ve doğal esterin su tutma kabiliyetleri [4]

Yalıtım sıvısı içerisindeki su, yalıtım dayanımının düşmesinde en önemli rolü oynar. Mineral yağın dielektrik dayanımı, içerdiği su miktarıyla büyük oranda değişir. Şekil 1.6'da düzgün alanda, su miktarı ile yalıtım dayanımın değişimi gösterilmiştir.

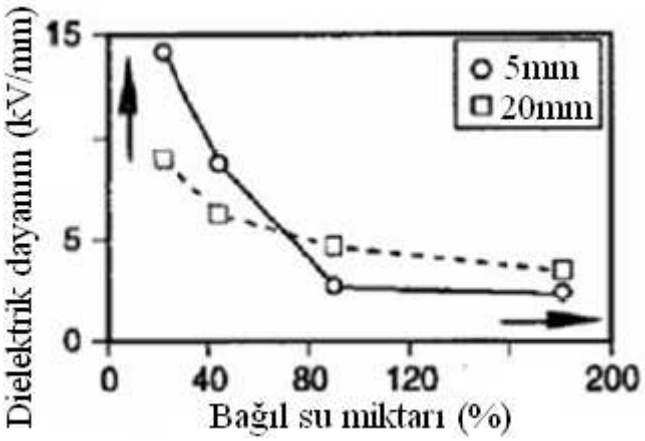


Şekil 1.6. Mineral yağın su içeriğine bağlı olarak yalıtım dayanımının değişimi [4]

Yağ içinde çözünmüş su miktarının 5 ppm'den 20 ppm'e yükselmesi ile yalıtım dayanımın büyük oranda azaldığı görülmektedir. Bu düşüşün miktarı yalıtım sıvısının doyuma ulaşması ile azalmaktadır.

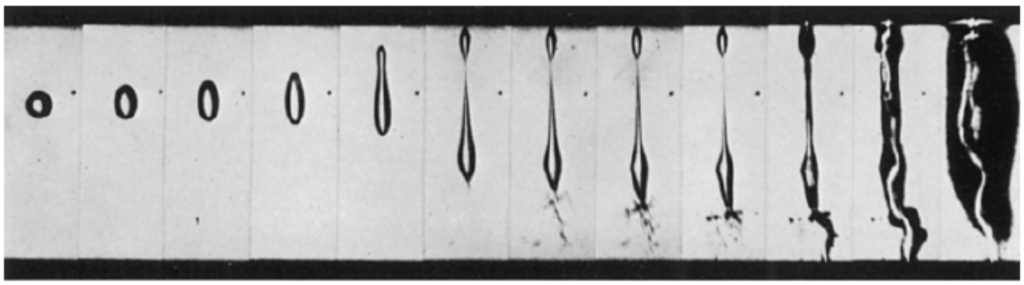
Yalıtım sıvısı içinde çözünmüş suyun, yalıtım dayanımı üzerindeki olumsuz etkileri genellikle katı parçacıkların suyu absorbe etmesine bağlanır. Yalıtım sıvısı içerisindeki nem içeren katı parçacıklar, zayıf zincir oluşumunun önemli birer parçası olarak yalıtım dayanımının daha da düşmesine yol açar. Parçacıklardan arındırılmış olan yalıtım sıvısı yüksek miktarda su içerse dahi yalıtım dayanımını büyük oranda korumaktadır [13]. Diğer bir neden ise suyun kaynama noktasının düşük olmasıdır. Daha önce açıklandığı gibi elektrot yüzeyinde kaçak akımın yoğunlaştığı ve sıcaklığın arttığı bölgelerde su kolayca buhar kabarcığı oluşturur. Bu durum da yalıtım dayanımını önemli ölçüde düşürmektedir [4].

Suyun sıvıların yalıtım dayanımına etkileri, elektrotlar arası mesafe ve uygulanan gerilime de bağlıdır. Suyun yalıtım dayanıma olumsuz etkisi küçük elektrot açıklığında daha belirgindir (Şekil 1.7). Bu durum, küçük elektrot açıklıklarında elektrot yüzeyinde görülen nem içeren parçacıkların alanı daha da arttırmasına bağlanır. Uygulanan gerilimin süresi küçük olduğunda, parçacıkların hareketi için yeterli zaman oluşmadığından, suyun dielektrik dayanıma olumsuz etkisi de azalmaktadır [4].



Şekil 1.7. Farklı elektrot açıklıklarında suyun yalıtım dayanımına etkileri

Çeşitli nedenlerle (örneğin transformatörün yüksek sıcaklıklardan ani bir şekilde düşük sıcaklıklara geçmesi) yalıtım sıvısı içerisindeki su miktarının doyum noktasını geçmesi ile yalıtım sıvısı içerisinde oluşan serbest su damlacıkları, zayıf zincir oluşumunun önemli nedenlerindendir ve yalıtım dayanımını önemli ölçüde düşürür. Bu durum, yüksek hızlı kameralar ile su damlacığını şeklindeki bozulma gözlenerek incelenmiştir. Şekil 1.8'de, bir su damlacığına yüksek elektrik alan uygulanması sonucu, su damlacığının şeklinin zamanla bozulması ve sonunda delinmeye neden olması görülmektedir [1,4].



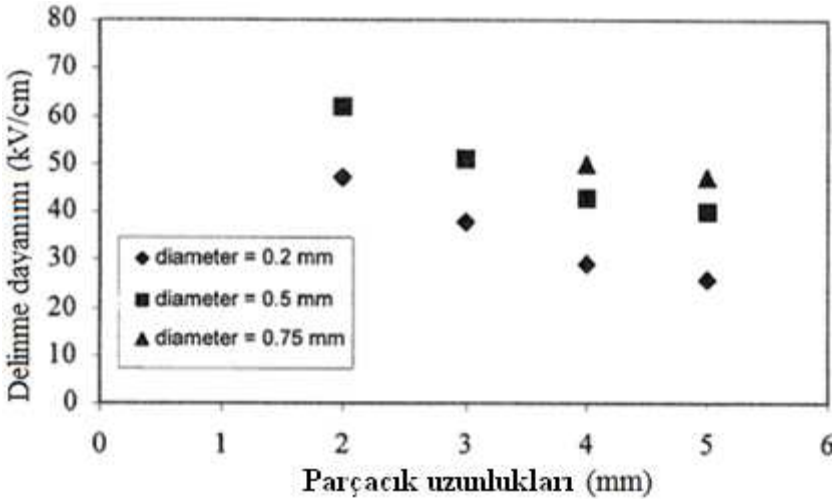
Şekil 1.8. Elektrik alan uygulanması ile bir su damlacığının şeklinde meydana gelen değişim

1.2.2. Yabancı parçacıkların etkisi

Transformatör yağı içerisine üretim aşamasında pek çok parçacık girebilir. Bu parçacıklar tank üretimi esnasında tank duvarlarında, sargı yüzeylerinde, yalıtım malzemeleri üzerinde v.s. kalmış olabilir. Transformatör içerisine konulmadan önce filtre edilerek parçacıklardan arındırılmış yağ, transformatör içerisinde kalan parçacıklar nedeniyle yeniden kirlenebilir. Bu nedenle üretilen bir transformatör

içindeki yağ, test edilmeden önce bir kez daha filtre işlemine sokulur. İşletme durumundaki transformatörlerde ise selüloz bazlı malzemelerin yaşlanması nedeniyle yağ içerisine sürekli olarak selüloz parçacıkları girmektedir. Yapılan araştırmalarda, işletme durumundaki transformatörlerde en çok demir, bakır, karbon ve selüloz parçacıklarının bulunduğu saptanmıştır [1,4,7].

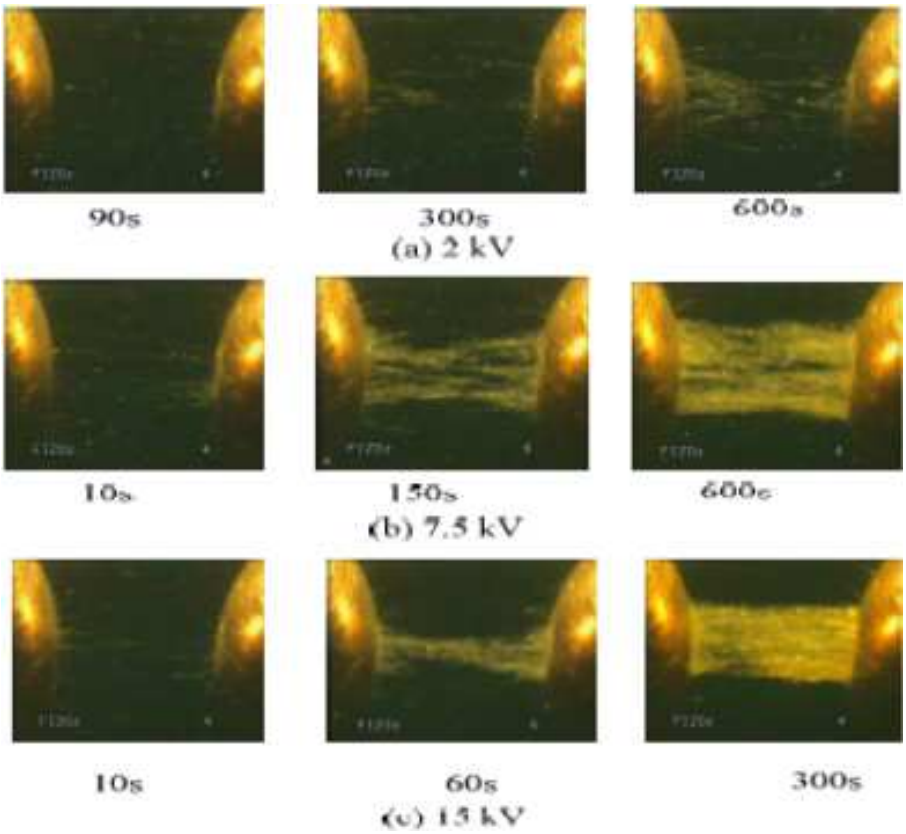
Transformatör yağı içerisinde bulunabilecek metal parçacıklar, mineral yağın yalıtım dayanımını % 70 oranında düşürebilir. Şekil 1.9'da farklı ebatlarda metal parçacıkların mineral yağın yalıtım dayanımına etkileri gösterilmiştir. Bu bağlamda, yağdaki metal parçacık içeriğinin, boşalma olayının gerçekleşmesinde önemli rol oynadığı görülmektedir.



Şekil 1.9. Farklı ebatlarda metal parçacıkların mineral yağın yalıtım dayanımına etkileri [1]

Transformatör yağı içerisindeki karbon parçacıkları, genellikle kademe değiştiricinin çalışması sonrasında yağın karbonlaşması ile oluşur. Buna ek olarak, yalıtım sistemindeki selüloz bazlı malzemenin yaşlanması da çok miktarda karbon parçacığının açığa çıkmasına yol açar. Oluşan bu karbon parçacıkları, yağ içerisindeki su miktarının düşmesine yol açarak yağın yalıtım dayanımını arttırmaktadır. Ancak, iletken karbon parçacıkları elektrotlar arasında birikerek zayıf zincir oluşumuna da neden olabilir. Dolayısıyla yalıtım sıvısı içindeki karbon parçacıklarının, yalıtım dayanımına olumlu ve olumsuz etkileri olduğu söylenebilir [4].

Güç transformatörlerinin yalıtım tasarımında önemli bir yeri olan selüloz bazlı malzemeler, yağ içerisinde selüloz parçacıkları bulunmasının ana nedenidir. Yalıtım sıvısı E elektrik alanı ile zorlanmaya maruz kaldığında selüloz parçacıkları kutuplanır. Zayıf zincir teorisinde bahsedildiği üzere selüloz parçacığına bir kuvvet etki eder. Bu kuvvetin etkisiyle parçacıklar, alanın yüksek olduğu (örneğin elektrot yüzeyindeki çok küçük bir bozukluğun olduğu bölge) yöne doğru hareket ederek iki elektrot arasında kısmen ya da bütün bir köprü oluştururlar. Şekil 1.10'da üç farklı doğru gerilim seviyesi için %0,005 selüloz parçacığı içeren mineral yağda köprü oluşumu görülmektedir. Alternatif gerilim altında selüloz parçacıklarının hareketleri daha yavaştır [4,14].

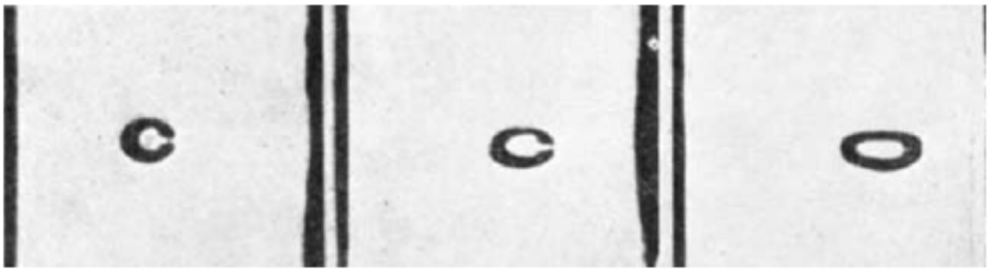


Şekil 1.10. Doğru gerilim altında iki elektrot arasında köprü oluşumu [14]

1.2.3. Gazların etkisi

Transformatör içindeki gazların oluşma nedenleri, atmosferden sızan hava, termal ya da elektriksel zorlanma nedeniyle açığa çıkan hidrokarbon gazları, ani sıcaklık değişimleri nedeniyle su veya yağ moleküllerinin buharlaşması olabilir. Yağ içerisindeki gaz miktarı, yağın gaz tutma kapasitesine bağlıdır. Doyum seviyesine

kadar, yağ içerisindeki gaz çözünmüş haldedir. Doyum seviyesinin üzerinde sıcaklık ve hidrolik basıncın etkisi ile gazlar, kabarcıkı biçimini alır. Bu durum, transformatör yağının yalıtım dayanımının önemli ölçüde düşmesine yol açar. Gaz kabarcıklarının etkisi yüksek hızlı kameralar yardımıyla incelenmiştir. Şekil 1.11'de yağ içerisindeki gaz kabarcığının şeklinin uygulanan alternatif gerilim ile değişimi gösterilmiştir [1,4,7].

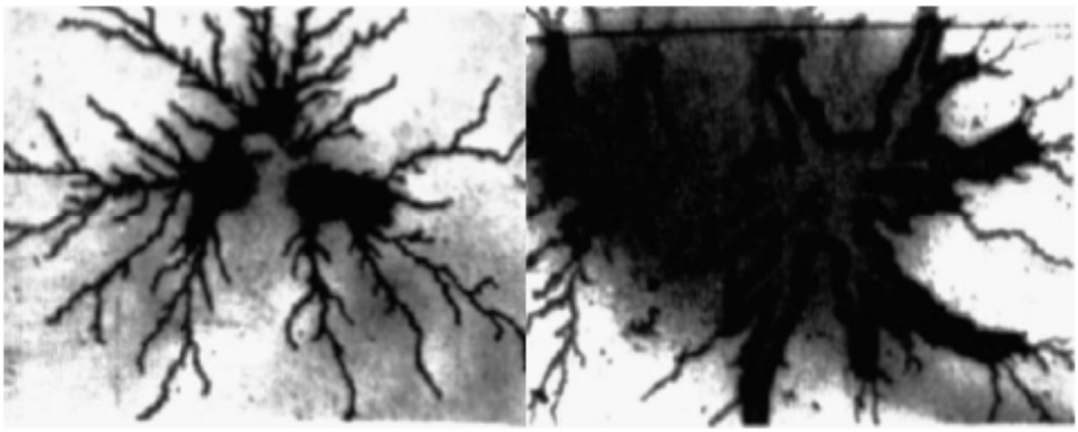


Şekil 1.11. Alternatif gerilim altında gaz kabarcığının deformasyonu [4]

Yağ içerisinde çözünmüş gazın, toplam yağ hacmi içerisindeki oranı ve gazın tipi yalıtım dayanımını etkiler. Örneğin oksijen gazının elektron çekim gücünün yüksek olması, yalıtım sıvısının dayanımını arttırmaktadır. Katottan salınan elektronlar yüksek elektron çekim gücü nedeniyle oksijen tarafından tutulur. Bu durum delinmeye neden olabilecek serbest elektron miktarının azalmasına ve yalıtım sıvısının dayanımının artmasına katkıda bulunur. Bu duruma bir başka örnek SF_6 gazı ile de verilebilir. Ancak, hidrojen, azot, karbondioksit v.b. elektron çekim gücü düşük gazların, yalıtım sıvısının dayanımına etkileri oldukça küçüktür [4].

Mineral yağın yalıtım dayanımının hidrolik basınç etkisi ile değişimi, gaz etkisinin dolaylı bir kanıtı olarak kabul edilir. Atmosfer basıncının üstünde mineral yağın delinme gerilimi artarken, atmosfer basıncının altında delinme gerilimi düşmektedir. Bu durum, gaz kabarcıklarının sayısı ve boyutlarındaki değişim ile açıklanır. Basınç değerinin yükselmesi genellikle gaz kabarcığı sayısının ve boyutlarının düşmesine neden olarak zayıf zincir oluşma olasılığını düşürür. Gaz kabarcığı sayısının ve boyutlarının düşük olduğu durumda, zayıf zincir oluşumunun temel nedeni mineral yağ içerisindeki katı parçacıklar olmaktadır. Atmosfer basıncının altında ise durum tam tersi olmaktadır. Basıncın düşmesi ile gaz kabarcıklarının boyutlarında ve sayısında meydana gelen artış, mineral yağın yalıtım dayanımının önemli oranda düşmesine neden olmaktadır.

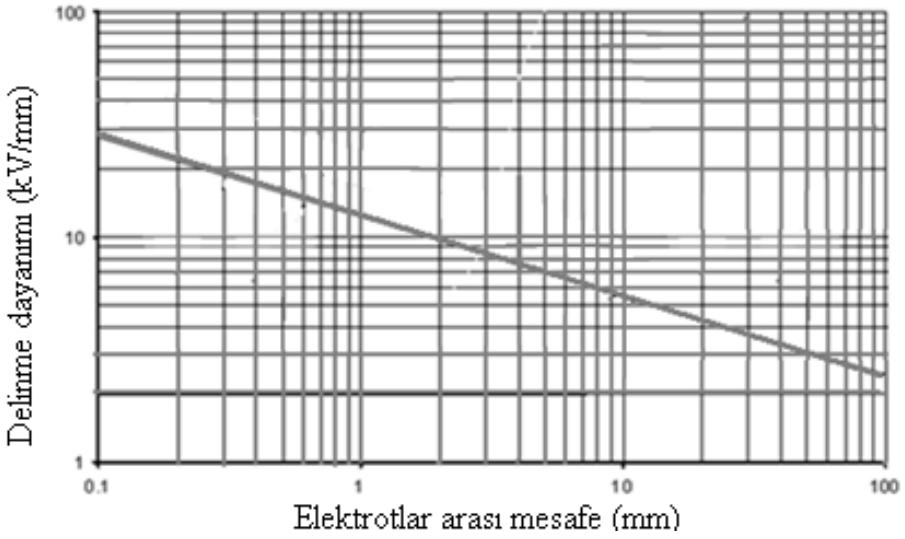
Gaz kabarcıklarının oluşma nedeni delinme öncesi gerçekleşen ani sıcaklık artışı da olabileceğinden, uygun şekilde gazdan arındırılmış yağlarda da yalıtım dayanımı basınca bağlıdır. Şekil 1.12'de 760 mmHg ve 100 mmHg basınç değerleri için iki farklı delinme işlemi gösterilmiştir. Birinci şekilde, basınç 760 mmHg iken boşalmanın gerçekleştiği ince çizgiler halindeki gaz kanalları, basıncın 100 mmHg ye düşmesi ile büyük oranda genişlemektedir [1,4,7].



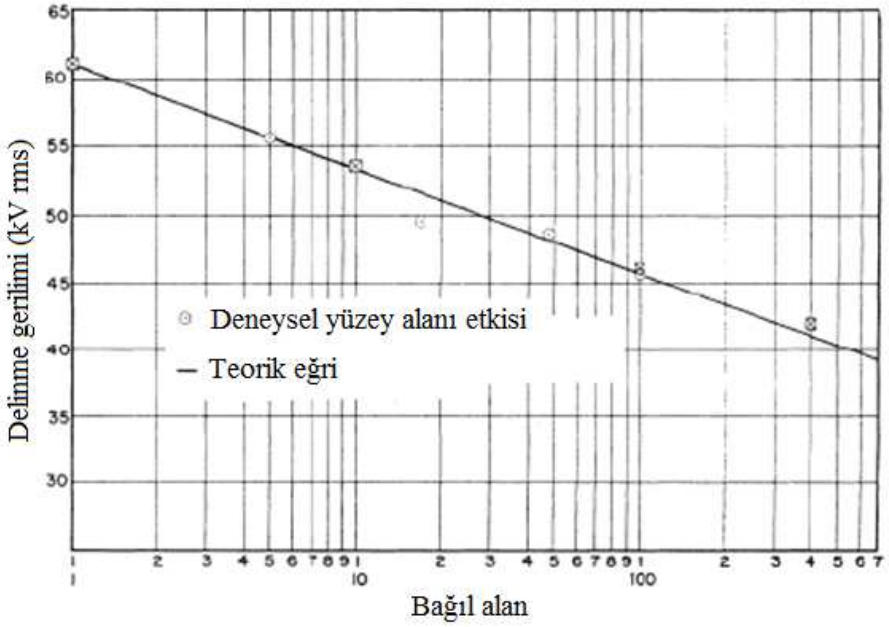
Şekil 1.12. Farklı basınç değerlerinde delinme olayı

1.2.4. Hacim etkisi (Volume effect)

Hacim etkisi, yalıtım dayanımını önemli ölçüde etkileyen elektrot yüzey alanı ve elektrotlar arasındaki mesafenin birlikte incelenmesi ile alınabilir. Genel olarak kısmi alan yoğunlaşmasına neden olan kusurlu bölgelerin bulunma olasılığı arttığından yalıtım dayanımının elektrot yüzey alanının büyümesi ile azaldığı kabul edilir. İki elektrot arasındaki mesafenin artması ise yalıtım dayanımını önemli ölçüde düşüren katı parçacık, gaz, su v.b. bulunma olasılığını arttırdığından yalıtım dayanımını düşürdüğü varsayılır. Bu nedenle transformatör tasarımı yapılırken geniş yağ kanalları, 2-3 mm ölçülerinde presboard malzemeler ile daha küçük yağ kanallarına bölünerek yalıtım sıvısının dayanımın artması sağlanır. Şekil 1.13'de iki elektrot arasındaki mesafeye bağlı olarak çeşitli koşullardaki yalıtım yağının dayanımı görülmektedir [11]. Şekil 1.14'te ise elektrot yüzey alanına bağlı olarak yalıtım yağının dayanımı gösterilmektedir [4].



Şekil 1.13. Farklı elektrot açıklık değerlerinde mineral yağdaki delinme geriliminin değişimi



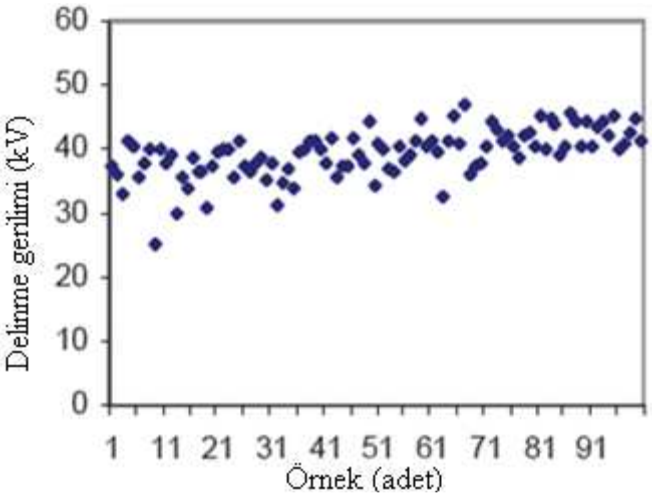
Şekil 1.14. Farklı elektrot yüzey alanı değerlerinde mineral yağdaki delinme geriliminin değişimi

Yayınlanmış çalışmaların bazılarında düzgün alanda, yalıtım dayanımının elektrotlar arası mesafeden bağımsız olduğu sonucuna da varılmıştır. Ancak, bu çalışmalarda kullanılmış olan yalıtım sıvıları, gazlardan ve yabancı parçacıklardan arındırılmış sıvılardır. Dolayısıyla yağ kanalları arasında oluşması beklenen zayıf zincirlerin bulunma olasılığı düşmektedir. Fakat elektrot yüzeyindeki zayıf noktalar aynı şekilde

bulunmaya devam edeceklerdir. Bu nedenle, yalıtım dayanımının elektrot açıklığının artmasından çok elektrot alanının artmasıyla düştüğü söylenebilir [4,6-9,11].

1.3. Delinme Geriliminin İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi

Elektrot açıklığına veya yüzey alanına bağlı değişim gösteren tasarım eğrileri, istatistiksel yöntemler kullanılarak oluşturulur. Bunun nedeni yalıtım yağının uygulanan gerilime bağlı olarak kesin bir delinme gerilimine sahip olmamasıdır. Şekil 1.15'te yalıtım sıvısı için sabit elektrot açıklıklarında delinme gerilimlerinin dağılımı gösterilmiştir. Bu şekilden görülebileceği gibi aynı elektrot açıklığında yalıtım yağı farklı gerilim seviyelerinde delinebilir. Elde edilen verilerin istatistiksel olarak değerlendirilmesi ile oluşturulan dayanım eğrileri, aslında uygulanan gerilim altında kabul edilebilecek kadar küçük seviyede delinme olasılığını tanımlar.



Şekil 1.15. Minaral yağın sabit elektrot açıklığında delinme gerilimlerinin dağılımı

Gauss ve Weibull dağılımları, genellikle delinme geriliminin istatistiksel değerlendirilmesinde sıkça kullanılan iki farklı parametrik dağılımdır.

1.3.1. Gauss dağılımı yöntemi

Gauss dağılımında veriler ortalama değer etrafında simetrik olarak dağılmaktadır ve belirli sayıda uç değere ya da sapmış değere sahiptir. Bu dağılımda, aşağıdaki denklemlerden sırası ile ana değer, standart sapma, asimetri ve basıklık değerleri belirlenir. Şekil 1.15'te mineral yağa ait dağılım grafiği için hesaplanan ana değer, standart sapma, asimetri ve basıklık değerleri Tablo-1.1'de görülmektedir.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i \tag{1.6}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} \tag{1.7}$$

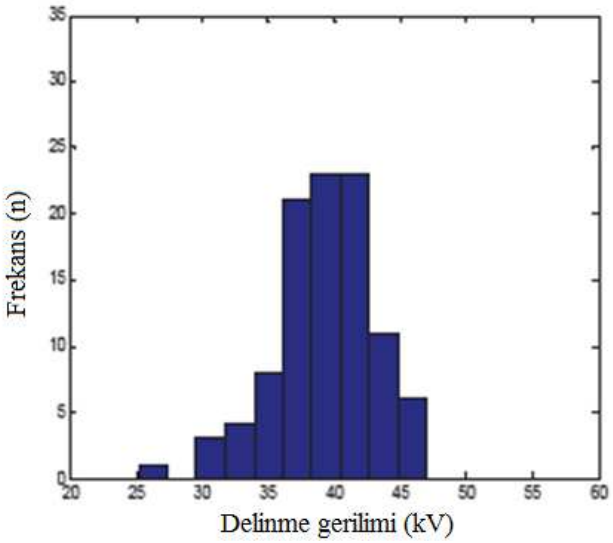
$$S = \frac{\sqrt{n} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^3}{\left(\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2 \right)^{3/2}} \tag{1.8}$$

$$g = \frac{n \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^4}{\left(\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2 \right)^{2}} \tag{1.9}$$

Tablo 1.1. Örnek popülasyona ait ortalama değer, standart sapma, basıklık ve eğirilik değerleri

Yalıtım sıvısı	Ortalama değer (kV)	Standart sapma (kV)	Basıklık (kurtosis)	Eğrilik (skewness)
Mineral yağ	39	3,7	4,36	-0,73

Gauss dağılımında asimetri sıfır, basıklık değeri ise üç olmalıdır. Tablo 1.1'den de görülebileceği gibi yalıtım sıvılarının delinme gerilimlerinin dağılımında asimetri mevcuttur ve basıklık değeri üç ten farklıdır. Bu durum, hesaplanan delinme geriliminin doğruluğunu (hassasiyetini) değiştirmektedir. Şekil 1.16'da sıvıların delinme gerilimlerine ait histogramlarda da bu asimetri görülebilmektedir. Sonuç olarak gauss dağılımının yalıtım sıvılarının delinme gerilimlerinin belirlenmesinde kullanılabilecek uygun bir istatistiksel yöntem olmadığı kanısı yaygınlaşmıştır [4,6,15].



Şekil 1.16. Minaral yağın sabit elektrot açıklıklarında delinme gerilimlerinin dağılımı

1.3.2. Weibull dağılımı yöntemi

1951 yılında Weibull tarafından yayınlanan analiz herhangi birinde meydana gelen bozulmayla tüm sistemin bozulmasına neden olan zayıf zincirlerin yol açtığı bozulmalara ait dağılımların modellenebilmesini sağlamıştır. Bu tip bir dağılım zayıf zincir mekanizması ile uyuşmaktadır. Genel form olarak, dağılım fonksiyonu ≤ V gerilimi için arıza olasılığını yani verir. P(V);

$$P(V) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{V-V_0}{a}\right)^m}, & V \geq V_0 \\ 0, & V < V_0 \end{cases} \quad (1.10)$$

biçiminde ifade edilir.

V_0, a ve m sıfırdan büyük katsayılardır. Dağıtım fonksiyonun türevinden elde edilen yoğunluk fonksiyonu, ΔV ile çarpıldığında, V geriliminin küçük bir ΔV aralığında delinme olasılığını verir. Buna göre delinme olasılığı için;

$$p(V)=\frac{dP(V)}{dV}=\frac{m}{a}\left(\frac{V-V_0}{a}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{V-V_0}{a}\right)^m} \quad (1.11)$$

ifadesi verilebilir.

Weibull dağılımında basıklık ve asimetri değerleri dikkate alınan parametreler arasında değildir. Arıza analizi yapabilmek için kullanılabilecek en iyi istatistiksel yöntemdir [4,6,15].

2. GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNDE KULLANILAN KATI-SIVI YALITIM MALZEMELERİ

Güç transformatörlerinde yalıtım, katı ve sıvı yalıtım malzemeleri ile gerçekleştirilmektedir. Katı ve sıvı yalıtım malzemeleri yanlız başına kullanıldıklarında iyi birer yalıtım malzemesi değildirler. Bu bağlamda güç transformatörlerindeki yalıtım tasarımının katı ve sıvı yalıtım malzemelerini etkileşimine bağlı olduğunu söylemek daha doğru olacaktır.

Güç transformatörleri içinde katı yalıtım malzemesi olarak genellikle yağ ile etkileşiminden ve kolayca erişilebilmesinden dolayı selüloz bazlı katı yalıtım malzemeleri kullanılmaktadır. Sıvı yalıtkan olarak yüzyılı aşkın bir süredir petrol kökenli yağlar kullanılmaktadır. Fakat çeşitli nedenlerle geliştirilmiş alternatif yalıtım sıvıları da mevcuttur.

2.1. Katı Yalıtkanlar

Kâğıt, katı yalıtkanlar içinde kullanılan en ucuz ve en iyi elektriksel yalıtım sağlayan malzemedir. Kâğıdın elektriksel özellikleri, fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Önemli elektriksel özellikleri,

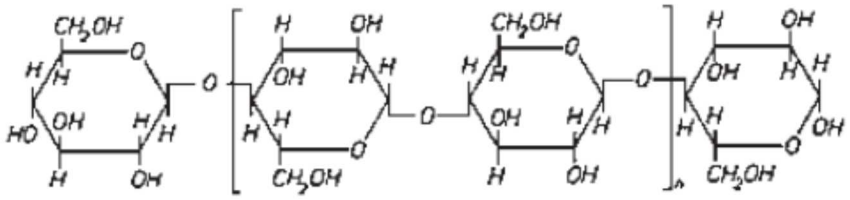
- Yalıtım dayanımının yüksek olması,
- Dielektrik sabitinin –yağ yalıtımlı transformatörlerde– transformatör yağınınkine oldukça yakın olması,
- Dielektrik kayıplarının düşük olması,
- İletken parçacıklar içermemesi

biçiminde sıralanabilir [16].

Güç transformatörlerinde kullanılan katı yalıtkanların üretiminde hammadde olarak iki farklı tip selüloz malzeme kullanılır. Bunlardan biri sülfat selülozudur. Kozalaklı, yumuşak ağaçlardan elde edilen selüloz, elektriksel yalıtım için en uygun malzemedir. Bu ağaçlardan elde edilen selüloz lif boylarının uzun (1 – 4 mm

arasında) olması, malzemeye yüksek bir mekanik dayanım sağlar. Selülozun bileşimi şöyledir,

- Selüloz: % 76–86,
- Hemiselüloz: %10–15,
- Lignin: % 4–8,
- Mineral maddeler: %0,2–0,8.



Şekil 2.1. Selülozun kimyasal yapısı

Selüloz, bir polisakkarittir ve her molekülünde 1000–2000 kadar glukoz molekülü, bir zincir şeklinde birbirine bağlanır (Şekil 2.1). Polimerizasyon derecesi (PD) olarak tanımlanan bu değer, malzemenin yaşlanmasının değerlendirilmesinde referans olarak alınır. Hemiselüloz, tam anlamıyla selüloz değildir, polimerizasyon derecesi 50–250 arasında olup, selülozunkinden önemli ölçüde küçüktür. Lignin, selüloz lifleri arasında yapıştırıcı bir etki yaparak, malzemenin dayanımını yükseltir ve ağaca kahverengi görünüm verir. Kimyasal sülfat işlemi (ya da kısaca kraft işlemi) ile selüloz içinde bulunabilen, ancak istenmeyen bazı maddeler (lignin, reçine v.b.) tamamen ya da büyük ölçüde yok edilir.

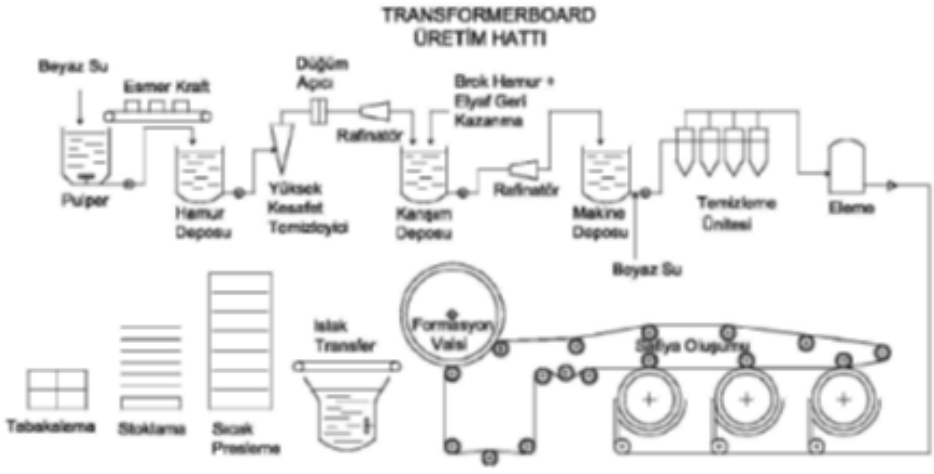
İkinci olarak pamuk selülozundan bahsedilebilir. Pamuk selülozu, saf selülozün elde edilmesinde yararlanılabilecek bir başka maddedir. Pamuk selülozunun lif boyları daha uzun ancak çapları daha küçük ve polimerizasyon derecesi de düzensizdir. Bu nedenle mekanik ve elektriksel özellikleri, kraft selülozunun özelliklerinden daha kötüdür. Geçmişte kullanımına daha sık rastlanan pamuk selülozundan elde edilen bordlar endüstriyel tekstil atıklarından veya kullanılmış giysilerden üretilmekteydi. Fakat günümüzde saf pamuk ile üretilmiş tekstil ürünü bulmak zorlaştığından artık pek kullanılmamaktadırlar [11,16].

Aşağıda, güç transformatörlerinin üretiminde kullanılan temel bazı katı yalıtkan türlerinin özellikleri açıklanmıştır.

2.1.1. Pressboard

Pressboard (PSP), %100 sülfat selülozu kullanılarak üretilir. Presboard üretiminde kullanılan sülfat selülozu, kuzey ülkelerinde (İskandinavya, Rusya, Kanada, …) yetişen kozalaklı ağaçlardan elde edilir. Yavaş büyüyen kozalaklı ağaçlar, ılıman ve tropikal bölgelerde yetişen ve kışın yapraklarını döken ağaçlara göre daha fazla nem tutarlar. Diğer bölgelerden temin edilen ağaçların süngerimsi yapılarına karşın, İskandinavya ve Kanada'dan temin edilen keresteler daha sıkı örgülü yapıya ve kalın çeperli hücrelere sahiptirler [11].

Presbord üretim aşamaları Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Presboard malzeme, kendi içinde farklı gruplara ayrılır. Bu gruplara ilişkin ayrıntılara burada girilmeyecektir. Presboard malzemenin teknik özellikleri ilgili standartlarda verilmiştir. Malzemenin yoğunluğu, tip ve kalınlığa bağlı olarak, 0,85–1,25 gr/cm³ arasında değişir. 0,1–1 mm arasındaki kalınlıklarda rulo halinde, 1–8 mm arası kalınlıklarda ise plakalar halinde üretilir. Üretim aşamasında % 8 oranında nem içerir. Bu nem, transformatörün aktif kısmının kurutulması işleminde % 1'in altında bir değere düşürülür. Malzemenin yapısına bağlı olarak, % 6–20 oranında yağ emdikten sonra delinme dayanımı 30–45 kV/mm arasında bir değere ulaşır. Malzemenin yüksek gerilim transformatörleri içindeki kullanım alanı çok geniştir [17].



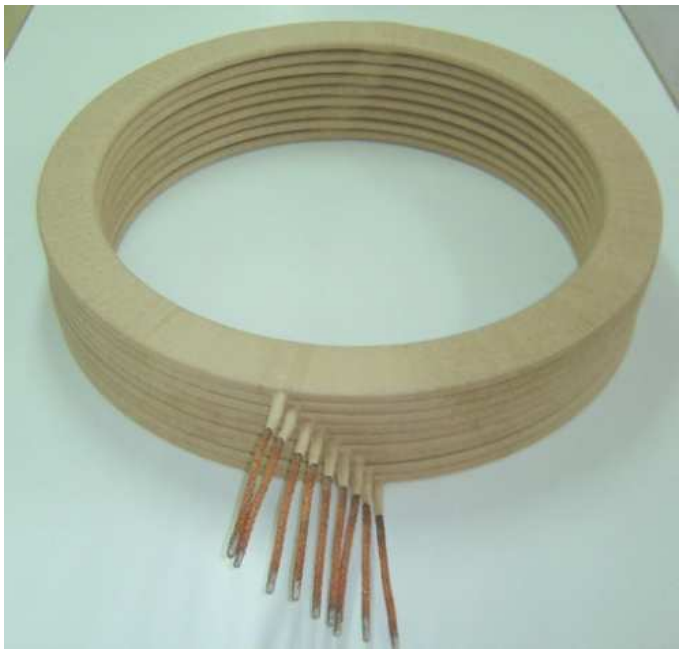
Şekil 2.2. Pressboard üretim şeması [11]

2.1.2. Özel uygulamalar için kâğıtlar

Aşağıda, özel uygulamalar için kullanılan kağıt türlerinden, kullanımı yaygın olan bazıları kısaca tanımlanmıştır[16]. Bu kâğıtlara ilişkin teknik özellikler ilgili standartlarda belirtilmiştir [18].

Kraft kâğıdı; %100 sülfat selülozundan üretilir. Özellikle sargı yalıtımında kullanılır. Genel olarak, 0,04–0,25 mm arasında kalınlıklarda üretilirler. Yağ içindeki delinme dayanımları 60–70 kV/mm civarındadır.

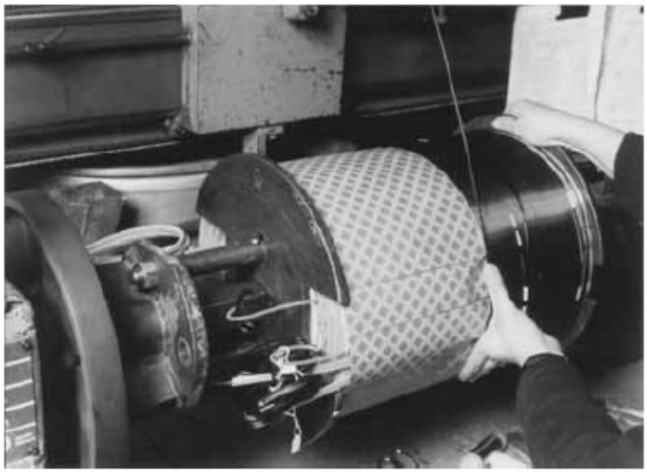
Krep kâğıdı; yüzeyi dalgalıdır ve esnek bir yapıya sahiptir. Kullanım alanları, genellikle elle sarım gerektiren çıkış üniteleri ya da elektrostatik alanı düzenleyen ve sargıların en sonunda bulunan stres halkaları olarak tanımlanabilir. Esnek bir yapıya sahip olduğundan, düzensiz geometrik yapıların yalıtılmasında kolayca kullanılabilir. Ancak, krep kâğıdı yaşlanma ile birlikte elastik özelliğini kaybettiğinden, yalıtılmış bölümler zamanla gevşeyebilmektedir. Bu nedenle kullanılacağı yerin önemine göre çeşitli kimyasal işlemler sonucu yırtılma, ayrılma gibi özellikleri geliştirilmiş, yüksek esnekliğe sahip kâğıtlar tercih edilebilmektedir. Şekil 2.3'te krep kağıdı ile kaplanmış stres halkaları görülmektedir.



Şekil 2.3. Stres halkaları

Termal olarak güçlendirilmiş kâğıt; üretim aşamasında selüloz bazlı malzemeye stabilizatörler eklenerek daha iyi bir termal kararlılık sağlanır ve yaşlanma yavaşlatılır. Yalıtım malzemesinin yaşlanması sıcaklıkla doğrudan ilişkilidir. Yaşlanma, selüloz moleküllerindeki uzun zincirlerin birbirlerinden kopmasına yol açar. Güç transformatörleri için kabul edilebilir sıcaklık artış seviyesi, transformatörün işletilmesi sırasında eriştiği ortalama Maksimum Sıcaklık Noktası (Hot Spot) sıcaklığına bağlıdır. Fakat bu sıcaklık seviyesinde, özellikle atmosfere açık genleşme depolu, nem alma düzenekleri basit ve bakımları seyrek olarak yapılan dağıtım transformatörlerinde görülen oksijen ve nemin etkisi ile katı yalıtım malzemesinin bozulması çok hızlı bir şekilde artar. Bu gibi durumlarda, malzemenin yaşlanmasını geciktirmek için termal olarak güçlendirilmiş kâğıt kullanımı daha faydalı olmaktadır. Bu kâğıt sayesinde, bozulma derecesi çalışma sıcaklığında normalin altına çekilebilmektedir.

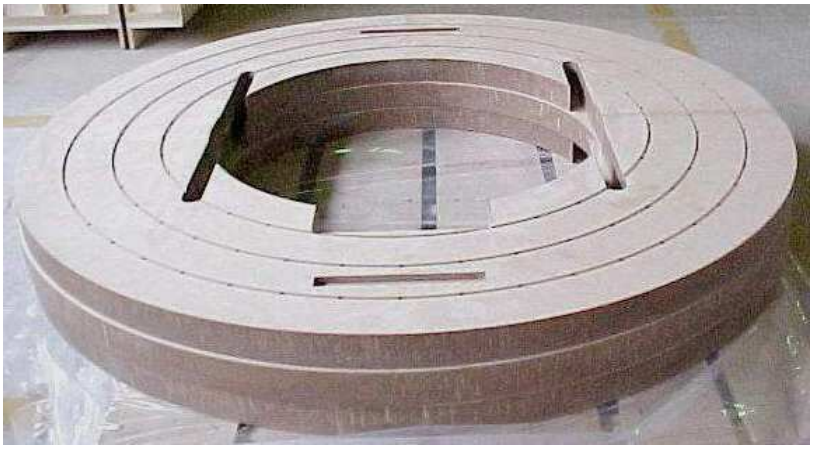
Sentetik reçine ile yapıştırılmış ve epoksi emdirilmiş kâğıtlar; geçmişte, yüksek mekanik dayanıma sahip kâğıt elde etmek için kraft kâğıtları birbirlerine reçine ile yapıştırılarak sentetik reçine ile yapıştırılmış kâğıt (SRYK) elde edilirdi. Ancak, SRYK üretiminde kullanılan reçinenin transformatör yağı ile emprenye edilmesi zordu. İyi emprenye yapılamayan bölümler, ileride delinmelere yol açabilen, kısmi boşalma kaynakları oluşturmaktaydılar. Bu nedenle epoksi emdirilmiş kâğıt (EEK) geliştirilmiştir. EEK, istenen mekanik dayanımı sağlayabilen ve aynı zamanda etkin bir şekilde emprenye edilebilen bir yapıya sahiptir. EEK, 0,06 – 0,25 mm kalınlığındaki kraft kâğıtlara ve rulo presboardlara baklava dilimi şeklinde epoksi reçine basılarak üretilir. Kâğıt üzerine basılan reçine, sargılar kurutma amacı ile enerjilendiğinde oluşan ısıyla eriyerek kâğıt üzerinde yapışkanlı, bir sonraki ısınma döngüsünden etkilenmeyecek ve yüksek mekanik dayanıma sahip bir yüzey oluşturur. Şekil 2.4'te iki sargı arasında EEK gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Sargı katları arasında EEK

2.1.3. Lamine presboard ve kontraplaklar

Lamine presboard (LB), büyük güçlü transformatörlerde baskı halkaları, ekranlanmış sonlandırma halkaları v.b. uygulamalarda kullanılır. Malzemenin teknik özellikleri ilgili standartlarda verilmiştir. Kalınlığı 2–5 mm kadar olan presboard plakaların özel tutkallar ile preslenerek yapıştırılmasından elde edilir. Kullanılacak tutkalın tipi, malzemenin transformatör içinde kullanılacağı yere göre değişim gösterebilir. Yağ içindeki delinme dayanımı 110–120 kV/mm kadar olabilmektedir [19].



Şekil 2.5. Lamine presbord ile üretilen bir baskı halkası

Kontraplak (KP) malzemeler ise nispeten daha küçük güçlerde ya da daha küçük elektriksel zorlanmaya maruz kalan bölümlerde kullanılmaktadır. Yağ içindeki delinme dayanımı 60-70 kV/mm civarındadır. KP malzemeler ile ilgili teknik özellikler ilgili standartlarda belirtilmiştir [20].

2.2. Sıvı Yalıtkanlar

Sıvı yalıtkan malzemeler, güç transformatörlerinde genel olarak yalıtım, soğutma, ark söndürme, malzemeyi koruma gibi amaçlarla kullanılmaktadırlar. Sıvı yalıtkanlar, transformatörlerde kısmi boşalmalar, arklar gibi nedenlerle çözünen gazları da içlerinde barındırırlar. Çözünen bu gazların analizi ile oluşabilecek arızalar ve arızaların boyutları hakkında önceden bilgi edinilebilmektedir.

Transformatördeki nüve, bakır sargılar gibi bölümler başlıca kayıp kaynaklarıdır ve bu kayıplar ısı olarak ortaya çıkar. Bu ısının, transformatör içinde yerel ısınmalara yol açmaması, yani üretildiği yerden olabildiğince hızlı bir şekilde uzaklaştırılması ve bunun bir denge içinde yapılması gerekmektedir. Transformatörlerde ısı transferi büyük ölçüde konveksiyon ile gerçekleşir. Konveksiyon doğal sirkülâsyona dayalıdır ve bu işlem transformatör içinde, sıcaklık farkından doğan yoğunluk farkı ile gerçekleşmektedir. Bu bağlamda, sıvı yalıtkanın viskositesi önem kazanmaktadır. Yüksek viskositeli yağlar, soğutma görevini yeteri kadar yerine getiremediğinden, transformatörlerin daha yüksek sıcaklıklarda çalışmalarına neden olurlar. Bu yüzden kullanılacak sıvı yalıtkanın viskozitesinin düşük olması istenir. Önceki bölümlerde de belirtildiği üzere yüksek sıcaklıklarda kâğıdın ve yağın bozulması hızlanmaktadır. Transformatör yağlarının yalıtıma katkıları önemlidir. Katı yalıtım malzemesinin içine işleyerek ve aralardaki boşlukları doldurarak yalıtım malzemesinin etkinliğini arttırmaktadır. Viskozitesi küçük olan yağ, transformatör içindeki dar yağ kanallarına daha kolay erişebilir ve ulaşılması zor olan veya düşük akış oranına sahip bölgelerde kısmi sıcaklık artışlarını engeller [21].

İyi bir yalıtım yağında aranan özellikler özet olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir:
- Soğutma özelliğinin iyi olması yani, ısı transferini iyi yapabilmesi,
- İyi bir yalıtım göstermesi,
- Katı yalıtım malzemesi ile uyum sağlayabilmesi,
- Kararlılığının (kimyasal ve elektriksel etkilere karşı gösterdiği direnç) iyi olması,
- Çevreye zarar vermeyecek bir yapısının olması,
- Fiyatının uygun olması.

2.2.1. Mineral yağ

Mineral yağ, transformatör içinde yalıtkan soğutma sıvısı olarak ilk kez 1892 yılında General Electric tarafından kullanılmıştır. Mineral yağın yüksek parlama noktasına ve geniş bir üretim ağına sahip olması, o dönemlerde yaygın kullanımının ana nedeniydi. Günümüzde de petrol kökenli madeni yalıtım yağları, yapı malzemesiyle iyi uyum sağlamaları, iyi elektriksel özelliklere sahip olmaları, yaşlanma davranışları, düşük viskoziteleri ve diğerlerinden ucuz olmalarından dolayı, özellikle güç transformatörleri için hala önemli yerlerini korumaktadırlar. Ancak mineral yağın herhangi bir kaza sonrasında doğaya saçılması durumunda, doğada kaybolma yeteneği zayıftır. Toprağa ve suya karışarak çevreyi olumsuz yönde etkileyebilir [16, 21]. Mineral yağ ile ilgili temel özellikler, diğer yalıtkanların özellikleri ile birlikte, Tablo 2.1'de verilmiştir.

2.2.2. Silikon yağ

Silikon bazlı sıvı yalıtkanlar 1970'li yılların sonralarında transformatör imalatçıları tarafından kullanılmaya başlanmıştır. Genel olarak yüksek sıcaklıklı ve yangın güvenliği açısından daha hassas uygulamalarda kullanılırlar. Silikon yağların doğada kaybolma özelliği yok denecek kadar azdır ve bu nedenle çevresel hassasiyetin yüksek olduğu bölgelerde kullanımı sınırlıdır. Silikon yağın viskositesi mineral yağa oranla daha yüksektir. Yüksek gerilim transformatörlerinde kullanılmamaktadır.

2.2.3. Esterler

Ester sözcüğü, kimyasal bağlantı düzenindeki alkol ve yağ asidinin oluşturduğu yapıdan gelmektedir. Esterler, asit ve alkolün organik bileşiklerinden oluşturulurlar. Genel olarak naturel (doğal) ve sentetik olmak üzere iki tür ester bulunur.

Doğal ester, yenilenebilir mahsullerden çıkarılan bitkisel yağların işlenmesi ile elde edilmektedir. Doğal ester sıvılar birçok bitkiden elde edilebilmelerine rağmen transformatör yağı olarak kullanılacak olanlar genellikle soya, kolza (kanola) ve ayçiçeği yağından üretilmektedirler. Esterler, çevresel duyarlılığın artması ile birlikte ilk olarak 1990'lı yıllarda geliştirilmeye başlanmış ve ticari olarak 1999'da kullanıma sunulmuşlardır. Esterlerin temel özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Sentetik esterler, birden fazla alkol grubu içeren ve kimyasallardan elde edilen ürünlerdir. Sentetik ester, ilk olarak mineral yağ kullanılarak üretilmiş dağıtım transformatörlerinin yağlarının boşaltılıp, sentetik ester ile doldurulması şeklinde kullanılmıştır. Sentetik esterlerin oksidasyon ve termal kararlılıklarının yüksek olması, yangın güvenliğinin ve çevresel endişelerin kritik olduğu uygulamalarda güç transformatörlerinde de tercih sebebi olmalarını sağlamaktadır [22].

Tablo 2.1. Yalıtkan sıvıların temel özellikleri

Özellikler	Birim	Mineral Yağ IEC 60296	Silikon Yağ IEC 60836	S. Ester IEC 61099
Yoğunluk (25 °C)	kg/m³	860	960	970
Viskosite(20 °C)	mm²/s	20	60	70
Yanma nok. (ASTM D 92)	°C	150..175	>350	322
Akma nok. (ASTM D 97)	°C	-40	-55	-50
Delinme Ger. 2,5 mm (IEC 60156)	kV	>70	50	>75
Bağ. dielektrik sabiti (εr)		2,2	2,7	3,0
Die.Kay.Fak. (δ, 90°C, 50 Hz)		<0,002	<0,001	<0,006
Su tutma (25°C)	ppm	50	200	2800

3. YALITIM TASARIMINA AİT TEMEL TANIMLAR

Yalıtım tasarımı güç transformatörlerinin optimum bir yapıya sahip olabilmesinde önemli rol oynamaktadır. Optimum olarak yapılmış bir yalıtım tasarımı bakır, sac, çelik, yağ, katı yalıtım malzemesi gibi transformatörün maliyetini oluşturan temel pek çok malzemenin miktarına da etki eder. Bunun yanısıra yüksek güçlü transformatörlerde optimum bir yalıtım tasarımı, transformatörün boyutlarının minimize edilmesinin ve transformatörün taşıma sınırlarını aşmamasına da etki etmektedir.

İkinci kısımda da açıklandığı üzere alternatif düzgün alanda sıvı yalıtkanlardaki delinme olayı sıvı yalıtkanın fiziksel ve kimyasal yapısından çok içerdiği parçacıklara bağlıdır. Bu parçacıklar birleşerek, zayıf zincir oluşumuna ve transformatör yağında delinmeye neden olmaktadır. Zayıf zincirlerin oluşumunu engellemek ve yağın yalıtım dayanımını yükseltmek için yağ ortamı, genellikle selüloz bazlı katı yalıtım malzemeleri ile hazırlanan bariyerler kullanılarak küçük yağ kanallarına bölünmektedir.

Güç transformatörlerinde elektrik alan dağılımı kapasitif yapıya sahiptir. Elektrik alan, malzemelerin dielektrik sabitleriyle ters orantılı olarak dağılır. Yağın dielektrik sabiti, yağ ile emprenye edilmiş katı yalıtım malzemesinden daha düşüktür. Bu durumda, sıvı yalıtkan üzerine katı yalıtkana oranla daha yüksek bir elektrik alan düşmektedir. Sıvı yalıtım malzemesinin dayanımının değerlendirilmesi, transformatör içerisinde kullanıldığı bölgeye göre değişebilmektedir. Bu değerlendirme her transformatör üreticisi için değişebilmektedir. Günümüzde transformatör üreticilerinin kullandıkları tasarım eğrileri, üreticilerin deneyimlerine bağlı olarak gelişmiş ve değişmiş olabilir.

Bu kısımda, yapılan tasarımın uygunluğunu belirlenmesi için yapılan elektriksel deneyler, farklı test gerilim seviyelerini ortak tek bir gerilim seviyesine dönüştürmek için kullanılan tasarımın yalıtım seviyesi metodu, katı yalıtım malzemesinin

yüzeyinde ortaya çıkan krepaj olayı, zorlanmaya maruz kalan yağ hacmi yöntemi ile tasarım, elektrik alan analizleri sonrasında elde edilen verilerin değerlendirilmesi için kullanılan birikimli zorlanma hesabı ve katı yalıtım malzemesinin transformatör içindeki fonksiyonu konuları açıklanacaktır

3.1. Transformatör Deneyleri

Güç transformatörleri, işletmede sürekli olarak işletme gerilimine seyrek olarak da aşırı gerilimlere maruz kalır. Aşırı gerilimleri, kabaca yıldırım darbe gerilimi, anahtarlama darbe gerilimi ve geçici aşırı gerilimler olarak ayrılabilir. Çeşitli gerilim sınıflarına sahip transformatörlere ait test gerilim seviyeleri ilgili standartlarda tanımlanmıştır. Standartlarda yıldırım darbe gerilimi, anahtarlama darbe gerilimi kısa süreli alternatif gerilim dayanım testi ve uzun süreli alternatif gerilim dayanım testi olmak üzere dört temel deney bulunmaktadır. Sözü edilen deneylerden ilk üçü, yalıtımın aşırı gerilimlere karşı dayanımını test etmek için yapılırken; dördüncüsü normal çalışma durumundaki zorlanma karşısında yalıtım sisteminin davranışını incelemek için yapılır. Güç transformatörleri içindeki farklı elektrot konfigürasyonlarına ait yalıtım tasarımı, bahsedilen test gerilimlerinden bir ya da birkaçı kullanılarak yapılır.

Transformatör içerisinde elektriksel zorlanmaya maruz kalan katı ve sıvı yalıtım malzemelerinde iki tip hata (arıza) görülür. Bunlardan ilki iki elektrot arasında atlama ya da krepaj nedeniyle oluşan ve tam delinme ile sonuçlanan hatalardır. İkinci önemli hata ise yağ içerisinde çeşitli bölgelerde meydana gelen kısmi boşalmalardır. Transformatör içerisinde meydana gelen kısmi deşarjlar, katı yalıtım malzemesi, bariyer gibi davranarak boşalmanın yayılmasını önlediğinden çoğu zaman belirlenememektedir. Kısmi deşarjın transformatör içerisindeki etkisi çok yavaş bir şekilde gelişir ancak önemli sonuçlara yol açar. Transformatör için kısmi deşarj ölçümü, amaca uygun enstrümanların bulunmamasından dolayı belirli bir döneme kadar yapılamamıştır. Fakat gelişen teknoloji ile geliştirilen aygıtlar sayesinde kısmi deşarj ölçümü günümüzde transformatör testleri arasındaki yerini almıştır. Günümüzde uluslararası standartlar transformatörlerin gerilim seviyelerine bağlı olarak izin verilen kısmi deşarj seviyelerini tanımlamıştır. Fakat bazı üreticiler standartlarda verilen değerlerinde altında kabuller yaparak transformatörlerin uzun

dönem güvenilirliğini arttırmak istemektedir. Düşük bir kısmi deşarj seviyesi elde etmek için transformatör içerisindeki farklı elektrot biçimlerindeki keskin köşelerin yuvarlatılması veya elektrostatik olarak ekranlanması gerekmektedir. Buna ek olarak, hava kabarcığı oluşturarak kısmi deşarj seviyesinin artmasına neden olan yabancı maddelerin üretim aşamasında en aza indirilmesi ve emprenye işleminin mükemmele yakın yapılması gerekmektedir. Kısmi deşarj ölçümünün yapıldığı laboratuar şartlarının (gürültü seviyesi v.b.), bu ölçümü hatasız yapmak için elverişli olması önemli parametrelerden birisidir. Aslında tasarım mühendislerinin amacı kısmi deşarjsız transformatör üretebilmektir. Fakat bu durum pratikte imkansızdır. Transformatör içinde kısmi deşarj oluşumu kaçınılmazdır. Bu durumda, kısmi deşarj seviyesini en aza düşürmek olmalıdır. Kısmi deşarj genellikle pico-coulomb ya da mikro-volt olarak ölçülmektedir [7,24].

3.2. Tasarım Yalıtım Düzeyi (TYD)

İlk kısımda anlatıldığı üzere transformatör yağında delinme işleminin başlayabilmesi için yeterli belirli koşulların oluşması gerekmektedir. Transformatör içerisindeki herhangi iki elektrot konfigürasyonu arasındaki yalıtım malzemesinde delinme meydana gelmesi, uygulanan gerilimin tepe değeri ile birlikte gerilimin uygulanma süresine de bağlıdır. Örnek vermek gerekirse transformatörün test edilmesi aşamasında uygulanan bir dakikalık alternatif gerilim dayanım gerilimi ile 1.2 mikro saniyelik yıldırım darbe gerilimi, yalıtım sistemini gerilimlerin tepe değerleri oranında zorlamaz. Bu nedenle önceki kısımlarda kabaca açıklanan transformatör testlerindeki zamana bağlı olarak değişen farklı dalga şekilleri arasında karşılaştırma yapılabilmesi ve kritik seviyenin belirlenmesi için bu dalga şekilleri bir dakikalık alternatif gerilim test eşdeğer gerilim seviyesine çevrilir. Uygulanacak olan test geriliminin bir dakikalık alternatif gerilim test gerilimindeki eşdeğeri, test geriliminin bir dönüştürme sabitine bölünmesi ile bulunmaktadır.

$$\Delta V_{AC(test)} = \frac{\Delta V_{(test)}}{k} \tag{3.1}$$

$\Delta V_{AC(test)}$: Uygulanan test geriliminin bir dakikalık eşdeğer alternatif gerilim seviyesi

$\Delta V_{(test)}$: Uygulanan test geriliminin değeri

k: Dönüştürme sabiti

Tasarım Yalıtım Düzeyi (Design Insulation Level-DIL) ise transformatöre uygulanacak olan test gerilimlerinin, bir dakikalık alternatif test gerilimine gönüştürülmesi sonrasında en yüksek değere sahip olan test gerilim seviyesidir.

$$TYD= \max(\Delta V_{(AC\text{-}Yıldırım\ d.)}, \Delta V_{(AC\text{-}kesikli\ d.)}, \Delta V_{(AC\text{-}Anahtarlama\ d.)} \cdots) \quad (3.2)$$

Bu şekilde, transformatör içerisindeki tüm bölgelerde farklı test gerilimlerinin bir dakikalık AC eşdeğer gerilimine dönüştürülmesi sonrasında elde edilen (bu değerlerden maksimum olanı) sadece bir TYD elde edilir. Bu yöntem transformatör tasarımcıları tarafından genel olarak kabul görmüş bir yöntemdir ve tasarım işlemini önemli ölçüde kolaylaştırmaktadır.

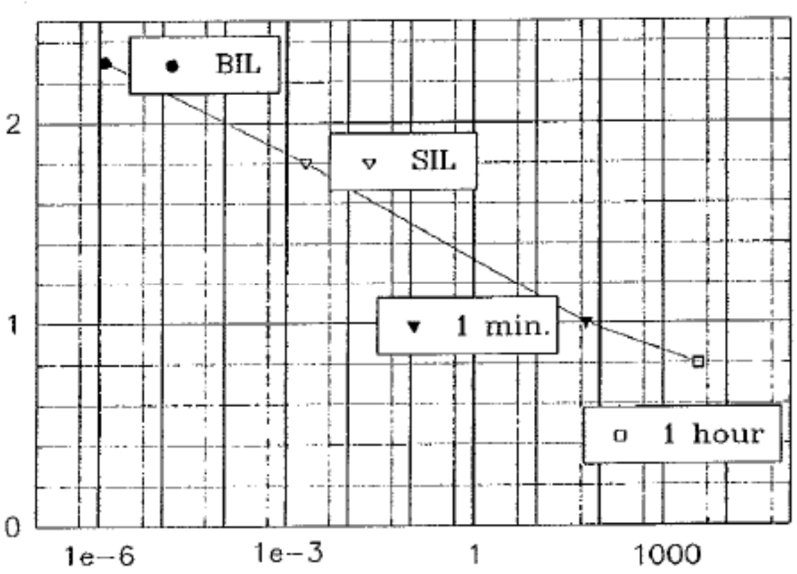
Transformatör üreticileri tarafından kullanılan dönüştürme oranları farklılıklar içerebilmektedir. Bu oranlar, üreticilerin tecrübelerine bağlı olarak kendi kendilerine belirledikleri emniyet katsayılarına bağlı olarak değişir. Fakat yine de bu değişimin olabileceği alan sınırlıdır. Denklem (3.3)'de dönüştürme oranı hesabı görülmektedir.

$$V_t=(1/t)^{0,055} V_1 \quad (3.3)$$

Burada, V_t ve V_1 sırasıyla t dakika ve bir dakika için %50 delinme olasılığına karşı düşen gerilimlerdir. Örneğin, uzun süreli alternatif gerilim dayanım testi (bir saatlik) için değerler yerine konulduğunda $V_{60} / V_1 = 0,8$ olduğu görülebilir. Endüstride genel olarak yıldırım darbe gerilimi için kullanılan oran 2,3 ile 2,5 arasındadır. İlgili test gerilimleri için dönüştürme faktörleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Bir dakikalık AC eşdeğer seviyesine dönüştürme faktörleri

Test Gerilimi	**Dönüştürme sabiti (k)**
Yıldırım Darbe Gerilimi	2,3 – 2,5
Anahtarlama Darbesi	1,8 – 1,9
Uzun süreli alternatif gerilim dayanım	0,8



Şekil 3.1. Tasarımın yalıtım düzeyi faktörleri

Şekil 3.1'de farklı test gerilim seviyelerinin bir dakikalık AC eşdeğer gerilim seviyesine dönüştürme oranları grafik üzerinde gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Karşılaştırma için yıldırım darbe gerilimi / AC test gerilimi oranları

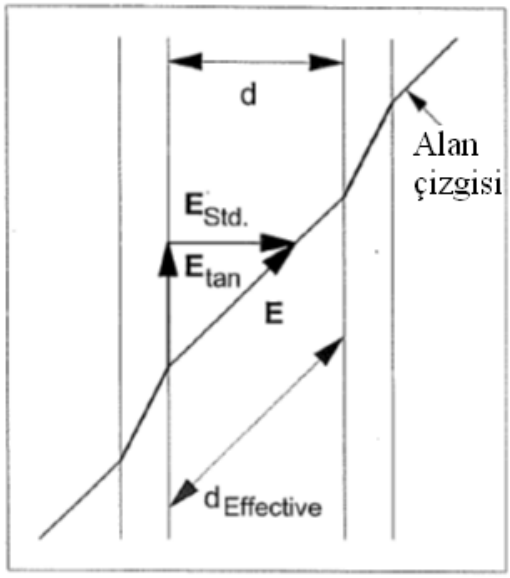
Gerilim Sınıfı	**Y.Darbe Gerilimi (kVp)**	**AC test gerilimi seviyesi (kVrms)**	**D. Gerilimi / AC test gerilimi oranı**
132	550	230	2,39
220	950	395	2,40
400	1300	570	2,28

Tablo 3.2'de çeşitli gerilim seviyelerindeki transformatörler için standartlarda verilen ve genel olarak kullanılan yıldırım darbe ve AC dayanım testi gerilim seviyeleri ve bunların birbirlerine oranları görülmektedir. Tablodan görülebileceği gibi bu oran, yukarıda bahsedildiği üzere 2,3 ile 2,5 arasında değişmektedir [7,25].

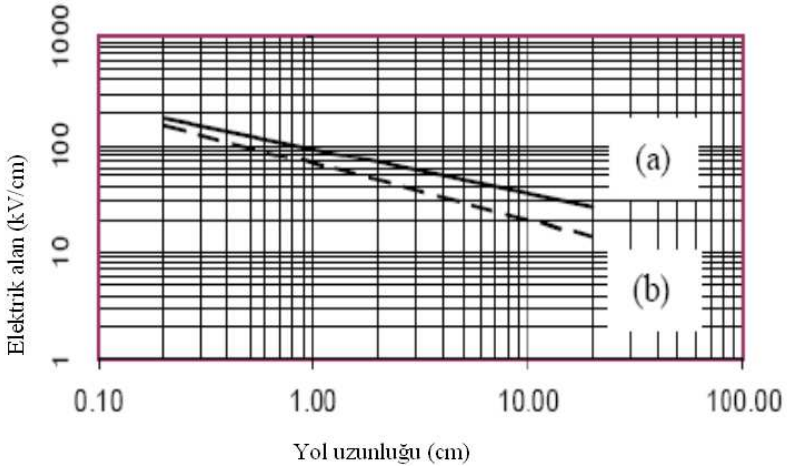
3.3. Açıklık Kavramı

Katı yalıtım malzemesi, transformatör içerisinde sargı yalıtımında, diskler arasında, katlar arasında, yüksek gerilim ve alçak gerilim sargıları arasında, sargılar ve toprak arasında v.b. pek çok yerde kullanılmaktadır. Transformatör yalıtım sisteminde yağda meydana gelen delinmenin yanı sıra seyrek olarak katı yalıtım malzemesi

yüzeyinde meydana gelen kısmi ya da tam boşalma, yüzeysel atlama ya da kısaca açıklık kavramı (krepaj) olayı olarak adlandırılır. Katı yalıtım malzemesinin delinme dayanım seviyesi krepaj dayanımından oldukça yüksektir. Şekil 3.2'de katı yalıtım malzemesine açılı olarak etkiyen elektrik alanın dik ve yatay bileşenleri görülmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi krepaj oluşumuna neden olan elektrik alan çizgisinin teğetsel (E_{tan}) bileşenidir. Yatay bileşenin değeri limit değerlerin üzerinde olduğunda katı yalıtım malzemesi yüzeyinde yüzeysel atlama oluşur. Malzemenin krepaj dayanımı, elektrik alan çizgilerinin yalıtım malzemesinin yüzeyine dik gelmesinin sağlanmasıyla maksimum değerine ulaşabilir. Fakat sargı yapılarının ve bağlantıların karmaşık olabilen geometrik yapıları ve yalıtım malzemelerinin üretimindeki kısıtlar nedeni ile alan çizgilerinin her zaman yalıtım malzemesinin yüzeyine dik gelmesi sağlanamayabilir.



Şekil 3.2. Katı yalıtım malzemesine etkiyen alan çizgisinin dik ve yatay bileşenleri



Şekil 3.3. Krepaj dayanım eğrisi, (a) yağ kanalı ve (b) katı/sıvı arayüzeyindeki dayanım

Kat/sıvı yalıtım malzemelerinin ara yüzeyinde meydana gelen krepaj olayı güç transformatörlerinin tasarımında kritik öneme sahiptir. Endüstride yıllardır kabul görmüş uygulamaya göre katı/sıvı ara yüzeyindeki krepaj dayanımı yağ kanalının delinme dayanımından daha düşüktür. Şekil 3.3'te yağ kanalı (a) ve katı/sıvı ara yüzeyindeki krepaj dayanımı (b) eğrileri görülmektedir. Ancak, son yıllarda verilen çalışma sonuçlarında, katı/sıvı ara yüzeyindeki krepaj dayanımının yağın yalıtım dayanımıyla eşdeğer olduğu öne sürülmüştür [7,26,27].

3.4. Zorlanmaya Maruz Kalan Yağ Hacmi Kriteri ile Tasarım

İstatistiksel olarak zorlanmaya maruz kalan yağ hacmi veya elektrot yüzey alanı arttıkça yalıtım yağının elektriksel dayanımı düşmektedir. Zorlanmaya maruz kalan yağ hacmine bağlı olarak belirlenen dayanım, endüstride kabul görmüş yöntemlerden biridir. Yalıtım sıvısının delinme dayanımı ile zorlanmaya maruz kalan yağ hacmi arasındaki bağıntı genellikle farklı elektrot yapıları kullanılarak yapılan çok sayıda deneysel veriden elde edilir. Düz bir yağ kanalının yalıtım dayanımı, zorlanmaya maruz kalan yağ hacmine göre belirlenmesinde (alternatif gerilim dayanım testi için) Denklem (3.4) kullanılabilir;

$$E=17{,}9(\text{Zorlanmaya maruz kalan yağ hacmi})^{-0{,}137}\ \text{kVrms/mm} \qquad (3.4)$$

Bu ifade zorlanmaya maruz kalan yağ hacminin birimi cm³'tür. Bu ifadedeki katsayılar, üreticilerin tecrübelerine bağlı olarak farklılıklar gösterebilir. Alternatif

gerilim dayanım testi için % 50 delinme olasılığına göre bir başka ifade de aşağıdaki gibidir;

$$E=11,5(\text{Zorlanmaya maruz kalan yağ hacmi})^{(-\frac{1}{9,5})}+2,5 \text{ kVrms/mm} \quad (3.5)$$

Bu ifadede de zorlanmaya maruz kalan yağ hacminin birimi cm³'tür. Tasarımda, hesaplanan zorlanma değerinin, üreticinin tecrübelerine bağlı olarak değişen güvenlik marjları da eklendiğinde sonucun, E değerinden düşük olması gerekir. Denklem(3.4) ve Denklem (3.5) bize yağın yalıtım dayanımının zorlanmaya maruz kalan yağ hacmi arttıkça azaldığını göstermektedir [7,8].

3.5. Birikimli Zorlanma (Kümülatif Stres) Hesabı

Yalıtım tasarımında, yağın yalıtım dayanımının zorlanmaya maruz kalan yağ hacmine göre belirlenebilmesinin yanı sıra birikimli zorlanma hesabına dayalı olarakda belirlenebilir. Bu yöntem endüstride sıklıkla kullanılan ve en çok kabul görmüş yöntemdir. Yöntemle krepaj dayanımı ve yağın yalıtım dayanımı belirlenebilmektedir.

Krepaj dayanımının belirlenebilmesi için katı/sıvı ara yüzeyindeki zorlanmanın birikimli olarak belirlenmesi gerekmektedir. Sadece iki farklı elektrottan oluşan bir sistemde birikimli zorlanma hesabının yapılması kolaydır. Çünkü maksimum stres genellikle elektrotların biri üzerindedir ve diğer elektroda doğru azalmaktadır. Buna göre, birikimli zorlanma, elektrotlar arasındaki potansiyel farkının mesafeye bölünmesiyle bulunur ve iki elektrot arasında her noktada aynıdır. Fakat iki elektrottan daha fazla potansiyel içeren karışık elektrot yapılarında (katı/sıvı ara yüzeyinde) maksimum stres, maksimum potansiyelin olduğu yerden başlamayabilir. Bu nedenle katı/sıvı ara yüzeyindeki krepaj zorlanması aşağıda belirtilen şekilde hesaplanır [28].

Birikimli zorlanma hesabı yapılırken;

(1) İnceleme yapılacak yol seçilir (krepaj yolu ya da yağ hacmi)
(2) Yol üzerindeki maksimum zorlanmanın olduğu yer bulunur

(3) Maksimum stresin olduğu nokta bulunduktan sonra bu noktanın hangi tarafına gidildiğinde stresin daha büyük olduğu belirlenir ve bu yöne doğru yol bir adım genişletilir (belirlenen sabit mesafeler içerisinde).

(4) Üçüncü adımda yapılan işlem sonrasında yeni mesafeler için araştırılan yolun her iki tarafında birikimli zorlanma değeri (uygulamanın yapıldığı mesafeler arasındaki potansiyel farkı) araştırılır.

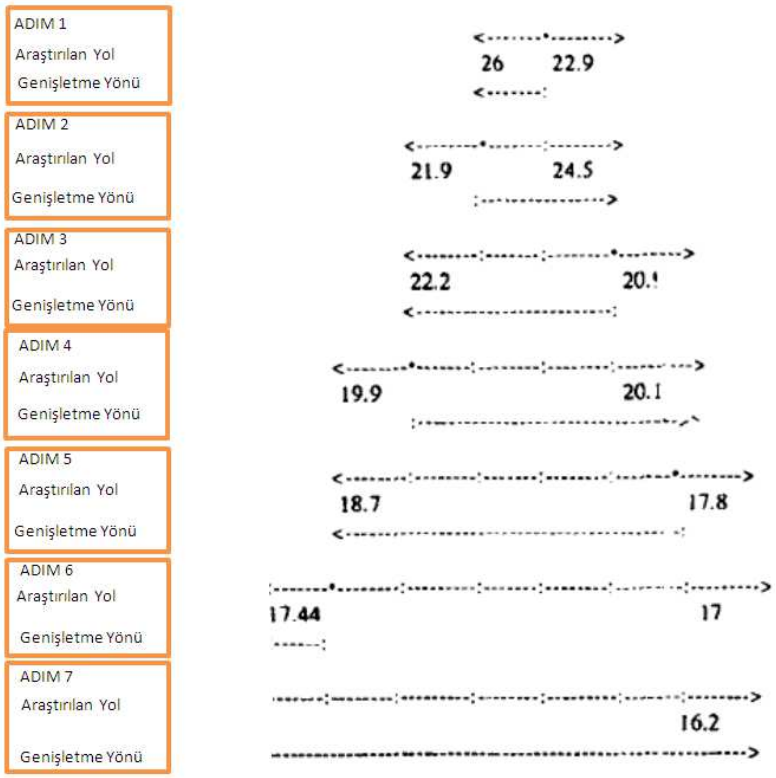
(5) Dördüncü maddede anlatılan işleme, tüm yol boyunca devam ettirilir.

Aşağıdaki kısımda örnek bir uygulama verilmiştir,

Tablo 3.3'te bir yol boyunca değişen gerilimler verilmiştir. Şekil 3.4'te ise genişleme yönleri gösterilmiştir.

Tablo 3.3. Örnek bir yol boyunca değişen gerilimler

Pozisyon (cm)	1	3	5	7	9	11	13	15
Gerilim(kV)	10,5	33,1	59,3	94,7	146,7	192,5	219,8	237

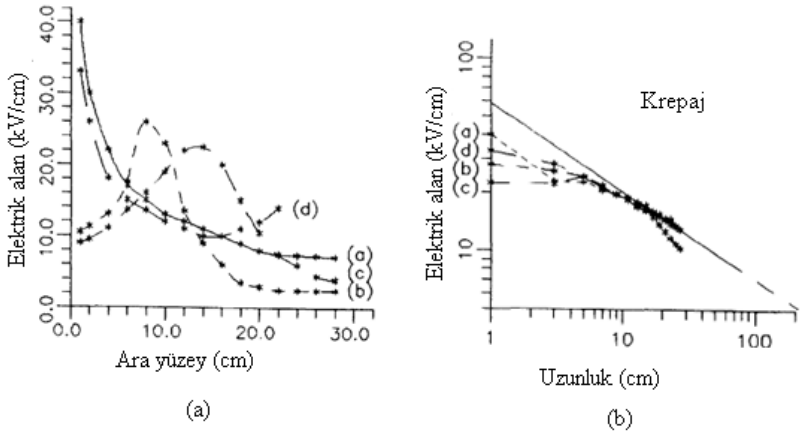


Şekil 3.4. Birikimli zorlanma hesaplamasının diagram ile gösterimi

Tablo 3.4. Verilen örnek yol için birikimli zorlanma hesabı

Yol boyu (mm)	**Kümülatif Stres Hesabı**		
	+ x yönü	**-x yönü**	**Genişleme yönü**
2	$\frac{192,5-146,7}{2}=22,9$	$\frac{146,7-94,7}{2}=26$	-x yönü
4	$\frac{192,5-94,7}{4}=24,5$	$\frac{146,7-59,3}{4}=21,9$	+x yönü
6	$\frac{219,8-94,7}{6}=20,9$	$\frac{192,5-59,3}{6}=22,2$	-x yönü
8	$\frac{219,8-59,3}{8}=20,1$	$\frac{192,5-33,1}{8}=19,9$	+x yönü
10	$\frac{237-59,3}{10}=17,8$	$\frac{219,8-33,1}{10}=18,7$	-x yönü
12	$\frac{237-33,1}{12}=17$	$\frac{219,8-10,5}{12}=17,44$	-x yönü

Şekil 3.5'te gösterilmiş a,b,c,d eğrileri katı/sıvı arayüzeyinde yüzeyde gerçekleşen mevcut zorlanma değerleri (a) grafiğinde gösterilmiştir. Şekil 3.5 (b) de ise birikimli zorlanma hesabı kullanılarak a,b,c,d grafiklerindeki mevcut zorlanma eğrileri kümülatif eğrilere dönüştürülmüştür.



Şekil 3.5. (a) Katı/sıvı arayüzeylerindeki (a,b,c,d) mevcut zorlanmalar, (b) Mevcut zorlanma değerlerinin (a,b,c,d) kümülatif eğrilere dönüştürülmesi

Hesaplanan kümülatif krepaj değerlerinin ilgili mesafe için dayanımını (alternatif gerilim dayanım testi) belirlemek üzere Denklem (3.6) kullanılabilir,

$$E=15d_2^{-0,37}\text{kVrms/mm} \quad (3.6)$$

Denklem (3.6) da d_2 krepaj yolunun uzunluğudur. Bu eşitlik, gaz içermeyen yağ ve temiz yüzeye sahip yüksek kalitede katı yalıtım malzemesi için geçerlidir. Malzeme ve üretim kalitesine bağlı olarak tecrübeler ile elde edilmiş emniyet katsayıları eklenerek hesaplanan krepaj değerinin, Denklem (3.6) da elde edilenden daha düşük olması gerekir.

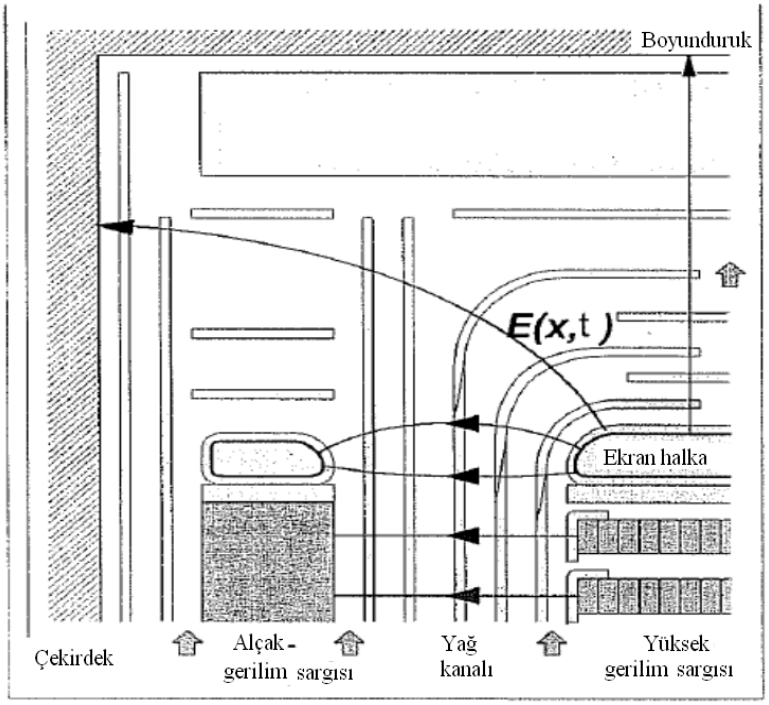
Krepaj dayanımı genellikle yağ kanalı dayanımından %30 daha düşüktür. Hesaplanan yağ kanalı zorlanması değerlerinin ilgili mesafe için dayanımını (alternatif gerilim dayanım testi) belirlemek için Denklem (3.7) kullanılabilir,

$$E=18d_1^{-0,38}\text{kVrms/mm} \quad (3.7)$$

Denklem (3.7)'deki d_1, mm olarak kaplanmış elektrotlar arasındaki yağ kanalı genişliğidir. Bu eşitlik gaz içermeyen yağ için geçerlidir [7,28].

3.6. Katı Yalıtım Malzemesinin Transformatör İçerisindeki Fonksiyonu

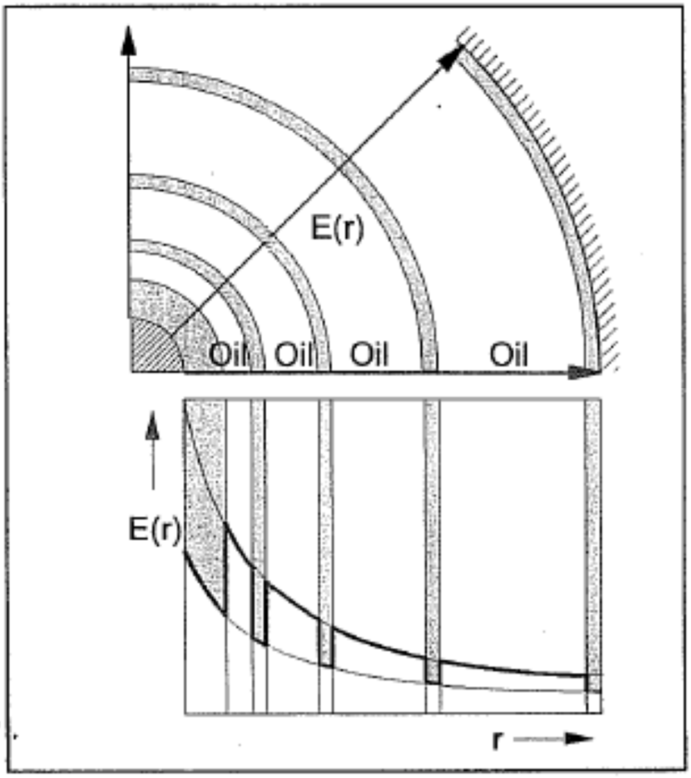
Katı yalıtım malzemesi, yüksek derecede zorlanmaya maruz kalan yağ hacmini Şekil 3.6'daki gibi ufak yağ kanallarına bölmek için kullanılır. Böylece şekilde yağın yalıtım dayanımı artar. Yağ kanalının maksimum dayanıma sahip olması için yerleştirilen bariyerlerin, olabildiğince elektrik alan çizgilerine dik olması gerekir. Fakat transformatör içerisindeki farklı geometrik yapılar nedeni ile bu durumu sağlamak zordur. Bu bağlamda, tüm yalıtım sisteminin performansı, aslında bariyer sisteminin optimum tasarımına bağlıdır. Bariyer olarak kullanılan selüloz bazlı malzeme yüksek güçlü transformatörlerde genellikle presbordtur.



Şekil 3.6. Bariyer sistemi ve YG sargısının üst bölgesindeki zorlanmalar

Katı yalıtım malzemesi transformatör içerisinde aşağıdaki amaçlar için kullanılır:

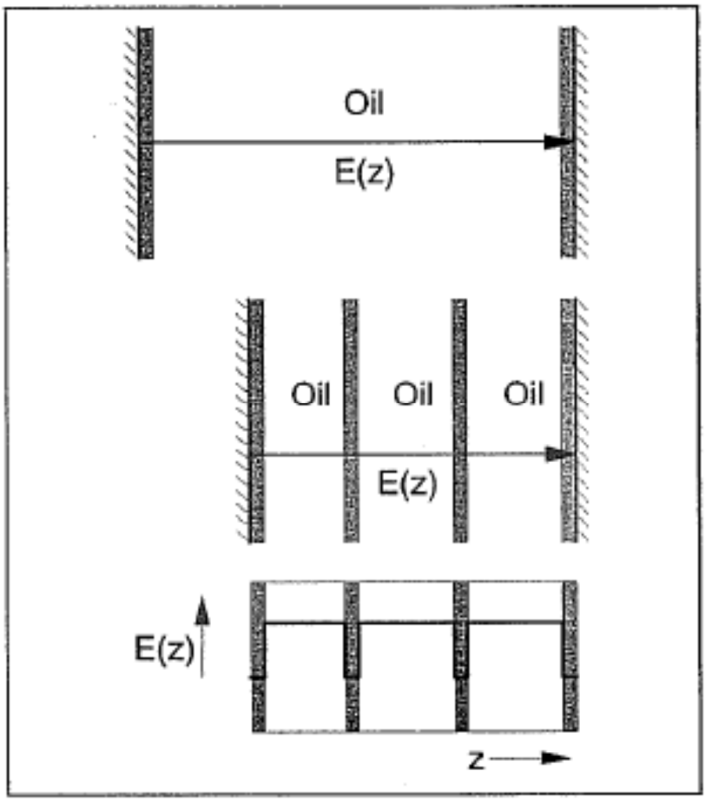
Çıplak metal yüzeyler katı yalıtım malzemesi ile malzeme içinde ya da elektrot yüzeyinde herhangi bir boşluk kalmayacak şekilde kaplanır. Bunun nedeni özellikle Şekil 3.7 incelendiğinde görülebilir. Elektrot yüzeyi katı yalıtım malzemesi ile kaplandığında, katı ve sıvı yalıtım malzemeleri dielektrik katsayıları arasındaki oran nedeni ile çıplak elektrot yüzeyinde başlangıçta oluşacak yüksek zorlanma yarı oranda ($\varepsilon_{presbord}/\varepsilon_{yağ}\approx 0,5$) katı yalıtım malzemesi üzerine düşer. Yağa oranla daha yüksek yalıtım dayanımına sahip, yağ ile emprenye edilmiş katı yalıtım malzemesi bu yüksek elektriksel zorlanmayı üzerine çekerek yağda herhangi bir kısmi deşarj oluşumunun önüne geçer. Elektrot yüzeyine kaplanan katı yalıtım malzemesinin içerisinde herhangi bir boşluk kalması, katı yalıtım malzemesinde kısmi deşarj başlamasına, malzemenin ve hatta sistemin delinmesine yol açabilmektedir. Bu gibi sistemlerde (örneğin sargı çıkış düzenekleri) katı yalıtım malzemesi ile kaplanan yüzeyin X-RAY ile kontrolü gerekir ve malzeme içerisindeki boşlukların kabul edilebilir seviyelerde (mikron mertebelerinde) olması istenir.



Şekil 3.7. Düzgün olmayan alanda bariyerli sistem (örneğin sargı çıkış düzeneği)

Geniş yağ kanallarının yalıtım dayanımı, daha ufak yağ kanallarına bölünerek arttırılabilir. Böylece, herhangi bir bariyer ile bölünmemiş Şekil 3.8'deki gibi geniş bir yağ kanalının genişliği büyük oranda düşürülebilir. Bu transformatör içerisinde kullanılacak malzemelerin miktarında önemli bir düşüş sağlar.

Geniş yağ kanallarının daha küçük yağ kanallarına bölünmesi sonrasında geniş yağ kanalına ait yüksek delinme olasılığı, dar yağ kanalının sahip olduğu daha düşük delinme olasılığına düşer. Böylece tüm sisteme ait delinme olasılığı da düşmüş olur.



Şekil 3.8. Düzgün alanda bariyerli sistem ile toplam hacminin düşürülmesi (örneğin sargılar arasındaki ana yalıtım)

Bariyer kalınlıklarının olabildiğince düşük olması gerekir. Uygulanacakları yere göre değişebilmekle birlikte, genellikle 2-5mm civarında kalınlıkta kullanılırlar. Kalınlığın belirlenmesinde önemli iki parametrenin; bariyerin transformatör içinde oluşabilecek kuvvetlere karşı mukavemet sağlayabilecek kadar kalın, herhangi bir emprenye sorunu oluşmaması ve daha geniş yağ kanalı sağlayabilmesi için olabildiğince ince olması olduğu söylenebilir. Yani bu iki parametreye göre optimum bir kalınlığa sahip olmalıdır. Önemli bir diğer nokta ise bariyerlerin geometrik toleranslarının, yağ kanallarının yalıtım dayanımını etkilemeyecek değerler arasında olmasıdır. Bu durum özellikle dar yağ kanaları için (örneğin Şekil 3.6'da YG potansiyeli yanındaki ilk yağ kanalı) önemlidir. Aradaki mesafenin, yalıtım dayanımı sağlayacak kadar dar, yağ akışını engellemeyecek kadar geniş olması gerekir. Ayrıca, kullanılan yalıtım malzemelerinin tasarım ve üretim kalitesi, yalıtım sisteminin iyi performans sağlamasında önemli bir etkendir.

Bariyerlerin önemli diğer fonksiyonu ise isminden de anlaşılabileceği gibi daha ufak parçalara bölünen yağ kanallarında meydana gelebilecek yayılma aşamasındaki

kısmi boşalmaları engellemesidir. Fakat şunu eklemek gerekir ki, bariyerlerin asıl amacı yayılma aşamasındaki bir kısmi deşarjı durdurmak değil, kısmi deşarj oluşumunu engellemektir [28].

4. YALITIM TASARIMI VE UYGULAMALARI

Genel tasarım kuralları, yalıtım sisteminde kullanılan yağının dayanımına göre belirlenir. Bu nedenle yalıtım sisteminin dayanımını arttırmak için yağın yalıtım dayanımını arttırmak gerekir. Geniş yağ kanallarının yalıtım dayanımı, yağ kanalını bariyerler aracılığı ile daha küçük yağ kanallarına bölerek arttırılabilir. Bu şekilde ikinci kısımda da anlatıldığı üzere, yağın/sistemin dayanımı istatistiksel olarak artar. Bu işlemi yapabilmek için ilk olarak elektriksel zorlanmaya maruz kalan katı-sıvı yalıtım yüzeylerinin elektrik alan analizlerinin titizlikle yapılması gerekir.

Şekil 3.6'da gösterilen bölgelerdeki kritik yollar boyunca elektrik alan değerleri sayısal yöntemlerle (örneğin SEY) çözüm yapan programlar aracılığı ile belirlenir. Kritik yol boyunca, sayısal olarak belirlenen elektrik alan değerinin, dayanım eğrilerinin altında kalması gerekir.

Yıldırım darbe, anahtarlama darbe ve alternatif gerilim altında katı yalıtım malzemesi ve transformatör yağı arasındaki elektrik alan dağılımı, malzemelerin dielektrik katsayıları gözönüne alınarak belirlenir. Elektrik alan dağılımı dielektrik katsayıları ile ters orantılı olarak değişeceğinden yağ içinde yaklaşık iki kat daha fazla zorlanma ortaya çıkar.

4.1. İki Sargı Arasında Yalıtım ve Uygulama

Aynı bacak üzerine yerleştirilmiş farklı gerilim seviyelerine sahip silindirik sargılar arasında yalıtım, genellikle katı (selüloz bazlı malzeme) ve sıvı (mineral yağ, silikon yağ, ester..) yalıtım malzemeleri kullanılarak gerçekleştirilir. Selüloz bazlı katı yalıtım malzemeleri ve mineral yağlar pek çok malzemeye oranla daha ucuzdurlar. Birlikte kullanıldıklarında, tek başlarına kullanılmalarından daha yüksek elektriksel dayanıma ulaşırlar.

Sargı sonları dışında, silindirik AG ve YG sargıları arasında elektrik alan dağılımının düzgün (ya da yaklaşık düzgün) olduğu kabul edilir. Bu nedenle kalınlıkları d_1, d_2, .. d_n ve dielektrik sabitleri $\varepsilon_1, \varepsilon_2,..,\varepsilon_n$ olan yağ ve katı yalıtım malzemesinden oluşan

bir sisteme U gerilimi uygulandığında d_1 kalınlığındaki tabaka üzerine düşen elektrik alan değeri Denklem (4.1) ile belirlenebilir,

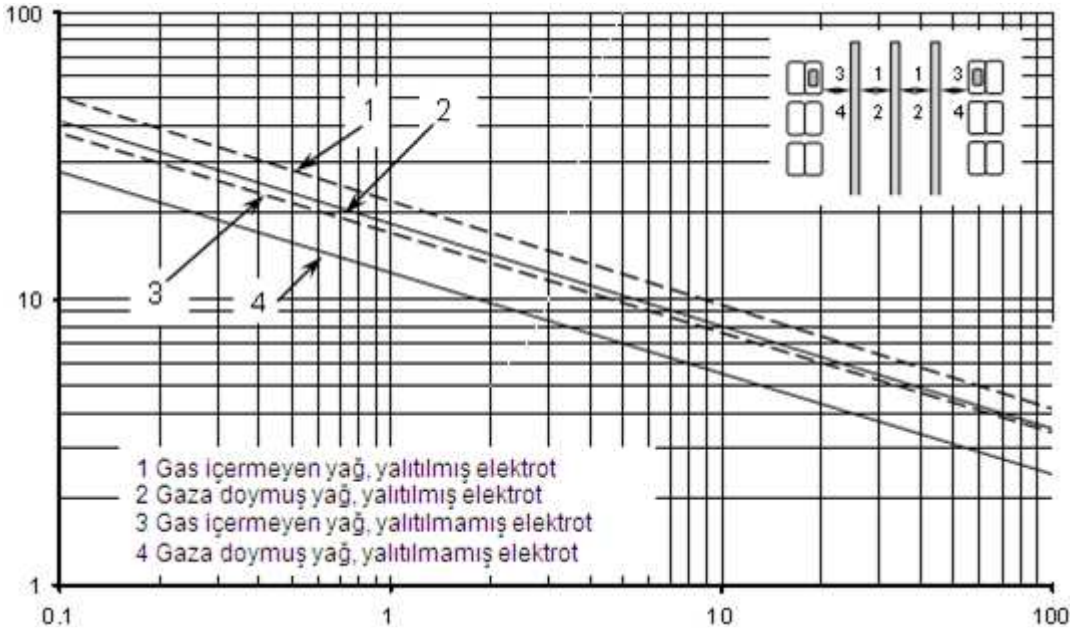
$$E_1 = \frac{V}{\varepsilon_1 \left(\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2} + .. + \frac{d_n}{\varepsilon_n} \right)} \tag{4.1}$$

Diğer tabakalardaki elektrik alan değeri ise aşağıdaki gibi belirlenebilir,

$$E_2 = E_1 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \ldots E_n = E_1 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_n} \tag{4.2}$$

Güç transformatörlerinde elektrik alan dağılımı kapasitif karakterlidir. Katı yalıtım malzemesi ve yağın dielektrik katsayıları arasındaki fark nedeni ile yağda, katı yalıtım malzemesi ile dielektrik katsayıları oranında daha yüksek bir zorlanma meydana gelir. Oluşan bu yüksek zorlanma, başlangıçta ara sıra görülen fakat zaman içinde sıklığı giderek artan kısa süreli düşük yoğunluklu deşarjlara neden olabilir. Bu olay bir süre sonra o yağ kanalında yoğun kısmi deşarjlara ve sonrasında yağ kanalının delinmesiyle sonuçlanabilir. İlk yağ kanalının delinmesiyle birlikte geriye kalan yalıtım sistemine etkiyen zorlanma değeri daha da büyüyerek, diğer yağ kanallarının da delinmesine neden olur. Bu nedenle katı yalıtım malzemesine giderek artan yüksek bir zorlanma etki eder. Katı yalıtım malzemesi tüm yağ kanallarının delinmesi durumunda, oluşan zorlanmayı karşılayabilecek bir değerde/kalınlıkta olmalıdır. Sonuç olarak doğru bir ana yalıtım tasarımı için aşağıda belirtilen iki temel prensip gözönüne alınmalıdır:

- Yağ kanalları için izin verilen dayanım değeri tasarım eğrileri ile verilen değerlerden (Şekil 4.1) düşük olmalıdır.
- İşletme boyunca yalıtım yağının ikinci kısımda bahsedilen nedenlerle dielektrik dayanımının zamanla düşebileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu yüzden katı yalıtım malzemesi, tüm yağ kanallarının delinmesi durumunda bile transformatöre uygulanabilecek herhangi bir gerilimi karşılayabilecek düzeyde tasarlanmalıdır [24].



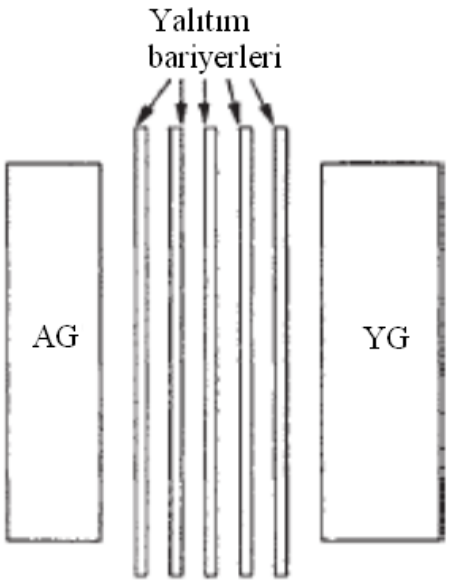
Şekil 4.1. Yağ kanallarının kısmi deşarja başlama değerleri

İlk maddede bahsedilen ve tamamen deneysel sonuçlara dayanarak elde edilmiş tasarım eğrileri aracılığıyla yağın kısmi deşarja başlama dayanımı, iki farklı yağ tipi ve iki farklı konum için (toplam dört farklı durum için) aşağıdaki gibi verilmiştir [11]:

1. Presbord silindirler gibi, katı yalıtım malzemesi arasında kalan gaz içermeyen yağ,
2. Presbord silindirler gibi katı yalıtım malzemesi arasında kalan gaza doymuş yağ,
3. Elektrod yanında gaz içermeyen yağ kanalı
4. Elektrod yanında kalan gaza doymuş yağ kanalı

Yağ ve presbordtan oluşan bir yalıtım sisteminde yüksek kaliteye sahip bir presbordun kabul edilebilir maksimum bir dakikalık alternatif gerilim testi dayanımının 40 kVrms/mm olmasından dolayı, tasarım kısıtı yağ üzerindeki zorlanmaya bağlıdır. Dar bir yağ kanalının dielektrik dayanımı, geniş olana oranla daha yüksek olmasından YG ve AG sargıları arasındaki geniş yağ kanalının bariyerler aracılığı ile çok sayıda ufak yağ kanalına bölünmesi daha uygundur (Şekil 4.2). Bariyerler, yağ içerisinde bulunan yabancı maddelerin AG ve YG sargıları arasında delinmeye neden olacak zayıf zincirler oluşturmasına da engel olarak, deşarj kanallarının genişlemesini engelleyebilirler. Fakat, tekrar vurgulamak gerekirse, herhangi bir yağ kanalında oluşacak delinme diğer yağ kanallarındaki zorlanma

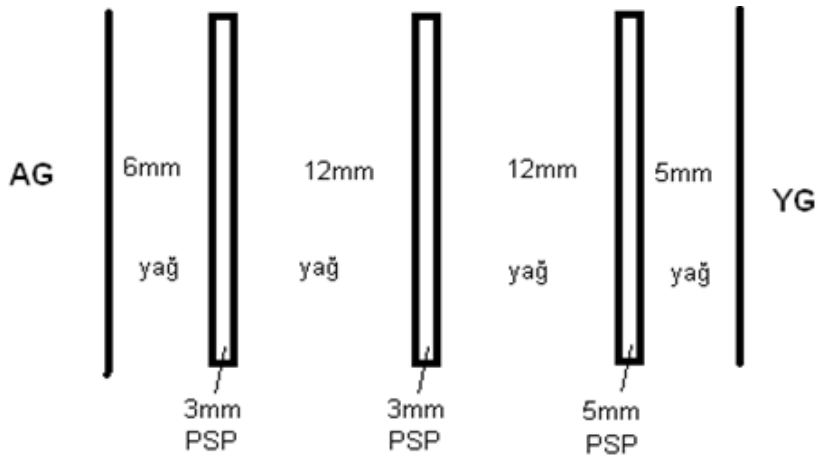
değerini arttırarak, onlarda da delinmeye neden olabileceğinden, katı yalıtım malzemesinin dayanımının, tüm yağ kanallarının delinmesi durumunda oluşacak yüksek zorlanmayı karşılayabilecek düzeyde olması gerekir. Yüksek kaliteye sahip, gaz içermeyen yağ ile oluşturulmuş bir sistemde (AG ve YG sargıları arasındaki bölgede) yalıtılmış iletken için yağın kısmi deşarja başlama değeri, 8 mm lik bir yağ kanalı için 10 kVrms/mm dir. Bu değer, sargı köşelerinde, stresin daha yoğun olmasından dolayı 8 mm lik bir yağ kanalı için 8,4 kVrms/mm alınır. Bu değerler, üreticilerin tecrübeleri ile belirledikleri emniyet katsayılarıyla birlikte kullanılmaktadır [7].



Şekil 4.2. YG ve AG sargıları arasındaki yağ kanalının bölünmesi

Yağ daha yüksek bir zorlanmayı üzerine çekeceğinden dolayı, Şekil 4.2'deki gibi bir sistemde yağ kanallarının olabildiğince geniş bariyerlerin ise olabildiğince ince olması gerekir. Bu paragrafta anlatılmak istenen durum matematiksel olarak aşağıda basit bir örnekle açıklanmıştır,

Örneğin; Um=170 kV, LI=750 kVtepe, AC=325 kVrms olan bir sistemin AG ve YG sargıları arasındaki ana yalıtımının, Şekil 4.3'de görüldüğü şekilde ve aşağıdaki gibi olduğunu varsayalım,



Şekil 4.3. Yalıtım düzeni seçenek-1

Bu sistem için Denklem (4.1) kullanılarak hesap yapılacak olursa yağ üzerindeki zorlanma değeri

$$E_{yağ}=\frac{325}{2{,}2\left(\frac{0{,}6}{2{,}2}+\frac{0{,}3}{4{,}4}+\frac{1{,}2}{2{,}2}+\frac{0{,}3}{4{,}4}+\frac{1{,}2}{2{,}2}+\frac{0{,}5}{4{,}4}\right)}$$

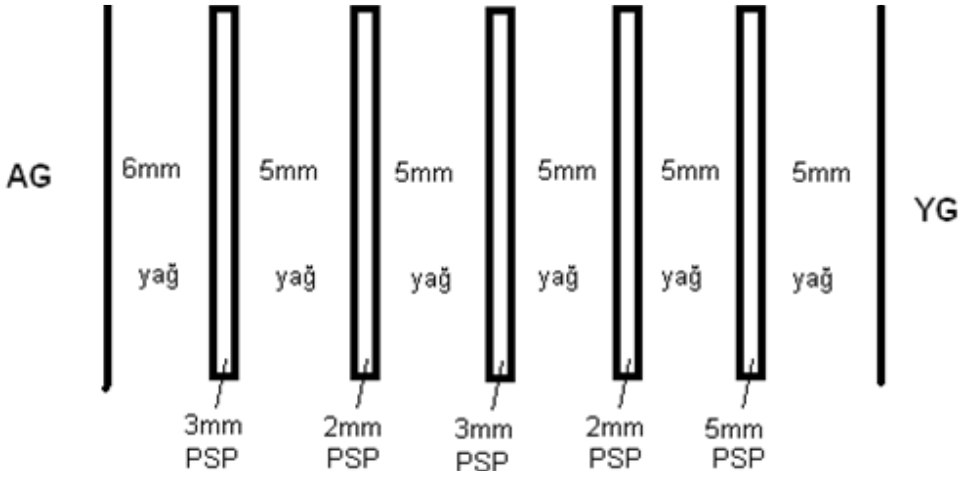
$E_{yağ}$=80,24 kV/cm

olarak elde edilir.

Katı yalıtım malzemesi olarak kullanılacak presbord üzerindeki zorlanma değeri ise yine Denklem (4.1) yardımıyla,

E_{psp}=40,12 kV/cm olarak bulunur.

Fakat, bu sistem yerine AG-YG sargıları arasındaki toplam mesafe değiştirilmeden, daha dar yağ kanallarına ve daha yüksek kalınlıkta PSP ye sahip Şekil 4.4'teki gibi bir sistem kullanılmış olsaydı:



Şekil 4.4. Yalıtım düzeni seçenek-2

$$E_{yağ}=\frac{325}{2{,}2\left(\frac{0{,}6}{2{,}2}+\frac{0{,}3}{4{,}4}+\frac{0{,}5}{2{,}2}+\frac{0{,}2}{4{,}4}+\frac{0{,}5}{2{,}2}+\frac{0{,}3}{4{,}4}+\frac{0{,}5}{2{,}2}+\frac{0{,}2}{4{,}4}+\frac{0{,}5}{2{,}2}+\frac{0{,}5}{4{,}4}+\frac{0{,}5}{2{,}2}\right)}$$

$E_{yağ}$=84,42 kV/cm

PSP üzerindeki zorlanma değeri ise,

E_{psp}=42,2 kV/cm olarak bulunur.

Örnekten de görülebileceği gibi, dar yağ kanallarının daha yüksek yalıtım dayanıma sahip olduğu düşüncesiyle yağ kanallarının olabildiğince daraltılması ya da katı yalıtım malzemesinin dielektrik dayanımının yüksek olmasından dolayı katı yalıtım malzemesinin kalınlığının arttırılması yağın ve PSP'nin daha fazla zorlanmaya maruz kalması ile sonuçanmaktadır. Bu bağlamda, yağ kanalları ve PSP kalınlıklarının belirlenmesinde optimum noktanın bulunması önemlidir. Tekrar vurgulamak gerekirse, ana yalıtım tasarımında yağ kanallarının olabildiğince geniş, bariyerlerin ise olabildiğince ince olması gerekir. Ana yalıtımın temel kuralı olarak toplam bariyer kalınlığının belirlenen gerilim seviyesinde oluşacak zorlanmalara tek başına dayanabilmesi gerekmektedir. Mekanik mukavemetler açısından minimum bariyer kalınlıklarının genellikle 1,5-2 mm arasında bir değerde olması önerilir. Yağ kanalları için ise önerilen en yüksek kalınlık 12 mm'dir. 12 mm üzerindeki kalınlık ana yalıtımda tavsiye edilmemektedir.

220 kV bir transformatör için ana yalıtım tasarımı aşağıda bir örnek ile açıklanmıştır,

Örnek: 220 kV YG gerilim sargısına sahip bir transformatör için standartlarda önerilen alternatif gerilim dayanım testi değeri U=395 kV'tur. Bölümün başında açıklandığı üzere YG ve AG sargıları arasındaki katı yalıtım malzemesinin bu gerilim seviyesine dayanabilmesi gerekmektedir. YG ve AG sargıları arasında kullanılan presbord silindirler, yüksek yoğunluklu (Weidmann-TIV, ENPAY-E3) malzemeden yapılırlar ve genellikle 3 mm'lik kalınlıktadırlar. 3 mm'lik presbord için delinme gerilimi 400 kV/cm'dir. Bu örnek için presbordun transformatör içerisinde müsaade edilen zorlanma değerinin, delinme geriliminin %70'i olduğunu yani 400 kV/cm x %70 = 280 kV/cm olduğunu düşünelim. Burada bahsedilen emniyet katsayısı değeri üretim/işçilik kalitesi, üretimin yapıldığı ortam, malzeme kalitesi gibi pek çok değişkene bağlı olarak değişir ve genellikle tecrübelere bağlı olarak elde edilir.

Yukarıdaki açıklama doğrultusunda kullanılması gerekli toplam PSP silindir kalınlığı AG ve YG sargıları arasındaki alan dağılımının düzgün olduğu kabulü ile,

$$d_{psp} = \frac{U_{AC}}{E_{psp}} = \frac{395}{280} \approx 1{,}5 \text{ cm}$$

olarak bulunmaktadır. Bu aşama sonrasında gerekli yağ kalınlığını hesaplamak gerekir. Yağ kanalı için dayanım eğrileri Şekil 4.1'de verilmişti. Belirlenen ilk yağ kanalının genişliği ne kadar düşük olursa dayanımı da o kadar yüksek olur. Fakat soğutma açısından bakıldığında yağ kanalı genişliğinin, yağ akışının sağlanabilmesi için minimum 6 mm olması gerekmektedir. İlk yağ kanalının olabildiğince düşük olması, yani ilk yağ kanalının dayanımının olabildiğince yüksek olması, AG ve YG sargıları arasındaki toplam mesafeyi de düşürmektedir. Örnek transformatör için ilk yağ kanalı genişliğini 6 mm seçecek olursak Şekil 4.1'deki 3 no'lu dayanım eğrisinden 6 mm'lik yağ kanalının kısmi deşarja başlama geriliminin 93 kV/cm oldunu görebiliriz. Bu değer için %85'lik bir emniyet faktörü koyacak olursak 93 kV/cm x %85 ≈ 80 kV/cm olarak düşünebiliriz. Böylece,

$$d_{yağ} = \frac{U_{AC}}{E_{yağ}} - d_{psp} \frac{\varepsilon_{yağ}}{\varepsilon_{psp}} \qquad (4.3)$$

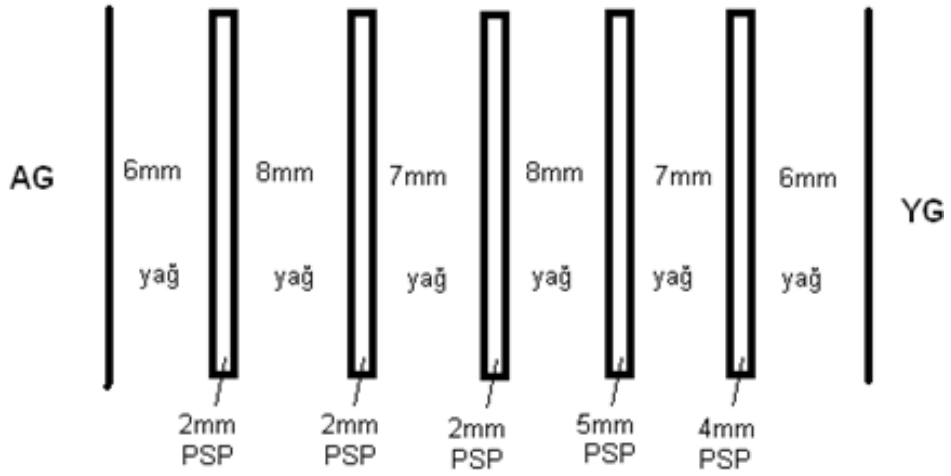
Denklem (4.3) yardımıyla [24],

$$d_{yağ}=\frac{395}{80}-1{,}5\frac{2{,}2}{4{,}4}\approx 4{,}2\text{cm}$$

toplam yağ genişliği elde edilir. Böylece AG ve YG sargıları arasındaki toplam genişliğin,

1,5 + 4,2 =5,7 cm =57 mm olması gerektiği sonucuna ulaşabiliriz.

Örnek transformatör için yağ kanalı genişlikleri ve PSP kalınlıkları; yalıtım, soğutma, mekanik mukavemetler açısından değerlendirilerek en uygun düzeneğin oluşturulması gerekir. Örnek transformatör için kullanılabilecek muhtemel düzeneklerden biri aşağıdaki sistem olabilir,



Şekil 4.5. Önerilen yalıtım düzeni

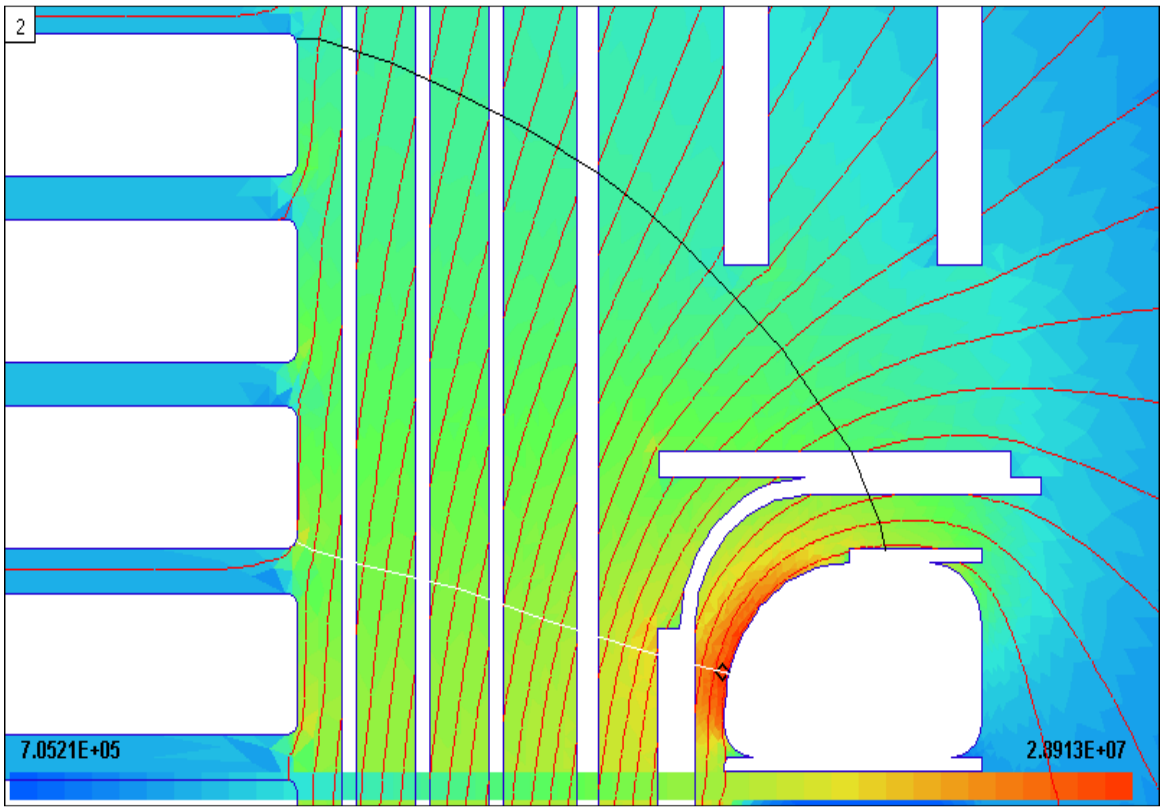
Önerilen sistemin güvenilirliğini teyit etmek için yukarıda açıklanan yöntem ile PSP ve yağ üzerine düşen stres değerleri bulunarak sistemin yalıtım açısından sağlaması yapılırsa,

$E_{yağ}$=79,8 kV/cm

E_{psp}=39,9 kV/cm

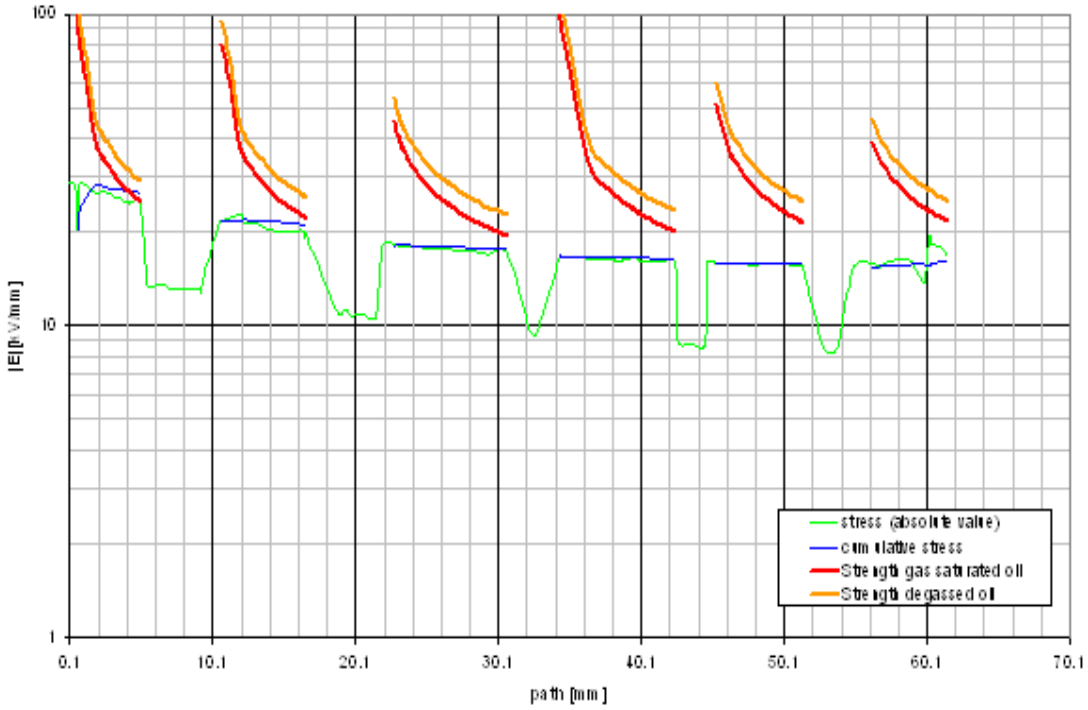
değerleri bulunur. Bu sonuçlara göre, AG ve YG sargıları arasındaki yalıtım tasarımında yukarıda önerilen yöntem kullanılabilir. Fakat örnekte kullanılan güvenlik katsayılarının üreticiden üreticiye değişeceği unutulmamalıdır.

Diğer taraftan, uygun bir sayısal yöntem kullanarak (örneğin, SEY) ayrıntılı elektrostatik alan analizi yapan programlar aracılığı ile daha hızlı ve yüksek güvenilirlikte tasarımlar gerçekleştirilebilir. Aşağıda, önerilen ana yalıtım tasarımının S.E.Y. ne dayanan SLIM [33] aracılığı ile yapılmış örnek analiz incelenebilir. Örnek analiz YG ve ayar sargısı arasındaki bölümler için yapılmıştır.



Şekil 4.6. İki sargı arası yalıtım

Analiz sonuçları Şekil 4.7'de incelenebilir. Belirlenen kritik yol boyunca alan değişimi ve dayanım eğrileri arasındaki marj incelenerek tasarımın güvenilirliği irdelenir.



Şekil 4.7. Kritik yol boyunca alan değişimi

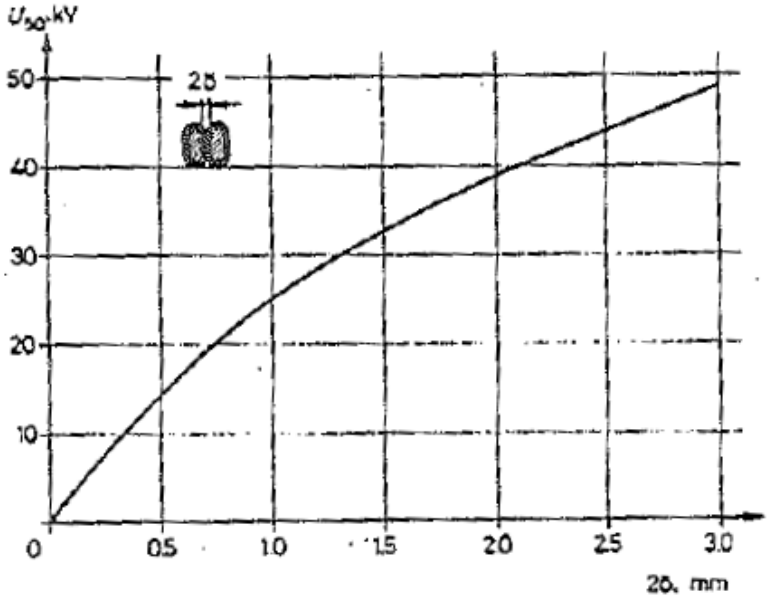
4.2. İç Yalıtım

İç yalıtım, sargılardaki tüm yalıtım malzemelerini, yani iletken yalıtımında kullanılan kağıt, katlar arasında radyal yöndeki yalıtım malzemeleri, sarımlar arasında aksiyel yöndeki yalıtım malzemeleri ve yalıtılmış iletkenlere bitişik olarak konumlanmış özel yalıtım malzemelerin kapsamaktadır.

Sargı yalıtımında kullanılan yalıtkan kâğıdın, gereken dayanımı sağlaması, sargıların sarılması esnasında meydana gelebilecek hasarlara karşı mekanik bütünlüğünü koruyabilmesi ve spesifikasyonlarda belirtilen termal limitlere uygun olması gerekir. Sargılardaki yalıtım malzemesinin kalın olması, daha düşük alan faktörüne (space factor) neden olarak termal performansı da olumsuz yönde etkiler ve mekanik olarak kararlılığını düşürür. Ayrıca, kağıt kalınlığının büyük olması, sargı çaplarının büyümesine yol açarak transformatörün daha da büyümesine neden olur. Bu nedenle uygun kağıt kalınlığının belirlenmesi önemlidir [7].

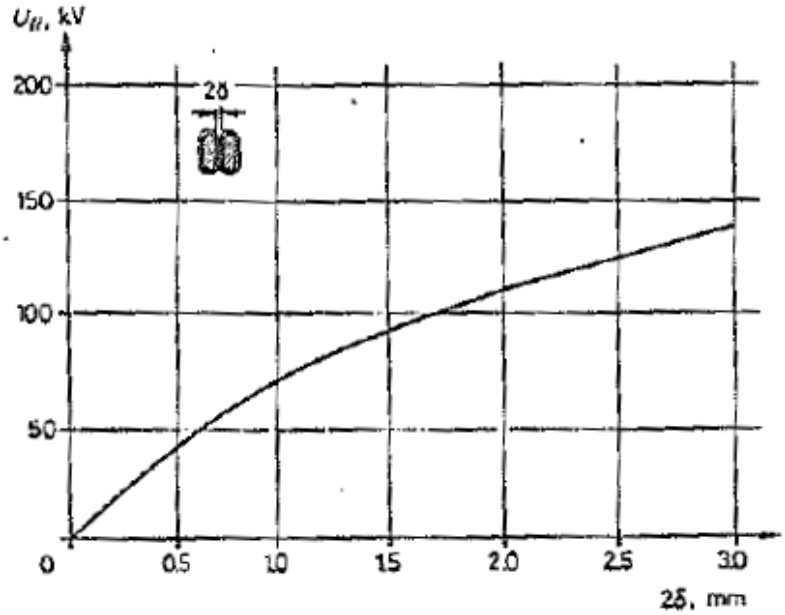
Sargı yalıtımları, transformatör deneylerinde ya da işletmede karşılaşacakları kısa veya uzun süreli darbe gerilimlerinin yanı sıra, sürekli çalışma gerilimine de dayanabilecek düzeyde olmak zorundadır. Küçük seri kapasiteye sahip sargılarda (devrik sargı, kalkanlı sargı v.b.) yıldırım darbe gerilimine bağlı oluşacak zorlanma

dikkate alınarak tasarım yapılır. Büyük seri kapasiteye sahip sargılarda ise (taraklı sargı v.b.) yıldırım darbe geriliminin dağılımı düzgündür, fakat bu tip sargılarda fiziksel olarak birbirlerine yakın sarımlar, elektriksel olarak farklı gerilimlere sahiptir ve bu yüksek çalışma zorlanmasına neden olur. Bu durumda, iletken yalıtımı için kullanılan kağıt kalınlığı, öncelikle çalışma zorlanması göz önüne alınarak belirlenir [7,24].



Şekil 4.8. Sargı yalıtkanın işletme geriliminde kalınlığa bağlı dayanım eğrisi [24]

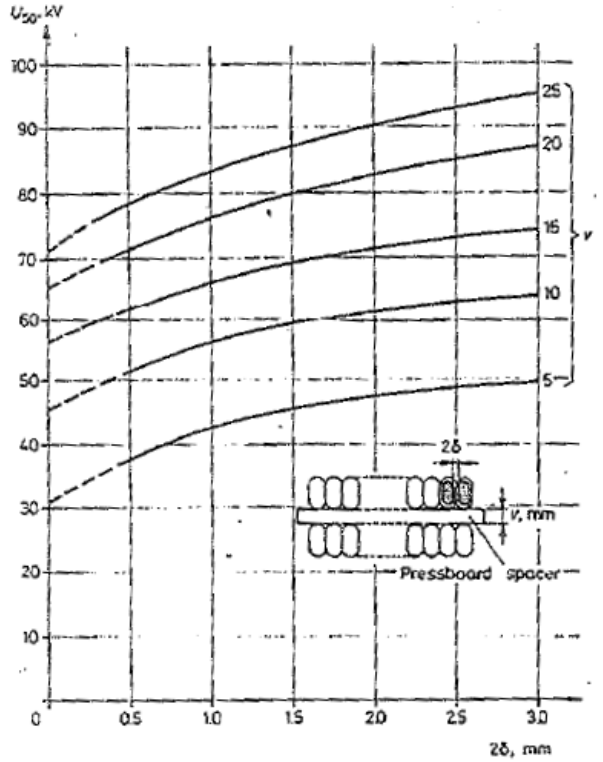
Şekil 4.8'de yağ ile emprenye edilmiş sargı yalıtımı için kullanılan kraft kâğıdının kalınlığı ile delinme gerilimi arasındaki ilişkiyi gösteren eğri verilmiştir. Grafikteki kalınlık, iki sargı arasındaki yalıtım kalınlığı olarak düşünülmelidir.



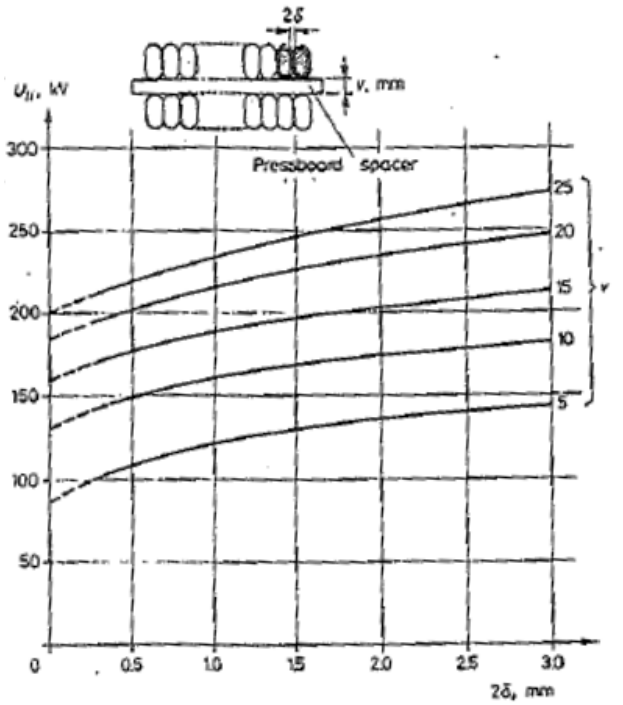
Şekil 4.9. Sargı yalıtkanının darbe gerilimi altında kalınlığa bağlı dayanım eğrisi [24]

Şekil 4.9'da benzer şekilde yıldırım darbe gerilimine bağlı olarak değişen kağıt kalınlıklarını göstermektedir. Grafiklerde belirtilen kağıt kalınlıklarının özellikle yüksek gerilim transformatörlerindeki sargıların yalıtımı için üretilmiş ve işlem görmüş (kurutma, yağ ile emprenye) kraft kağıdına ait olduğu bilinmelidir. Şekil 4.8 ve 4.9'daki grafikler daha önceki pek çok grafikte olduğu gibi deneysel veriler ile elde edilmiştir. Yapılan deneylere göre gerilim farkının yukarıdaki grafiklerde verilen değerlerin üzerinde olmaması gerekir. Hatta grafiklerde verilen değerlerin belirli emniyet katsayıları ile kullanılması gerekir. Bu değer grafiklerin alındığı kaynakta %70 olarak belirtilmektedir. Fakat malzemenin kalitesine ve üreticilerin tecrübelerine göre değişebilmektedir.

Disk sargılar arasında, sargılarda oluşan ısının dışarı atılabilmesine yetecek şekilde genellikle 4-12 mm arasında bir yağ kanalı bırakılır. Yağ kanalları, presbord malzemeden yapılan ara parçalar ile sağlanır. Disk sargılar arasında bulunan ara parçaların yüzeyinde meydana gelebilecek krepaj da düşünülerek genellikle gereken yağ kanalı mesafesinden daha ufak bir mesafe alınır. Şekil 4.10'daki grafik normal çalışmada etkiyen gerilim, Şekil 4.11'deki ise yıldırım darbe gerilimi esnasında etkiyen gerilim için iki disk arasında kullanılacak ara parça kalınlığını belirlemede kullanılabilir. Bu grafiklerde verilen değerler içinde kullanılması gereken emniyet katsayısının % 70 olması gerektiği belirtilmiştir.

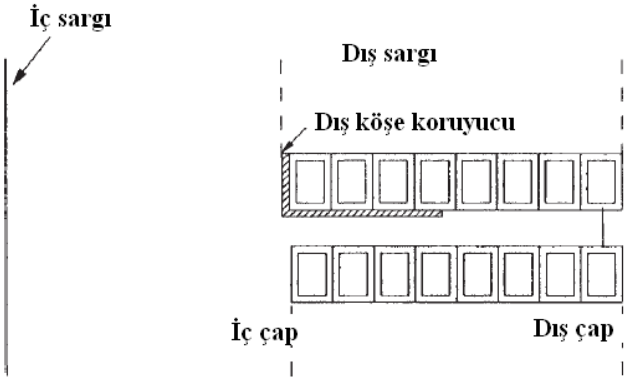


Şekil 4.10. İki disk arasındaki yalıtkanın işletme gerilimi altında kalınlığa bağlı dayanımı [24]

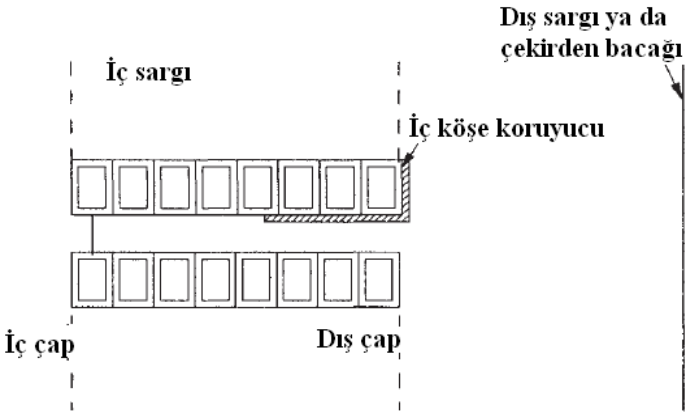


Şekil 4.11. İki disk arasındaki yalıtkanın darbe gerilimi altında kalınlığa bağlı dayanımı [24]

Yıldırım darbe gerilimi için kağıt ile yalıtılmış sargı iletkenlerine bitişik olarak özel yalıtım komponentleri kullanılır. Bu komponentler, genellikle zorlanmanın yüksek olduğu sargı sonlarındaki disklerin köşelerinde bulunurlar. Bu çözüm sargı yalıtkanının kalınlığını arttırmak yerine sargı köşesindeki yüksek zorlanmayı sönümlemede kullanılan pratik ve kazançlı bir yoldur. Çünkü sargı yalıtkanının kalınlığını arttırmak, sarımlar arasındaki seri kapasite değerini ve sargıların alan faktörünü düşürür ayrıca sargılardaki sıcaklık artışına yol açar. Özel olarak üretilen komponentler dış köşe koruyucu (Şekil 4.12) ve iç köşe koruyucu (Şekil 4.13) olarak adlandırılır. Sargı köşelerine bitişik olarak yerleştirildiklerinden sargının doğrudan yağ ile temas etmesi durumunda oluşacak yüksek zorlanmayı bir miktar ötelenmiş olurlar. Bu durum sargı köşelerinin bir miktar yuvarlatılması benzer bir işlev sağlar [7,24].



Şekil 4.12. Dış köşe koruyucu yerleşimi [7]



Şekil 4.13. İç köşe koruyucu yerleşimi [7]

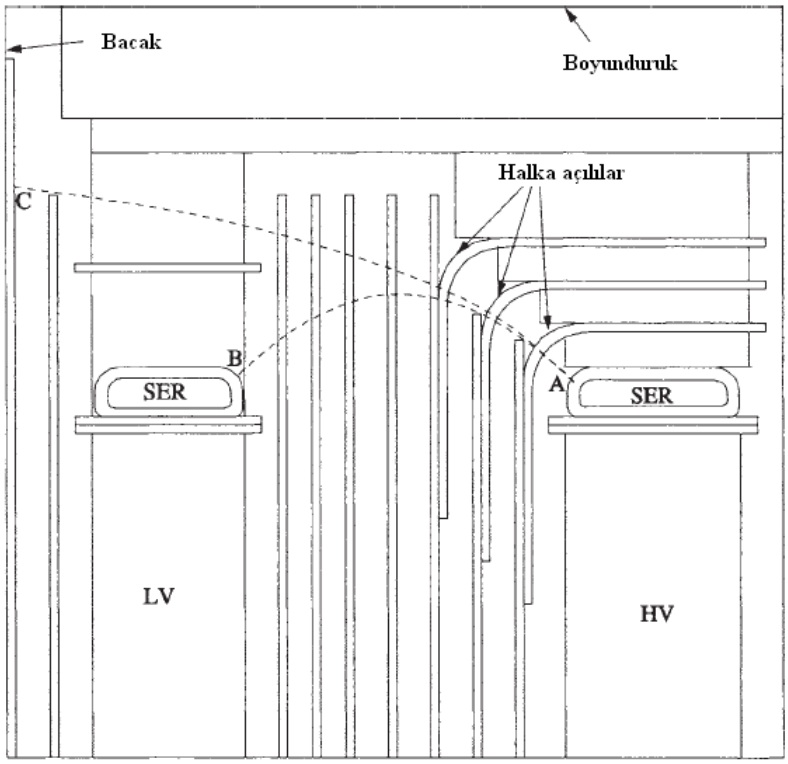
Şekil verilebilen ıslak malzeme ile yapılan iç ve dış köşe koruyucular, genellikle dilim şeklinde üretilirler ve uygulamada birbirleri üzerine bindirilerek tam bir daire

şeklini alırlar. Bindirme mesafesi genellikle köşe koruyucu kalınlığının 30 – 40 katı olacak şekilde yapılır.

4.3. Sargı Sonlarında Yalıtım

AG ve YG sargı sonlarının birbirleriyle ve üst boyundurukla ilgili yalıtım tasarımı, sargı sonlarındaki yalıtım olarak tanımlanabilir. Sargı sonlarındaki yalıtım aslında ana yalıtım tasarımının bir parçası olarak görülebilir. Fakat sargı sonlarındaki alan dağılımı düzgün değildir. Bu nedenle izin verilen zorlanma değeri daha düşük tutulmalı ve yalıtım mesafeleri daha büyük olmalıdır. Diğer bölgelerdeki yalıtım tasarımına göre sargı sonlarındaki yalıtımda krepaj mesafeleri büyük önem taşır ve yalıtım malzemelerinin geometrik şekilleri, krepaj mesafeleri göz önüne alınarak belirlenir.

Yağ ve katı yalıtkandan oluşmuş bir yalıtım sisteminde, yalıtım mesafeleri yağın yalıtım dayanımına bağlı olarak belirlenir. Fakat sargı sonlarındaki yalıtım değerlendirilirken, yağın ve yağ-katı yalıtım malzemesi yüzeyindeki zorlanma göz önüne alınır. Sargı sonlarındaki zorlanma, genellikle sayısal yöntemlerle çözüm yapan (örneğin, SEY) programlar aracılığı ile belirlenir. Tipik bir sargı sonu yalıtımı örneği Şekil 4.14'te gösterilmiştir [7,25,29].



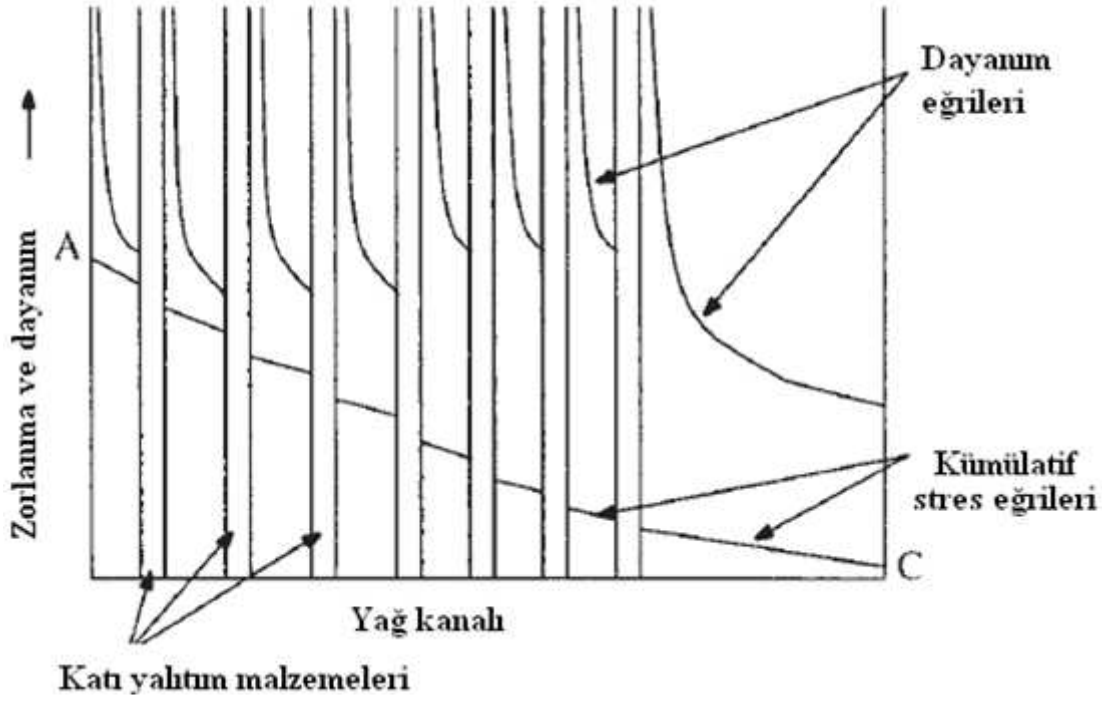
Şekil 4.14. Tipik bir sargı sonu yalıtım örneği

Seçilen yol boyunca her bir yağ kanalı için birikimli alan dağılımı, maksimum değerden başlayarak daha önce açıklanan yöntemle (bölüm 3.6) belirlenir. Eğer maksimum değer, extrem değerlerin herhangi birinde ise hesaplama oldukça kolaylaşır. Çünkü, bu durumda birikimli zorlanma değeri, istenen herhangi bir noktada aşağıdaki Denklem (4.4) ile hesaplanabilir,

$$E_{(d)} = \frac{1}{d}\int_0^d E_{(x)}dx \qquad (4.4)$$

A-C arasındaki her bir yağ kanalı için elde edilen kümülatif stres dağılımı, referans alınan dayanım eğrileri ile karşılaştırılarak yorumlanır (Şekil 4.15).

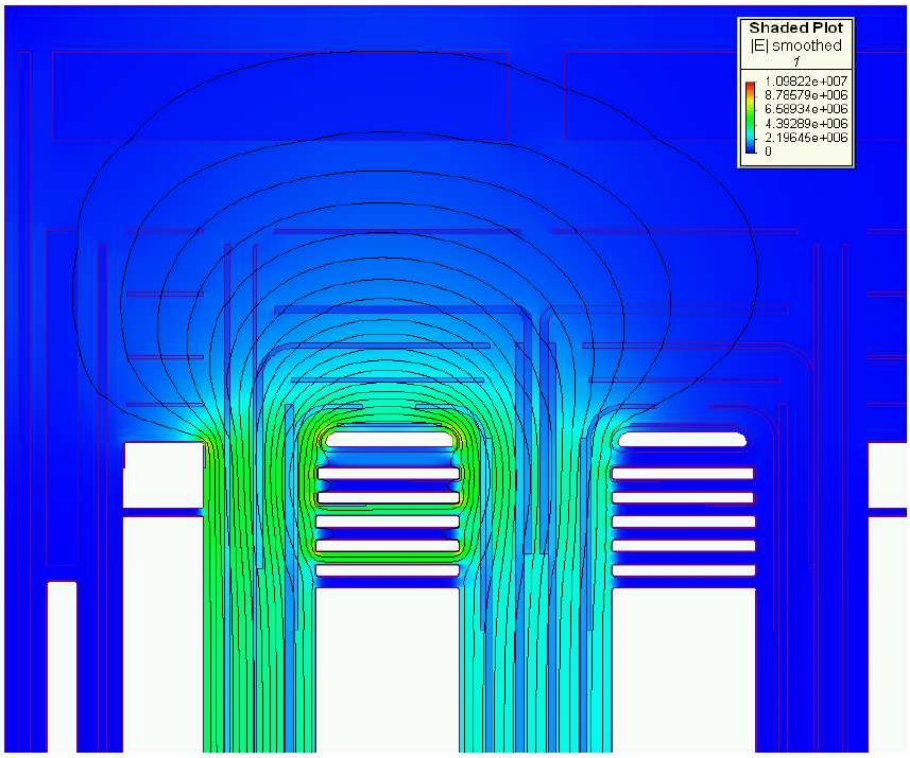
Yalıtım tasarımı yapılırken, tasarımcılar halka açılıların/bariyerlerin yerleşimlerini önceden belirlenmiş ve kabul edilmiş güvenlik katsayılarının asgari değerde, altında tutularak optimum tasarıma ulaşırlar. Daha önce de bahsedildiği üzere belirlenecek minimum emniyet katsayısı, kullanılacak yağ/katı yalıtım sisteminin kalitesine, emprenye ve kurutma teknolojisine bağlıdır. Bu nedenle emniyet katsayıları üreticiden üreticiye değişebilmektedir.



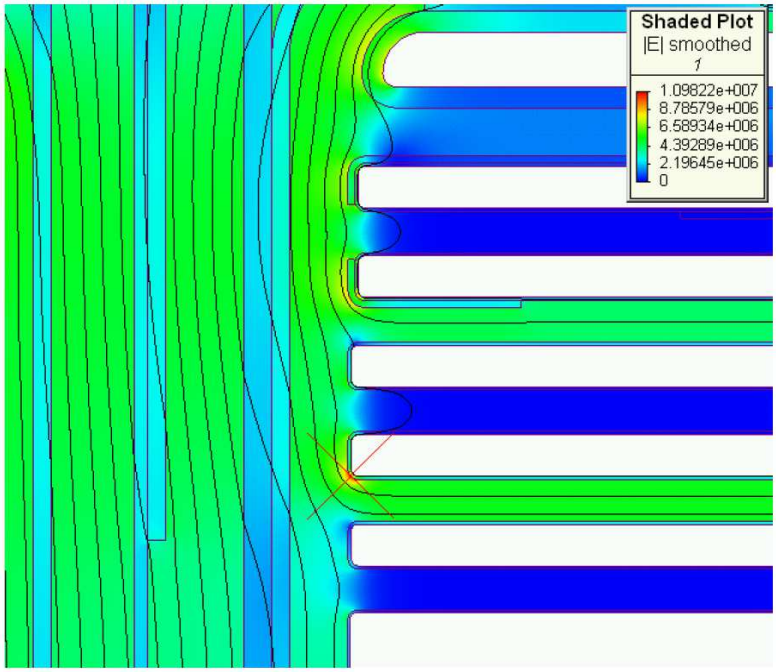
Şekil 4.15. Sargı için yapılmış analiz eğrisi (A-C) [7]

Sayısal yöntemler ile analizi yapılan sistemde, optimum bir tasarım yapılabilmesi için üç kritik bölgenin incelenmesi önemlidir. Bu bölgeler: (i) yalıtılmış veya yalıtılmamış olan iletken üzerindeki maksimum zorlanmanın bilinmesi, (ii) yağ kanalı boyunca elektrik alan dağılımı, (iii) katı yalıtım malzemesi üzerindeki krepaj zorlanması.

Yalıtılmış bir iletkenin yüzeyindeki maksimum alan zorlanmasının 11-12 kV/mm değerini aşmaması gereklidir. Yalıtılmamış bir iletken veya topraklanmış bir iletken için bu değer 2 kV/mm'ye kadar düşmektedir. Şekil 4.16'da sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiş bir yalıtım sisteminde eşpotansiyel çizgileri ve alan dağılımları görülmektedir. Bu sistemde maksimum lokal stresin dördüncü diskte oluştuğu belirlenmiş ve bu nokta Şekil 4.17'de kırmızı ile işaretlenmiştir.



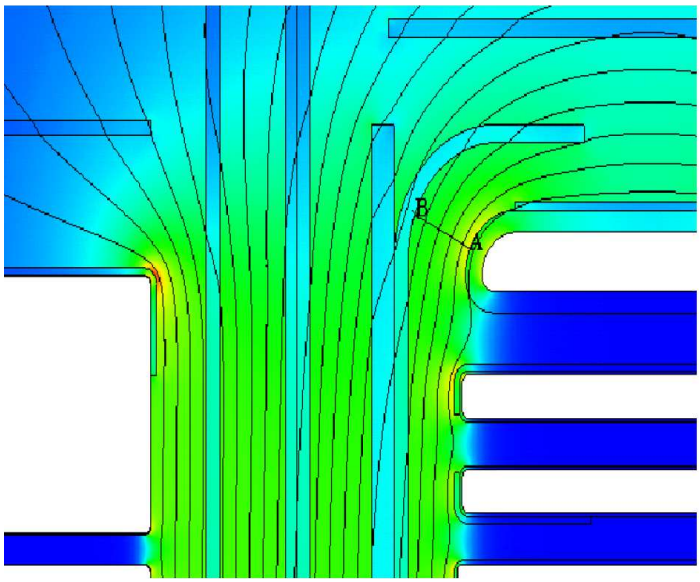
Şekil 4.16. S.E.Y ile analiz edilmiş bir yalıtım sistemi [30].



Şekil 4.17. 4. Diskteki lokal maksimum stres [30]

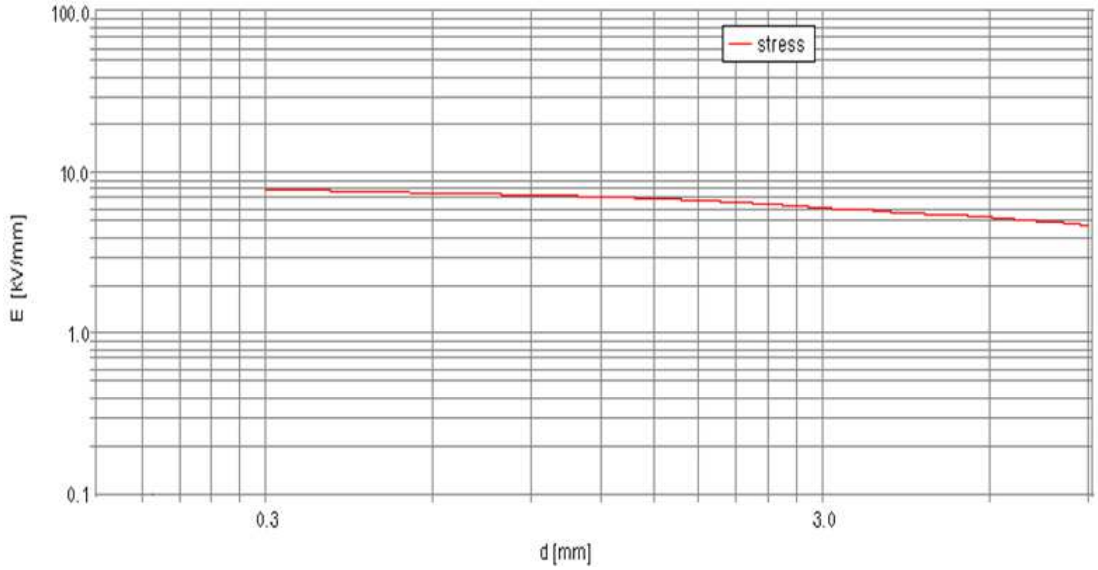
Maksimum alan şiddeti her zaman sargı sonunda oluşmayabilir. İletkenin geometrik yapısı, alan şiddetinin değerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu örnek için yıldırım darbe gerilim seviyesi ve sargı geometrisinin etkisi ile bu noktada yüksek zorlanma meydana gelmektedir. Bu noktadaki maksimum alan şiddeti 11 kV/mm ye çok yakın

olduğundan, ek bir yalıtım önlemi ile (köşe koruyucu gibi) zorlanmanın azaltılması gerekir [30].



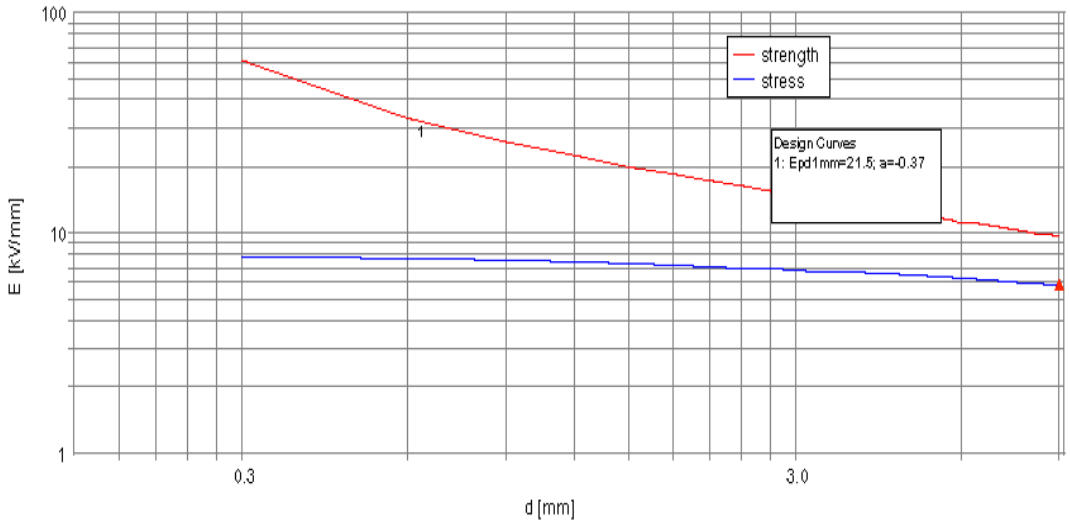
Şekil 4.18. Sargı sonu ile halka açılı arasındaki alan (A-B) [30]

Şekil 4.18'deki analiz ise bir yağ kanalındaki yalıtım dayanımının değerlendirilmesine bir örnek olarak gösterilebilir. A ve B noktaları arasındaki (ekranlanmış sonlandırma halkası ve halka açılı arasındaki yağ kanalı) stres değeri Şekil 4.19'da verilmiştir.



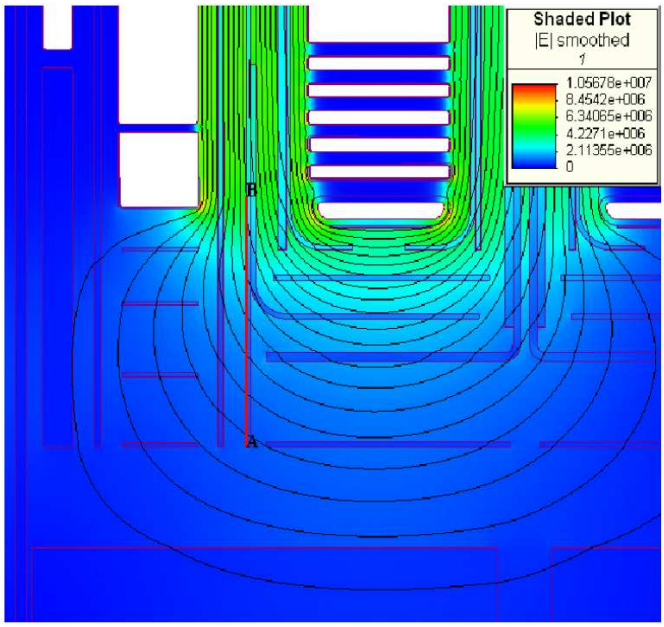
Şekil 4.19. A-B noktaları arasındaki stres değişimi [30]

Şekil 4.20'de ise stres eğrisi ile dayanım eğrisi karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu şekilde, öngörülen sistemin güvenli olup olmadığı belirlenebilir.



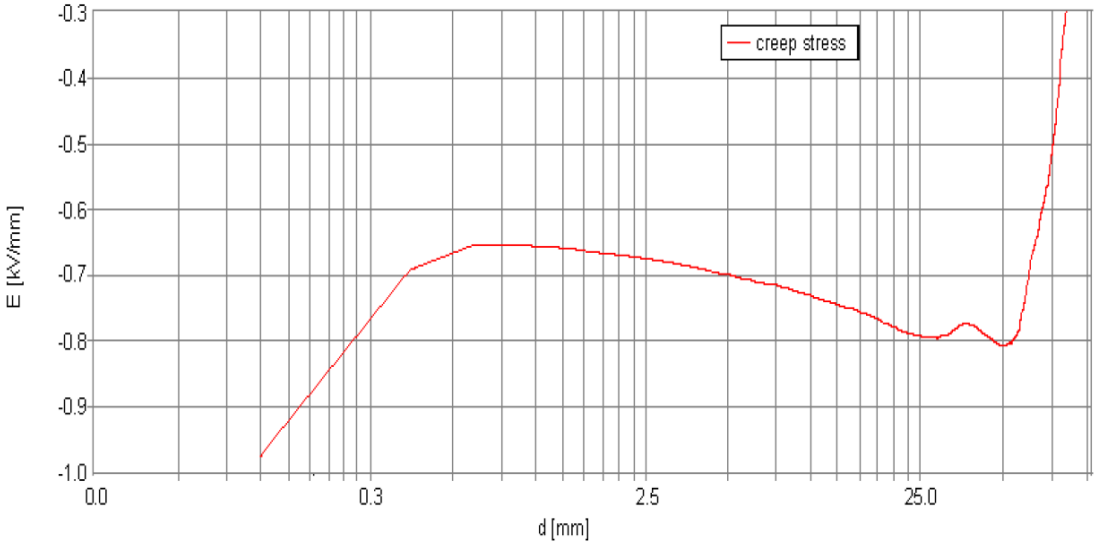
Şekil 4.20. Sargı sonu için yapılmış bir analiz (Test gerilimi:230 kV, marj: %40) [30]

Halka açılıların yerleşimi, sargı sonlarındaki yalıtım için önemli bir konudur. Halka açılılar, geniş yağ kanallarını daha küçük yağ kanallarına bölerek yağın dayanımının artmasını sağlarlar. Halka açılılar, eşpotansiyel çizgiler doğrultusunda yerleşmiş olmalıdır, aksi bir durumda, yalıtım malzemesi üzerinde yüksek krepaj zorlanması olur ve bu durum yalıtım sisteminin dayanımını düşürür. Analizi yapılan sistemde, son olarak katı yalıtım malzemesi yüzeyi boyunca oluşan krepaj zorlanmasının tasarım limitlerinde olup olmadığı incelenmelidir. Bu tip bir analiz Şekil 4.21'de verilmiştir.

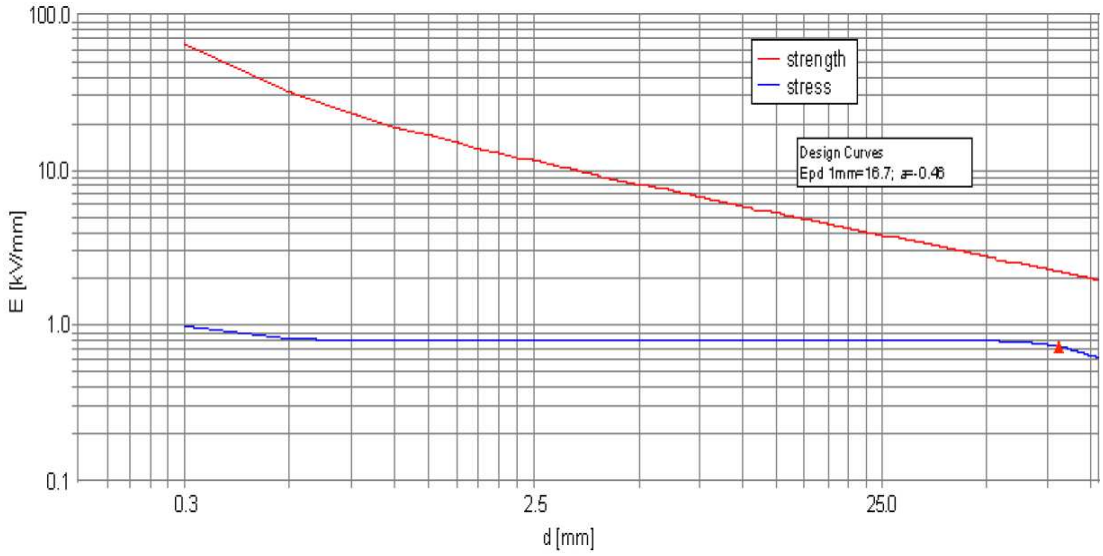


Şekil 4.21. Krepaj zorlanması için yapılan örnek analiz [30]

Şekil 4.21'de katı yalıtım malzemesi yüzeyinde gösterilen A ve B noktaları arasındaki stres, Şekil 4.22'de gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi bu iki nokta arasındaki stres tekdüze bir şekilde değişmemektedir. Bu nedenle Şekil 4.22'deki stres dağılımı, kümülatif stres metodu ile Şekil 4.23'deki eğriye dönüştürülmüştür. Şekil 4.23'den görülebileceği gibi, kümülatif stres metodu ile dönüştürülen krepaj eğrisi, endüstriyel olarak kabul görmüş dayanım eğrileri ile karşılaştırıldığında, belirtilen bölgenin krepaj açısından bir sorun yaratmayacağı sonucuna varılabilir.



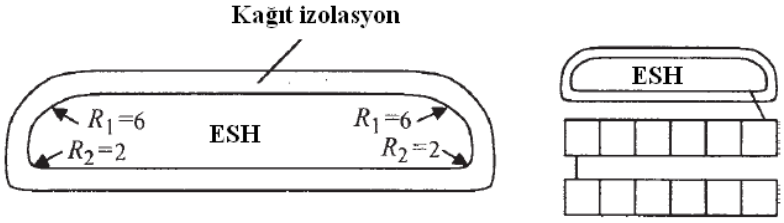
Şekil 4.22. Krepaj zorlanması için yapılan örnek analizde A-B arası alan değişimi [30]



Şekil 4.23. Krepaj zorlanması için yapılan örnek analiz (kümülatif eğri ve dayanım eğrisi) (Test gerilimi:230 kV, marj: 67%) [30]

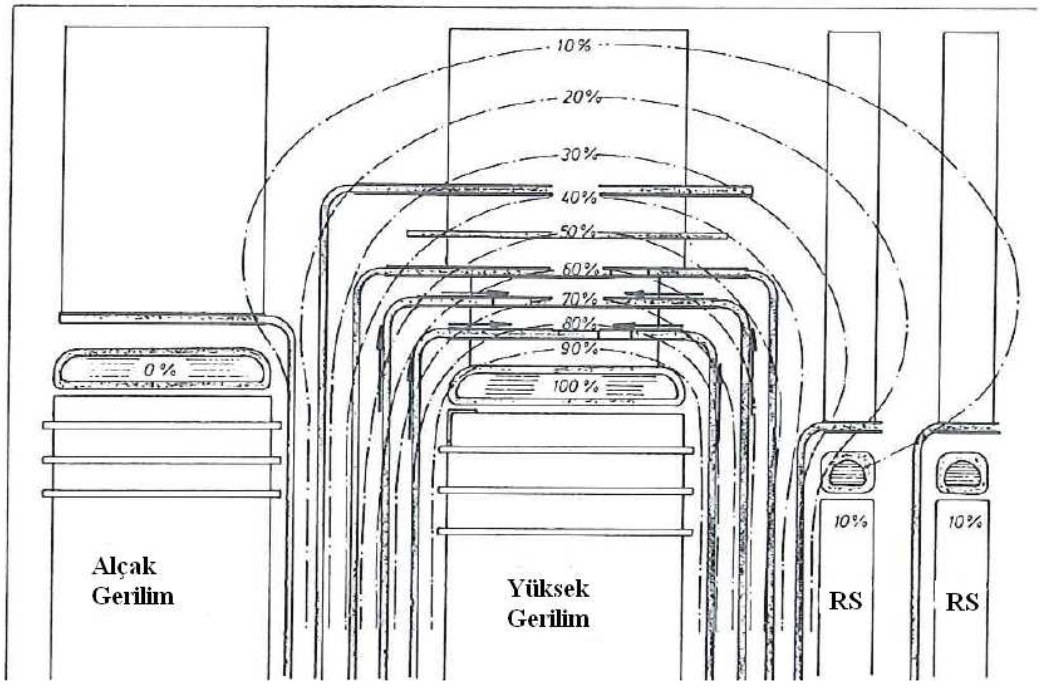
Sargı sonlarındaki yalıtım tasarımında geniş yağ kanallarının daha ufak yağ kanallarına bölünmesi dışında, sargı köşelerindeki sivri köşe etkisi ile oluşan yüksek stresin de düşürülmesi gerekir. Bu kısımlardaki zorlanmanın değeri, uygulanan gerilim değerine ve iletkenin geometrik şekline bağlı olarak değişir. Bu kısımlardaki zorlanma köşeleri yuvarlatılmış ekranlanmış sonlandırma halkaları kullanılarak düşürülür. Konum olarak, sargılara olabildiğince yakın olarak yerleştirilir. Ekranlanmış sonlandırma halkasının tipik taslak çizimi Şekil 4.24'teki gibidir. Sargılara yakın olan alt eğrilik çapı (R2) genellikle yaklaşık olarak 2 mm civarında

seçilir. Üst eğrilik çapı ise (R1) ise minimum 6 mm civarında yapılır. Ekranlanmış sonlandırma halkaları üzerindeki krep kağıdı kalınlığı genellikle 3 mm civarında yapılır [7].

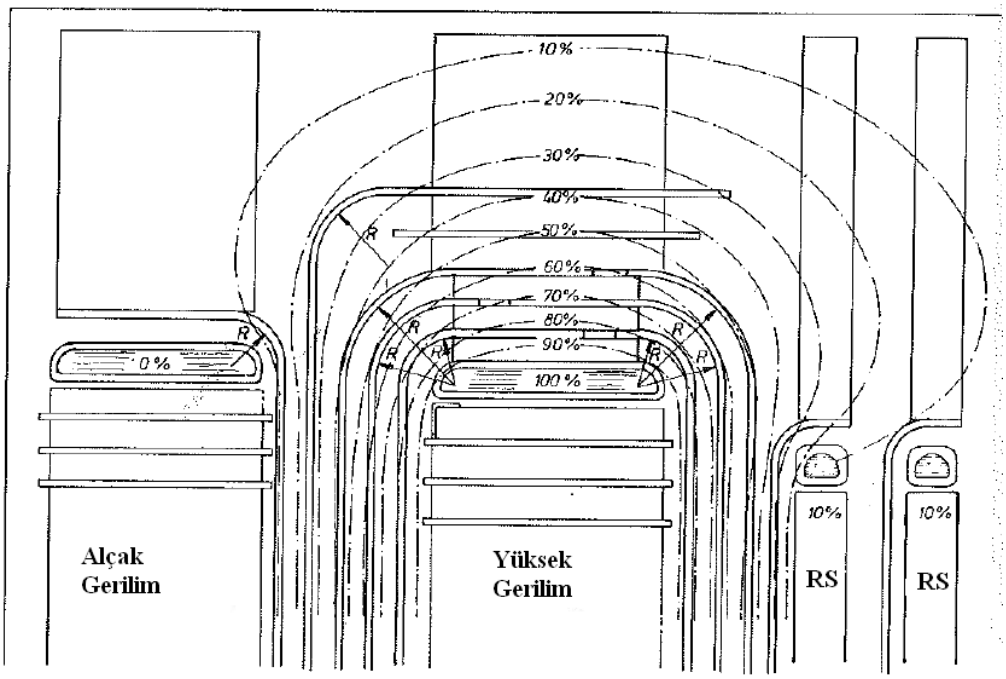


Şekil 4.24. Ekranlanmış sonlandırma halkası çizimi [7]

Halka açılıların eğriliklerinin, eş potansiyel çizgilerine paralel olacak şekilde ayarlanması sistemin krepaj dayanımını arttırmasının yanı sıra zorlanmaya maruz kalan yağ hacmini de düşürerek sistemin dayanımını arttırır [11]. Şekil 4.25'te sabit 2-3 mm eğriliğe sahip bir sistem görülmektedir. Şekil 4.26'da ise halka açılıların eğrilikleri eş potansiyel çizgilerine paralel olacak şekilde yerleştirilmiştir. Dikkat edilirse Şekil 4.25'teki sistemde, ekranlı sonlandırma halkası ve halka açılılar boyunca yağ kanalı mesafeleri Şekil 4.26'daki sisteme nazaran daha yüksektir.



Şekil 4.25. Sabit 2-3 mm radyusa sahip sistem (RS:Regülasyon sargısı)[11]



Şekil 4.26. Sabit 2-3 mm radyusa sahip sistem [11]

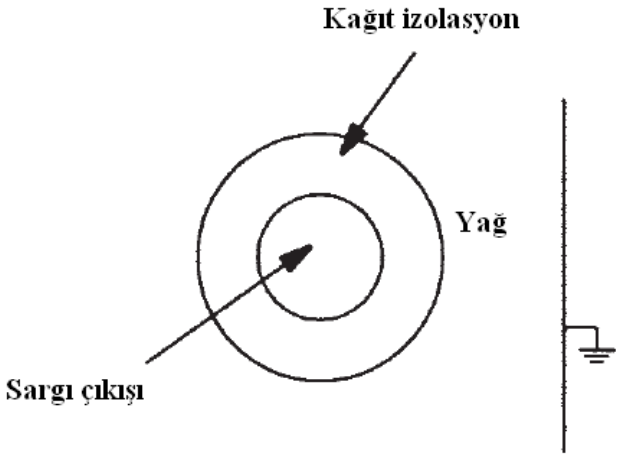
Önceki kısımlarda bahsedildiği üzere, yüksek zorlanmaya sahip bu bölgede geniş yağ kanalı, sistemin kısmi deşarja başlamasınına yol açacaktır. Şekil 4.25'deki sistemde, ekranlı sonlandırma halkası ve halka açılı arasındaki mesafenin %60 oranında büyümesi, sistemin dayanımını % 30 civarında düşürür. Bu durumda sistemin dayanımını arttırmak için ana yağ kanalının genişliğini arttırmak gerekir. Bu bağlamda Şekil 4.26'daki gibi bir sistem seçilmesi optimum bir sargı sonu yalıtımı için önemlidir.

4.4. Sargı Çıkışlarında Yalıtım

Sırasıyla ana yalıtım, iç sargı yalıtımı ve sargı sonlarındaki yalıtım tasarımı yapıldıktan sonra, son olarak sargı çıkışı ile buşing arasındaki yalıtımın güvenli bir şekilde yapılması önemlidir. Çünkü katı yalıtım malzemesi ve yağ ile oluşturulmuş sistem içerisine hapsedilerek bariyerli yapı ile kademe kademe yalıtılmış aktif kısım bu bölgede artık bahsedilen kapalı alandan dışarıya çıkacaktır. Bu durumda özellikle yüksek gerilime sahip çıkış uçu artık doğrudan toprak potansiyeli ile karşı karşıya kalacaktır. Bu durumda, yüksek gerilime sahip çıkış ucu etrafındaki zorlanmanın belirlenmesi ve bu değerin, izin verilen dayanım değerlerin altında tutulması gereklidir.

Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere, bu değerlerin hesaplanması için kullanılabilecek en iyi yöntem sayısal yollarla analiz yapan programlardır. Fakat, bu bölgelerde alanın düzgün olmamasından ve çok geniş yağ kanallarının bulunmasından dolayı dayanım değerinin doğru belirlenmesi hayati önem taşır. Çünkü Şekil 4.1'de verilen ve endüstriyel olarak kullanılan tasarım eğrileri düzgün alan için geçerlidir [31].

Eğer transformatör gerilimi 400 kV seviyesinin altında ise, sargı çıkışındaki iletken, gerilim seviyesine göre belirli kalınlıkta kağıt yalıtım malzemesiyle (krep kağıdı, termal olarak güçlendirilmiş kağıt v.s.) sarılarak ve transformatör içerisinde toprak potansiyeline mesafesi belirlenen limitlerin altına inmeden bushinge taşınabilir. Bu gerilim seviyesine sahip transformatörlerde sargı çıkışı taslak olarak Şekil 4.27'deki gibidir.



Şekil 4.27. 400 kV altı transformatörlerde sargı çıkışı taslak çizimi

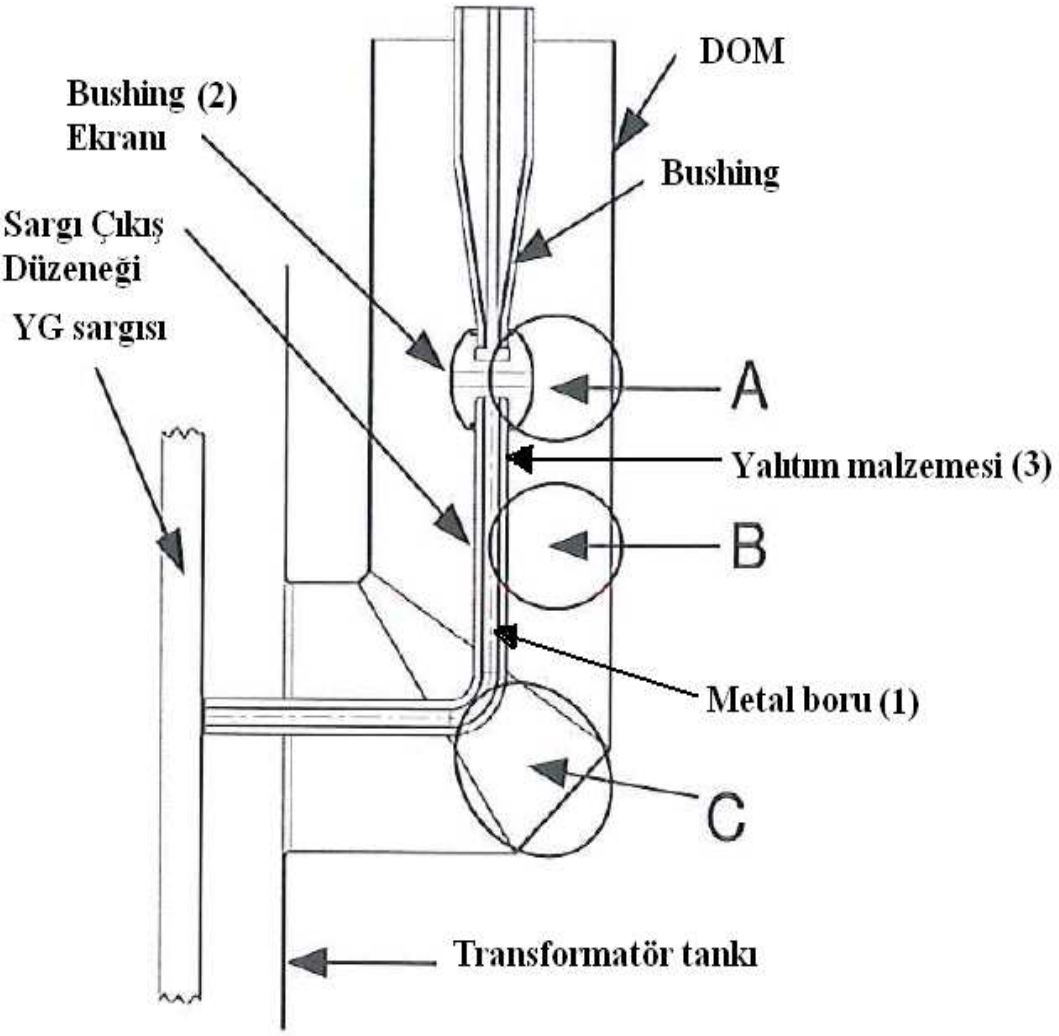
Böyle bir sistemde iletken ve toprak potansiyeli arasındaki yağın delinme dayanımını arttırmak için önerilen yöntemlerden biri ya da bir kaçı kullanılabilir,

- Aradaki mesafeyi arttırmak,
- Çıplak iletkenin çapını arttırmak (iletken etrafındaki elektrik alan değeri düşer),
- Kağıt izolasyon kalınlığını arttırmak ve/veya araya bariyer koymak.

Birinci yöntemin uygulanması maliyeti arttırır. Çünkü bu durum transformatör içerisinde kullanılacak malzemelerin miktarını ve transformatörün boyutlarını arttırır. Son yöntem, sistemin yalıtım dayanımını optimum şekilde arttıracaktır. Kağıt kalınlığı arttırıldığında, kağıt üzerinde daha yüksek bir gerilim düşümü olacağından,

yağ üzerindeki zorlanma azalır. Fakat TYD seviyeleri için mesafelerin standartlaştırılması iletken çapının ve iletken üzerine sarılacak kağıt kalınlığına bağlıdır. İletken üzerine sarılacak yüksek kağıt kalınlığının emrenye zorluğu, termal konular ve işçilik maliyetleri dikkate alınmalıdır[7].

Transformatör, 400 kV ve üstü bir gerilim seviyesine sahipse, iletken etrafına sadece katı yalıtım malzemesi sarılarak bushinge götürülebilmesi ancak yalıtım mesafelerinin çok yüksek olması ve iletken üzerindeki yalıtım malzemesinin çok kalın olması ile sağlanabilir. Bu durum, transformatörün boyutlarının büyümesine ve maliyetlerin artmasına neden olur. İkinci bir konu ise iletken üzerine sarılan kağıt çok kalın olacağından emprenye işleminin yeterince sağlıklı yapılamamasının zorluğudur. Bu durum, iletken üzerine sarılan kağıt içerisinde kısmi deşarjlara ve zamanla delinmelere yol açabilir. Bu soruna karşı, 400 kV ve üzeri gerilim seviyesine sahip transformatörlerde, sargı çıkışı ile bushing arasındaki bağlantı, genellikle sargı çıkış düzenekleri (Lead Exit) aracılığı ile yapılır.



Şekil 4.28. 400 kV'luk ortadan girişli transformatörlerde sargı çıkış düzeneği taslak çizimi [32]

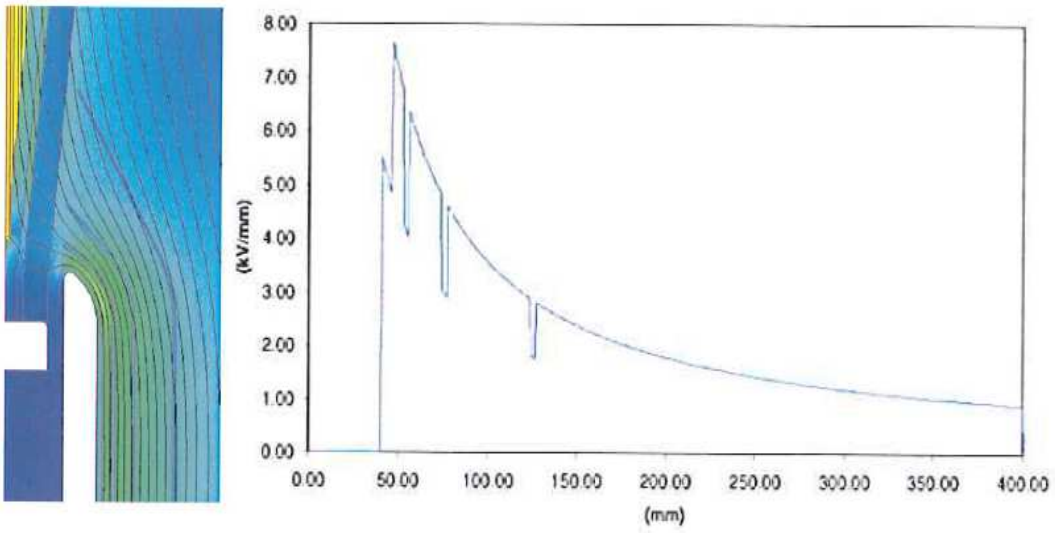
Şekil 4.28'de 400 kV ve üstü gerilim seviyesine sahip ortadan çıkışlı bir transformatör için kullanılan sargı çıkış düzeneği taslak çizimi görülebilir. Bu örnek çizimde sargı çıkış düzeneği dom içerisindedir. Fakat bu durum transformatörün yapısına göre değişebilir. Örneğin, sargı çıkışı üstte olabilir ve sargı çıkış düzeneği üstte olabilir veya yüksek gerilim sargısı ortadan fakat direkt kazan içerisinden çıkabilir. Sargı çıkış düzenekleri genel olarak üç kısımdan oluşurlar:

1. Yüksek gerilim sargısından çıkan iletken değişik çaptaki alüminyum veya bakır borular ile bushinge ulaştırılır. Böylece, iletkenin çapı büyültülerek iletken etrafındaki zorlanma daha düşük seviyelere çekilir.
2. Bushingin alt ucundaki geometrinin ortaya çıkardığı düzgün olmayan alanı ve yüksek zorlanmayı engellemek için bu bölgede metal bushing ekranı kullanılır.

3. Son olarak metal parçaların yüzeyini kaplayan katı yalıtım malzemesi (presbord) bulunur.

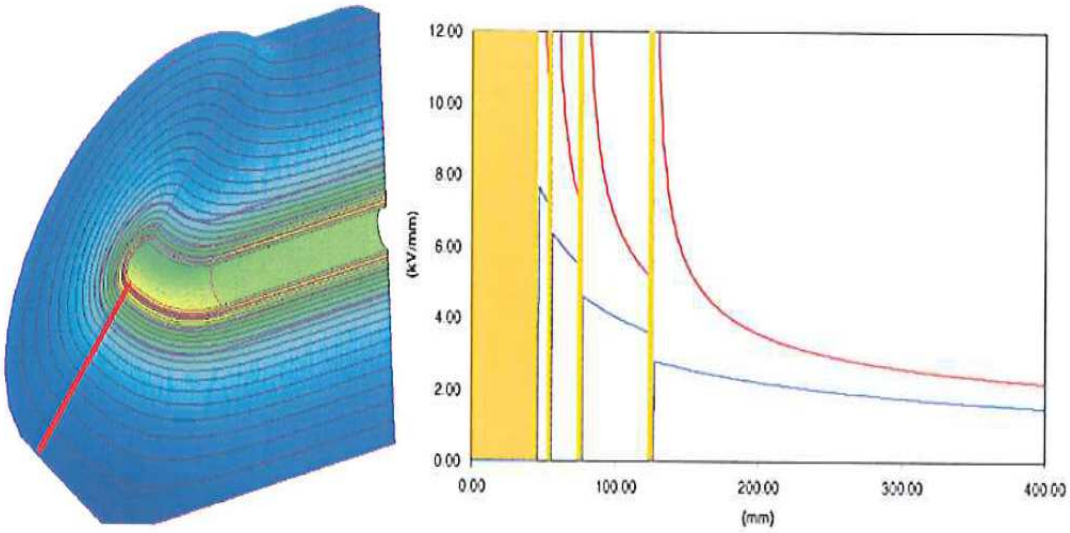
Sargı çıkış düzeneklerine uygulanan katı yalıtım malzemesi çeşitli şekillerde olabilir. Bazı üreticiler, metal boru ve elektrot yüzeyi gerilim seviyesine bağlı olarak düşük kalınlıkta pressbord malzeme ile kaplanmış bariyerli sistemleri tercih ederken, bazıları ise metal boru ve elektrot yüzeyi yüksek kalınlıkta krep kağıdı ile sarılmış bariyersiz (veya yüsek gerilim seviyelerinde bir bariyerli) sistemleri tercih ederler. İkinci seçenek, üretimde kullanılan malzemeler, üretim süreleri, işçilik v.s. nedeniyle daha ucuz ve eski bir çözümdür. Fakat büyük kağıt kalınlığının emprenye edilmesinde zorluklar yaşanabilir. Ayrıca, büyük kağıt kalınlığı termal kapasiteyi düşürür. Birinci seçenekte bahsedilen bariyerli sistemler, daha pahalı ve modern sistemlerdir. Ancak, bariyerli sistemler aracılığı ile yüksek yalıtım mesafeleri düşürülerek temel transformatör malzemelerinden (yağ, çelik v.b.) kar sağlanabilir. Günümüzde transformatör üreticileri transformatör üretim geleneklerine/tekniklerine bağlı olarak kullanacakları yöntemi belirlerler.

Şekil 4.28'de verilen yapının güvenilirliğini incelemek için elektrik alan analizleri yapılır. Elektrik alan analizleri, genellikle şekil üzerinde gösterilen A, B, C bölgelerinde yapılır. Çünkü bu bölgeler, sargı çıkış düzeneklerinde ek kritik bölgelerdir [25,32].



Şekil 4.29. Bushing ekranı bölgesinde (A bölgesi) yapılan analiz [32]

Bu örnek için B bölgesindeki elektrik alan dağılımının araştırılmasına gerek yoktur. Çünkü C bölgesinde metal borudaki dirsek nedeniyle alan zorlanması daha yüksekir. Bu bağlamda eğer sistem C bölgesi için güvenli ise B bölgesin için inceleme yapmaya gerek yoktur. Sargı çıkış düzeneklerinin tasarımında, eksensel simetrinin bulunmadığı bölgelerde, genellikle 3 boyutlu analiz yapılması gerekir. Şekil 4.30'da dirsek bölgesi için yapılmış 3 boyutlu analiz görülebilir [32]. Şekil 4.30'da sol tarafta bulunan modelde, kırmızı ile gösterilen yol boyuncaki alan dağılımı, yanında grafik olarak gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, belirlenen yol boyunca zorlanmanın izin verilen seviyenin altında olduğu görülebilir. Fakat dirsek bölgesinin geometrisi nedeniyle bu bölgede oluşacak alan düzgün alan değildir. Mevcut tasarım eğrileri düzgün alan için oluşturulduğundan, böyle bölgeler için üreticilerin tecrübelerine bağlı extra emniyet katsayıları gözönüne alınarak mesafeler belirlenir.



Şekil 4.30. Dirsek bölgesinde (C bölgesi) yapılan analiz [32]



Şekil 4.31. 500 kV seviyesinde sargı çıkış düzeneği resmi [32]

5. BENZETİM ÇALIŞMASI

Benzetim çalışması yapılacak olan transformatör 380/13,8 kV gerilim seviyesine sahip bir generator transformatörüdür. Benzetim çalışmasında elektriksel olarak zorlanmaya maruz kalan bölgeler SLIM Electromagnetic Engineering [33] programı kullanılarak simule edilecektir.

Transformatörün fiziksel yapısı gözönüne alındığında çekirdek etrafında eksenel simetri olduğundan dolayı özellikle sargılar arasındaki bölgelerin değerlendirmesini silindirik eksende iki boyutlu olarak modellemek çözümü kolaylaştıracaktır.

Malzemelerin dielektrik katsayıları aşağıdaki gibi alınmıştır;
- Presbord → 4,2
- Kraft kağıdı → 4,0
- Yağ → 2,2

Autocad programı ile hazırlanan analizi yapılacak transformatörün geometrisi Slim programına aktarılır ve malzemeler programa tanıtılır. Bu işlem pek çok analiz programında aynı şekilde yapılmaktadır. Geometri sorunsuz olarak programa alınıp malzemeler tanıtıldıktan sonra program aracılığı ile geometride ağlar (mesh) oluşturulur. Oluşturulan ağlar çözüm süresini ve çözümün doğruluğunu etkilediğinden ağ boyutlarının arttırılmasını veya azaltılmasını bölgelesel olarak yapmak gerekir. Slim programı yağ içerisndeki kritik/maksimum zorlanmasının olduğu yeri gösterme özelliğine sahiptir.

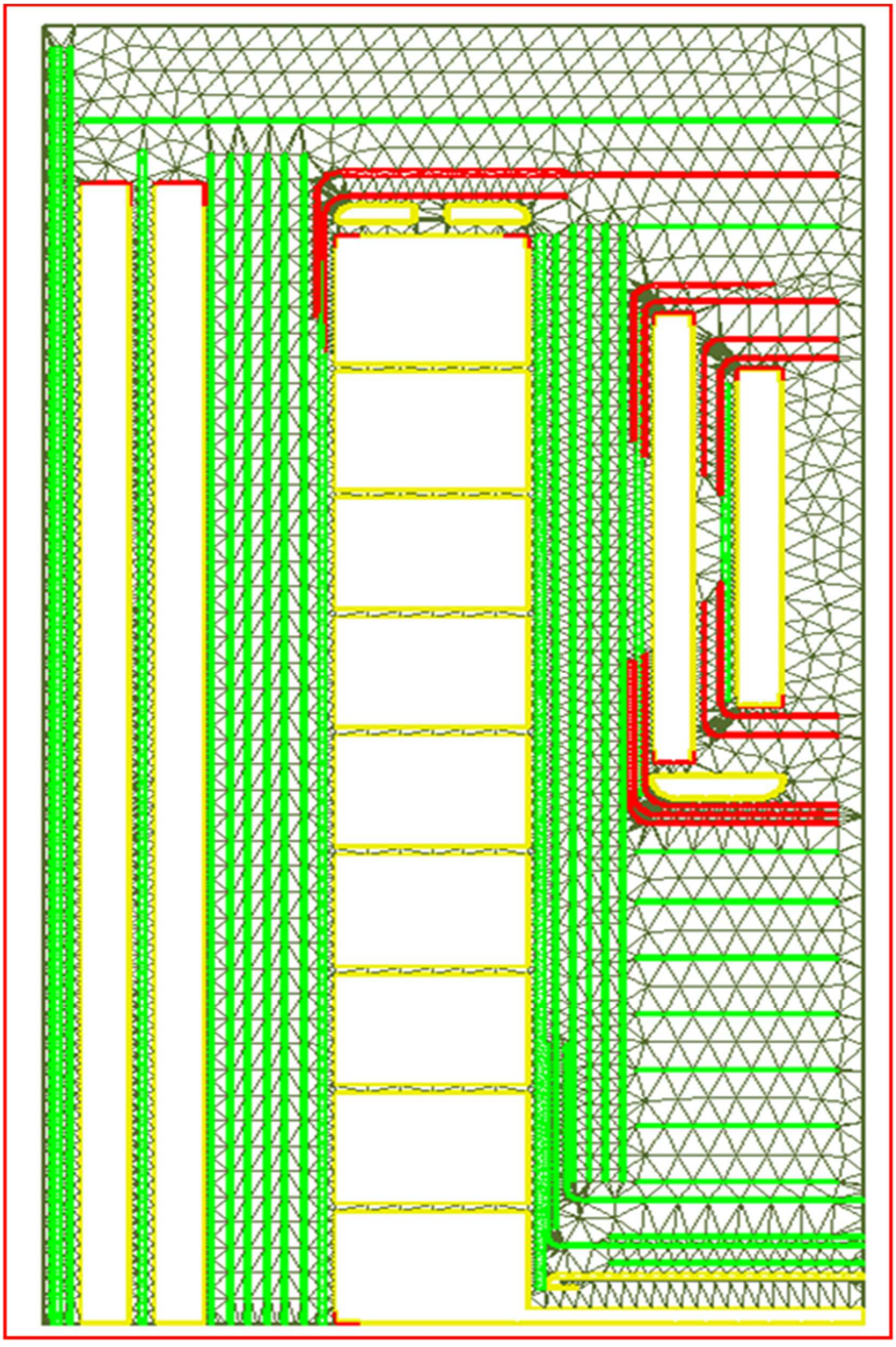
Önceki kısımlarda da belirtildiği üzere transformatöre ait her bir test geriliminin ayrı ayrı simule edilerek değerlendirilmeye çalışılması yerine belirlenen TYD seviyesi ile tek bir simulasyon yapmak daha uygundur. Bu transformatörün gerilim seviyesine bağlı olarak test seviyesi aşağıda belirtilmiştir (yıldırım darbe gerilimi / AC test gerilim seviyesi),
- AG sargısı: 95 kVtepe / 28 kVrms

- YG sargısı: 1425 kVtepe / 630 kVrms
- Ayar sargıları (nötr gerilim seviyesi): 650 kVtepe / 275 kVrms

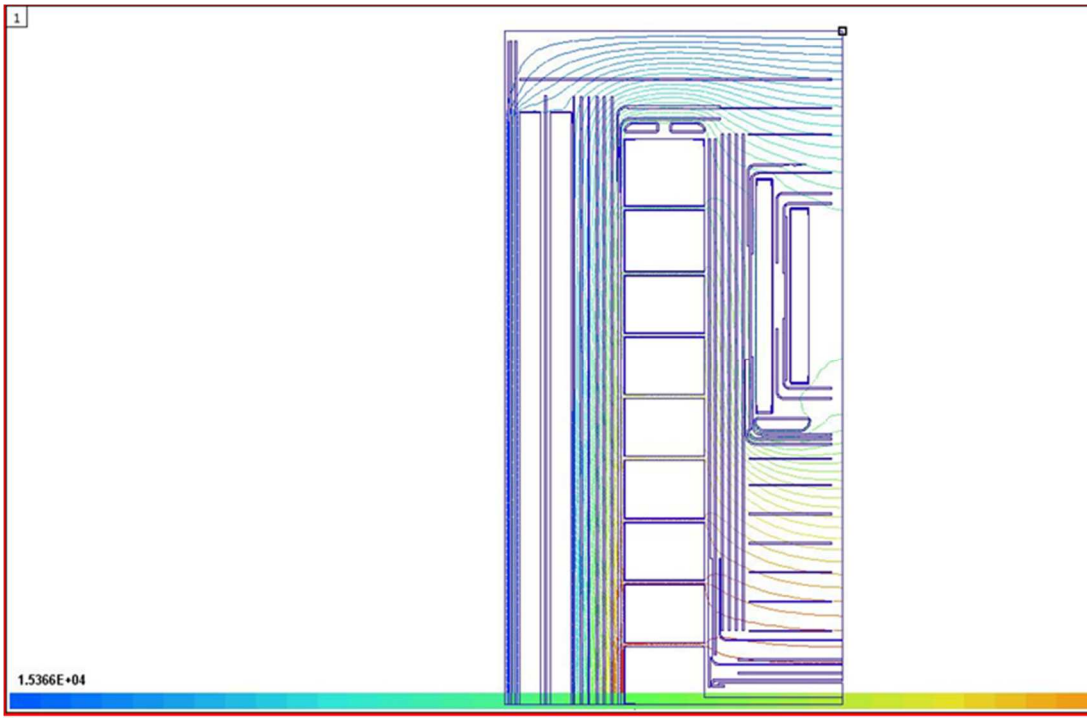
5.1. Model

Analizi yapılacak olan model programa aktarılıp malzemeler tanıtıldıktan sonra ilk önce model üzerinde ağ işlemi yapılır. Daha önceden de bahsedildiği üzere kullanılan program bu işlemi otomatik olarak yapmaktadır ve bu işlem pek çok analiz programında da aynı şekildedir. Ağ yoğunluğu/ölçüleri bölgenin kritikliğine göre arttırılabilir veya azaltılabilir. Bu transformatörde yüksek gerilim sargısı ortadan girişli olduğundan sargı çıkış düzeneğinin yarısından itibaren model oluşturulmuştur. Tüm boyu alarak analiz yapmak daha fazla bellek ihtiyacı doğuracak ve işlemin süresini uzatacaktır. Çekirdek ve sargı yapısı arasında da eksenel simetri olduğundan çekirdek ve sargılarda çekirdek ekseni boyunca modellenerek silindirik eksende benzetim çalışması gerçekleştirilecektir.

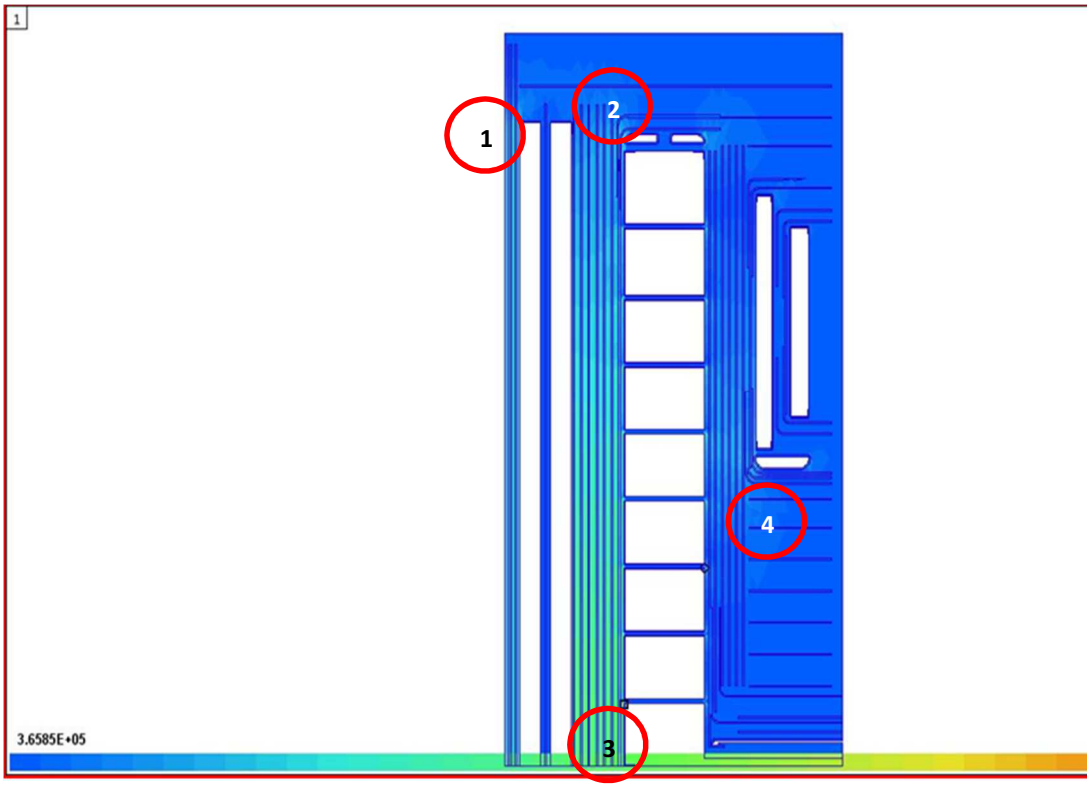
Şekil 5.1'de modelin ağ işlemi gerçekleştirilmiş hali görülmektedir. Bu işlem sonrasında ağ yapısının uygunluğunun kontrolü yapılır. Gerekirse bölgesel olarak ağ yapısı çözümün doğruluğu, süresi ve bellek ihtiyacı göz önüne alınarak değiştirilebilir. Bu işlem sonrasında belirlenen TYD seviyesine göre modele (sargılar ve sargı çıkış düzeneğine) gerilim uygulanır. Uygulanan gerilim sonrasında eş potansiyel çizgilerinin dağılımı Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Ağ modeli



Şekil 5.2. Eşpotansiyel çizgileri

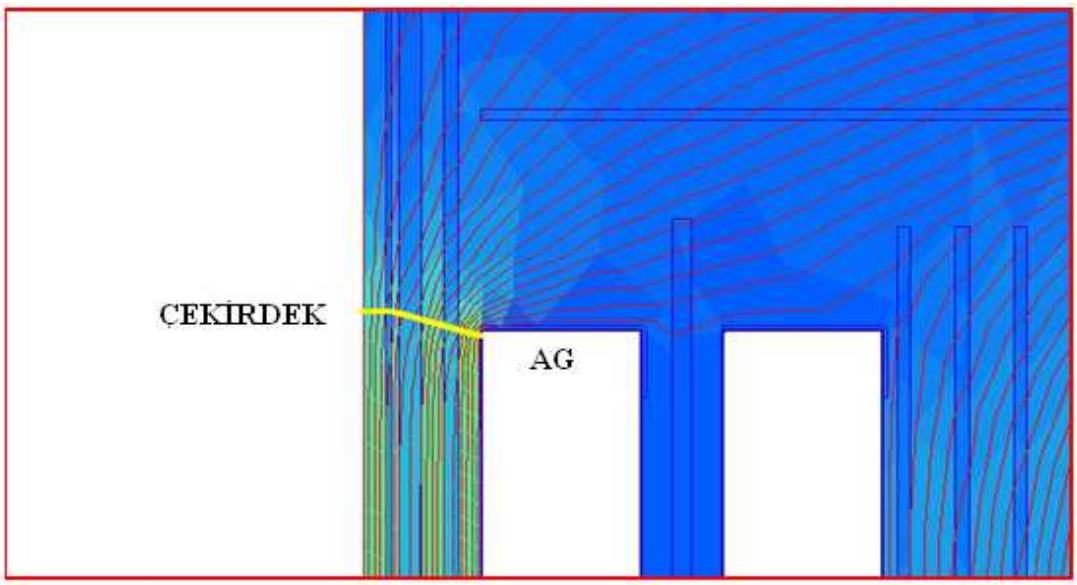


Şekil 5.3. Genel model için elektrik alan dağılımı

Şekil 5.3'te elektrik alan dağılımı görülmektedir. Bu model için 1, 2, 3, 4 nolu bölgeler için maksimum zorlanma değerleri aşağıda ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

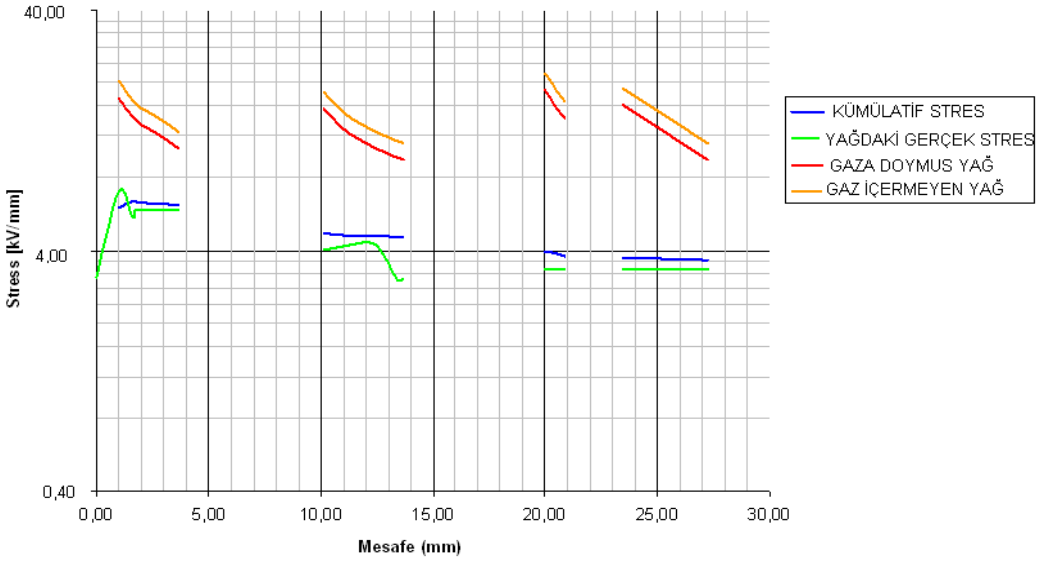
5.2. Bölgesel Değerlendirme

1 nolu bölge:



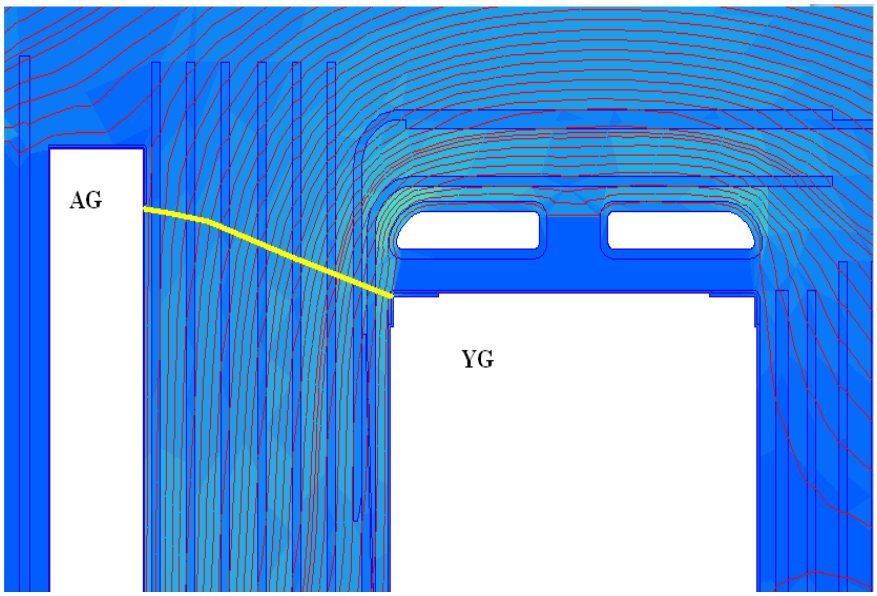
Şekil 5.4. Birinci bölgedeki alan dağılımı

1 no'lu bölge için maksimum stres değeri AG sargısının köşesinde oluşmaktadır ve ~6,5 kV/mm değerindedir. Şekil 5.4'te sarı ile gösterilen kritik yol boyunca alan değişimi Şekil 5.5'de verilmiştir. Görülebileceği gibi gerçekleşen stres dayanım değerlerinin altındadır. Kümülatif stres değeri baz alındığında yaklaşık %70 civarında marj bulunmaktadır.



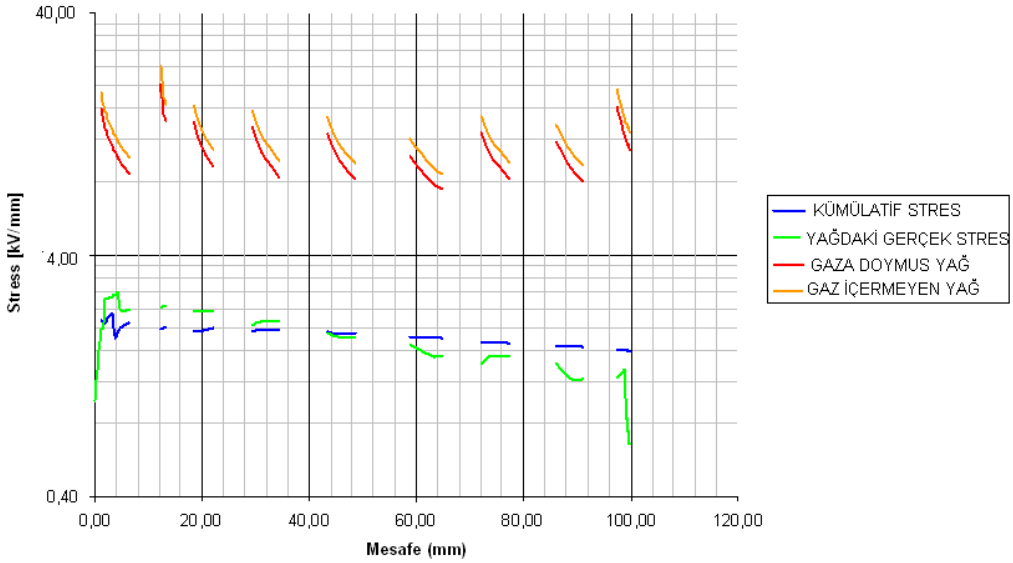
Şekil 5.5. Birinci bölgedeki kritik yol boyunca alan değişimi ve dayanım eğrileri

2 nolu Bölge:



Şekil 5.6. İkinci bölgedeki alan dağılımı

2 no'lu bölge için maksimum stres değeri YG sargısının üzerindeki sargı sonlandırma halkası köşesinde oluşmaktadır ve ~4,0 kV/mm değerindedir. Şekil 5.6'da sarı ile gösterilen YG sargı köşesi ile AG sargısı arasındaki kritik yol boyunca alan değişimi ise Şekil 5.7'de verilmiştir. Görülebileceği gibi gerçekleşen stres dayanım değerlerinin altındadır. Kümülatif stres değeri baz alındığında yaklaşık %100 civarında bir marj bulunmaktadır.



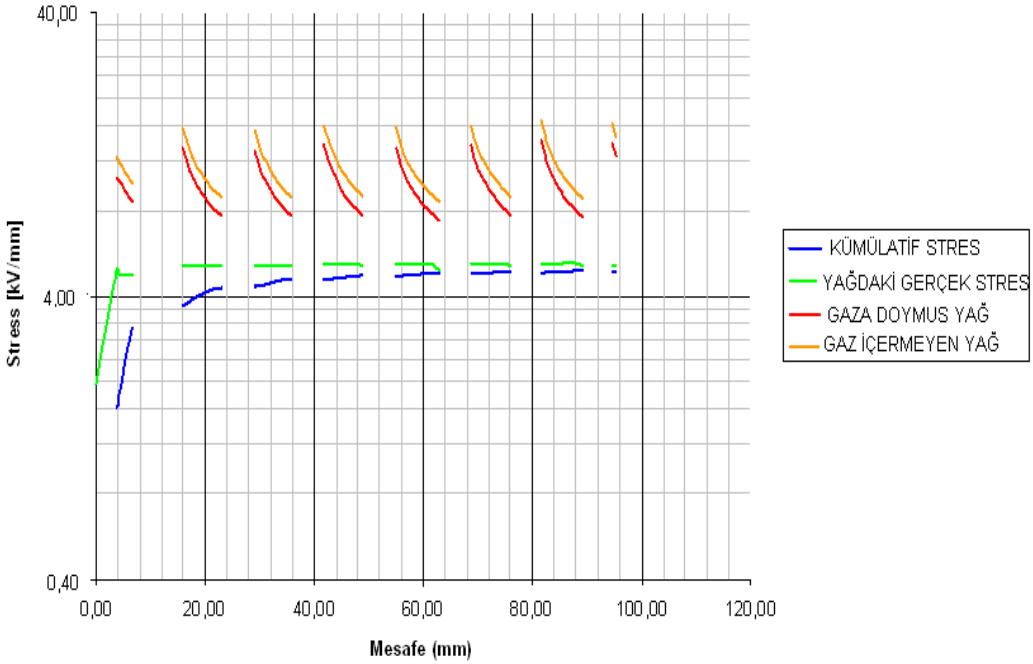
Şekil 5.7. İkinci bölgedeki kritik yol boyunca alan değişimi ve dayanım eğrileri

3 nolu Bölge:



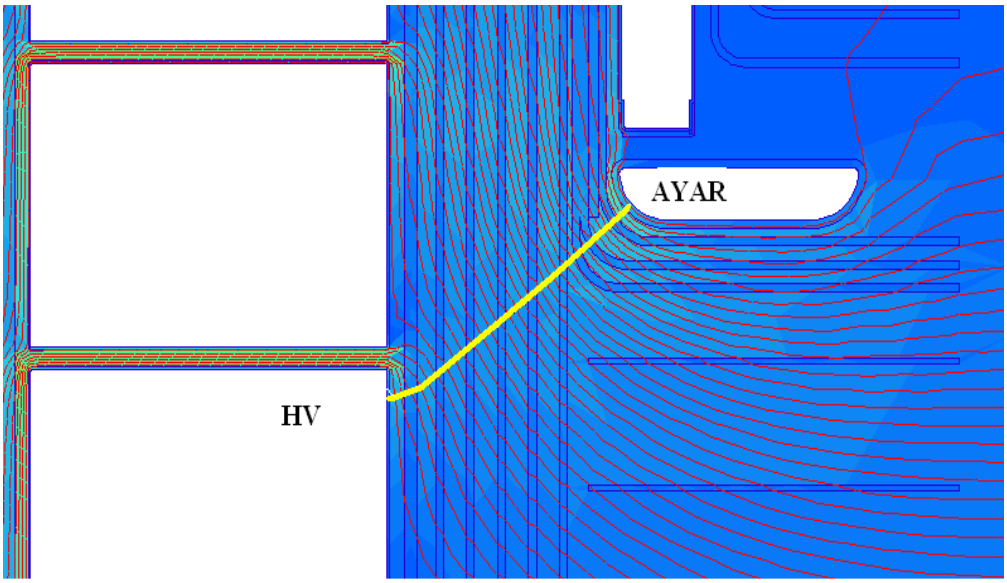
Şekil 5.8. Üçüncü bölgedeki alan dağılımı

3 no'lu bölge için maksimum stres değeri YG sargısının köşesinde bulunan köşe koruyucu üzerinde oluşmaktadır ve ~12,0 kV/mm değerindedir. Şekil 5.8'de sarı ile gösterilen YG sargı köşesi ile AG sargısı arasındaki kritik yol boyunca alan değişimi ise Şekil 5.9'da verilmiştir. Görülebileceği gibi gerçekleşen stres dayanım değerlerinin altındadır. Kümülatif stres değeri baz alındığında yaklaşık %55 civarında bir marj bulunmaktadır.



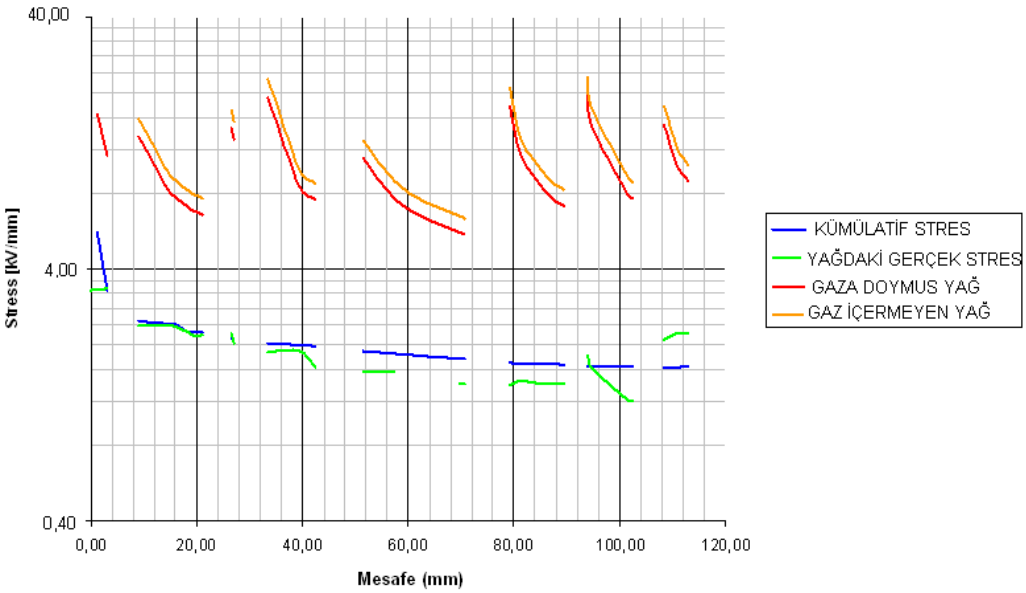
Şekil 5.9. Üçüncü bölgedeki kritik yol boyunca alan değişimi ve dayanım eğrileri

4 nolu bölge:



Şekil 5.10. Dördüncü bölgedeki alan dağılımı

4 no'lu bölge için maksimum stres değeri AYAR sargısının köşesinde bulunan sargı sonlandırma halkası üzerinde oluşmaktadır ve ~4,7 kV/mm değerindedir. Şekil 5.10'da sarı ile gösterilen AYAR sargı köşesi ile YG sargısı arasındaki kritik yol boyunca alan değişimi ise Şekil 5.11'de verilmiştir. Görülebileceği gibi gerçekleşen stres dayanım değerlerinin altındadır. Kümülatif stres değeri baz alındığında %100 den büyük marj bulunmaktadır.



Şekil 5.11. Dördüncü bölgedeki kritik yol boyunca alan değişimi ve dayanım eğrileri

6. SONUÇLAR

Yağ, yüzyılı aşkın süredir özellikle yüksek gerilim transformatörlerinde yalıtım amacı ile kullanılmaktadır. Yalıtım yapılacak bölgeye hiçbir boşluk kalmayacak şekilde dolarak etkin bir yalıtım ortamı sağlaması, ısı transferi konusunda etkin rol oynaması ve maliyetleri açısından yağlar, yüksek gerilim transformatörlerinin vazgeçilemeyen unsurlarından olmuştur. Yağların yalıtım amacı ile kullanılması bir asırdan daha fazla geçmişe sahip olsa da, günümüzde hala yağlardaki delinme işleminin tüm aşamalarını açıklayan bir teori bulunmamaktadır. Bunun en önemli nedeni, yağın saflığının yabancı maddelerin, gazların ve suyun etkisiyle çok kolay bir şekilde bozulabilmesidir.

Aynı fiziki koşullara ve aynı kimyasal yapıya sahip yağ üzerinde delinme gerilimi testi yapıldığında, farklı gerilimlerde delinme görülebilir. Bu nedenle kısmi deşarja başlama gerilimi olarak kabul edilen yağın delinme gerilim seviyesi, özellikle arıza analizinde kullanılan Weibull istatistiksel yöntemiyle belirlenir. Günümüzde yalıtım tasarımında kullanılan Weidmann eğrileri olarak bilinen tasarım eğrileri bu yollarla elde edilmiştir. Bu eğriler günümüzde hala güç transformatörlerinin yalıtım tasarımının omurgasını oluşturmaktadır. Bu eğrilerde kullanılacak emniyet katsayıları çeşitli parametrelere bağlı olarak firmadan firmaya değişse de, pek çok üretici tarafından kabul görmüş eğrilerdir.

Yüksek gerilim transformatörlerinde yağ ile birlikte kullanılan diğer en önemli yalıtım malzemesi ise selüloz bazlı katı yalıtım malzemesidir. Bu malzemeler selülozik yapıları nedeniyle yağı emerek daha yüksek delinme gerilim seviyesine ulaşırlar. Yüksek gerilim transformatörlerinde geniş yağ kanalarının daha küçük yağ kanallarına bölünmelerini sağlayarak, yağ kanalları arasında delinmeye yol açabilecek zayıf zincirlerin oluşma olasılıklarını düşürürler. Ayrıca katı yalıtım malzemesi yağ içerisinde oluşabilecek herhangi bir kısmi deşarjın önünde bariyer vazifesi görerek ilerlemesini engeller. Bu şekilde güç transformatörlerinde etkin bir yalıtım tasarımı yapılmasını sağlarlar. Maliyeti, yağ ile olan etkileşimi, yapısı

nedeniyle kolay şekil verilebilmesi ve mekanik kuvvetlere karşı gösterdiği mukavemet açısından sağladıkları, geçmişten günümüze kullanım avantajını korumasını sağlamıştır.

Transformatörler, işletme ömürleri boyunca çeşitli darbe gerilimlerine ve işletme gerilimine maruz kalır. Tasarlanan yalıtım sisteminin de bu gerilimlere dayanabilecek seviyede olması gerekir. Tasarım işlemini daha kolay bir şekilde yapabilmek için geçmişten bu güne bazı metotlar geliştirilmiştir. Örneğin, transformatörün test aşamasında maruz kalacağı gerilimlerin her birinin oluşturacağı etkisinin tek tek değerlendirilmesi yerine, hepsini kapsayan ortak bir gerilim seviyesi (TYS) ile tek analiz yapılabilir. Transformatör içindeki herhangi bir bölgede delinme meydana gelip gelmeyeceğinin değerlendirilmesi, bu bölgedeki elektrik alan dağılımının belirlenmesi ve bu değerlerin tasarım eğrileri ile karşılaştırılmasıyla sağlanır. Belirlenen kritik yol boyunca değişen değerler kümülatif eğrilere dönüştürülerek karşılaştırma yapılır. Bu metot güç transformatörlerinin yalıtım tasarımında kullanılan, üreticiler tarafından kabul görmüş ortak diğer bir metottur. Güç transformatörleri içinde yağ kanalları arasında görülen arızaların yanı sıra elektrik alan dağılımına bağlı olarak katı yalıtım malzemesinin yüzeyinde krepaj yürümesi olarak da arızalar görülebilir. Yapılan tasarımın krepaj dayanımının belirlenmesi de yine yağ kanalı dayanımının belirlenmesine benzer şekilde yapılır.

Günümüzde transformatörler içerisindeki değişik bölgelerde elektrik alan dağılımının hesaplanması için çeşitli sayısal yöntemler (örneğin, Sonlu Elemanlar Yöntemi) kullanarak analiz yapan programlar kullanılmaktadır. Bu programlar sayesinde oluşturulan sistemin yüksek kesinlikte detaylı olarak analizi yapılabilir. Analizi yapılan sistemde belirlenecek kritik yollar boyunca sistemin dayanımı irdelenerek hızlı ve yüksek güvenilirlikte tasarımlar gerçekleştirilebilir. Yapılan tasarımların uygunluğu yapılacak olan transformatör testleri sonrasında teyit edilir.

Bu çalışma kapsamında yapılan benzetim çalışmasının sonuçları incelendiğinde, belirlenen bölgelerdeki yağ kanallarının yalıtım dayanımının, bu bölgelerdeki kritik yollar boyunca oluşan stres değerlerinden marjlı olarak yüksek olduğu görülmektedir. Bu bağlamda mevcut tasarım eğrileri ile belirlenen bölgelerdeki yağ kanalları değerlendirildiğinde, yağ kanallarının tehlikeye yol açabilecek kısmi deşarj

değerlerine ulaşmayacağı ve tasarımın güvenli olduğu söylenebilir. Fakat tezin genelinde pek çok yerde vurgulanmaya çalışıldığı üzere, elde edilen analiz sonuçları doğrultusunda yağ kanallarından herhangi birinde delinme gerçekleşmeyeceği söylenemez. Çünkü yalıtım dayanımı işçilik kalitesi, malzeme kalitesi v.b. parametrelere bağlı olarak değişim gösterir. Ayrıca mevcut tasarım eğrileri istatistiksel yöntemler ile elde edilmiş eğriler olup, belirlenen sınırlar altında arıza olasılığının çok düşük olduğunu söylemektedir. Günümüzde pek çok yüksek gerilim transformatörü üreticisi, öngörülen yalıtım sisteminin güvenilirliğini bu şekilde teyit etmektedir.

Güç transformatörleri elektrik ağının en önemli elemanlarındandır. Günümüzde 1200 kV seviyesine kadar çıkmış olan gerilim seviyesi, güç transformatörlerinin yalıtım sisteminin giderek karmaşıklaşmasına ve transformatör maliyetinde önemli yer tutmasına neden olmaktadır. Transformatörlerde oluşacak yalıtım kaynaklı arızaları ve bunların etkilerini en aza indirebilmek için, tasarlanan sistemin maruz kalabileceği gerilimlere dayanabilecek düzeyde olması gerekmektedir. Bu bağlamda tasarımın optimum olarak yapılabilmesi hem kullanılan malzemelerin yapısının, özelliklerinin ve birbirleri ile etkileşimlerinin iyi bilinmesi hem de tasarım ile ilgili detayların irdelenebilmesi ile gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

[1] Abdel-Salam M., Anis H., El-Morshedy A., Radwan R., *High Voltage Engineering Theory and Practic*, 2nd ed., Marcel Dekker, Basel, 2000.

[2] Kuffel E., Zaengl W. S., Kuffel J., *High Voltage Engineering Fundementals*, 2nd ed., Newnes, Oxford, 2000.

[3] Wadhwa C. L., *High Voltage Engineering* , 2nd ed., New Age, New Delhi, 2007.

[4] Wang X., Partial Discharge Behaviours and Breakdown Mechanism of Ester Transformer Liquids Under AC Stress, PhD Thesis, The University of Manchester, Faculty of Engineering and Physical Sciences, Manchester, 2011.

[5] Liu Q., Electrical Performance of Ester Liquids Under Impulse Voltage for Applıcation in Power Transformers, PhD Thesis, The University of Manchester, Faculty of Engineering and Physical Sciences, Manchester, 2011.

[6] Robert M. V., Bertrand P., Pierre T. F., Dilipkumar M. S., Rajendra A., *Transformer Design Principles With Applications to Core-Form Power Transformers* , 1nd ed., CRC, New York, 2002.

[7] Kulkarni S. V., Khaparde S. A., *Transformer Engineering Design Practise* , 1nd. ed., Marcel Dekker, New York, 2005.

[8] Nelson J. K., An assessment of the physical basis for the application of design criteria for dielectric structures, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1989, **24**, 835–847.

[9] Nelson J. K., Salvage B., Sharpley W. A., Electric strength of transformer oil for large electrode areas, *Proceedings IEE*, 1971, **118**, 388–393.

[10] Krause C., Dielectric strength of transformer oil: Impact of oil flow, moisture and cellulose particles, *WICOR Insulation Conference*, Switzerland, September 1996.

[11] Moser H. P., *Transformerboard*, 1st ed., Scientia Electrica, Switzerland, 1979.

[12] Kao K. C., Theory of high field electric conduction and breakdown in dielectric liquids, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1976, **11**, 121–128.

[13] Clark F. M., Water Solution in High-Voltage Dielectric Liquids, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1940, **59**, 433-441.

[14] Chen G., Zuber M. H., Pre-breakdown characteristics of contaminated power transformer oil, *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, DOI: 10.1109/CEIDP.2007.4451551.

[15] Martin D., Wang Z. D., Statistical analysis of the AC breakdown voltages of ester based transformer oils, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2008, **15**, 1044-1050.

[16] Heathcote M. J., *The J&P Transformer Book*, 12th ed., Newnes, Oxford, 1998.

[17] IEC 60641-3-1, Pressboard and presspaper for electrical purposes – Part 3, Edition 2.0, 2007-11.

[18] IEC 60554-3-1, Specification for cellulosic papers for electrical purposes – Part 3, Edition 1.0, 1979-01.

[19] IEC 60763-3-1, Laminated pressboard for electrical purposes – Part 3, Edition 2.0, 2010-8.

[20] IEC 61061-3-1, Non-impregnated densified LW for electrical purposes –Part 3:, Edition 1.0, 2001-07.

[21] Sezer M., *Trafo Bakımı ve Yalıtım Yağı*, 1. basım, BEST, Türkiye, 2009.

[22] Borsi H., Gockenbach E., Natural and synthetic ester liquids as alternative to mineral oil for power transformer, *IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation Dielectric Phenomena*, DOI: 10.1109/CEIDP.2008.4772928.

[23] Dai Z., Wang D., Jarman P., Moisture and aging effect on the creepage discharge characteristics at the oil/transformer-board interface under divergent field, *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, DOI: 10.1109/CEIDP.2008.4772837.

[24] Karsai K., Kerenyi D., Kiss, L., *Large Power Transformers*, 3st. ed., Elsevier Publication, Hungary, 1987.

[25] Tschudi D. J., AC insulation design: paper-oil insulation systems, *WICOR Insulation Conference*, Switzerland, September 1996.

[26] Dai J., Wang Z. D., Jarman P., Characteristics at the oil/transformer-board interface under divergent field, *IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation Dielectric Phenomena*, DOI: 10.1109/CEIDP.2008.4772837.

[27] Dahinden V., Schultz K., Kuchler A., Function of solid insulation in transformers, *Transform 98*, Germany, April 1998.

[28] Nelson J. K., Some steps toward the automation of the design of composite dielectric structures, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1994, **1**, 663–671.

[29] Ma A. Q., Zhang Z. S., End insulation electric field analysis and design optimization of 500 kV power transformer based on ANSYS, *IEEE PES ISGT*, DOI: 10.1109/ISGT-Asia.2012.6303260.

[30] Ziomek W., Vijayan K., Boyd D., Kuby K., Franchek M., High voltage power transformer insulation design, *IEEE Electrical Insulation Conference*, DOI: 10.1109/EIC.2011.5996148.

[31] Derler F., Kirch H. J., Krause C., Schneider E., Development of a design method for insulating structures exposed to electric stress in long oil gaps and along oil/transformerboard surfaces, *International Symposium on High Voltage Engineering*, Germany, August 1991.

[32] Krause C., Consogno G., Witte K. H., Economic design of power transformers high voltage lead-exits applying optimized transformerboard barrier systems, *XIV. International symposium of HV Engineering*, China, August 2005

[33] SLIM Electromagnetic Engineering Software, ALSTOM R&D Center.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] **Yıldız H. A**., İsmailoğlu H., Güç Transformatörlerinde Kullanılan Selüloz Bazlı Katı ile Sıvı Yalıtım Malzemelerinin Özellikleri ve Etkileşimleri, *III. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi,* TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, İzmir, 21-24 Kasım 2013.

ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Erzincan'da doğdu. İlk, orta, lise öğrenimini Antalya 'da tamamladı. 2001 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden 2007 yılında mezun oldu. 2008-2009 yılları arasında Rusya'da çalıştı. 2010-2012 yılları arasında ENPAY A.Ş.'de yüksek gerilim tasarım mühendisi olarak çalıştı. 2012 yılından beri ALSTOM A.Ş. bünyesinde transformatör tasarım mühendisi olarak görev yapmaktadır.