İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOĞRUSAL OLMAYAN DİRENÇLİ KORUMA ELEMANLARININ MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Fatih ERBAŞ

Anabilim Dalı: Elektrik Mühendisliği

Programı: Elektrik Mühendisliği

ŞUBAT 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOĞRUSAL OLMAYAN DİRENÇLİ KORUMA ELEMANLARININ MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Fatih ERBAŞ

(504061012)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 29 Aralık 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 19 Ocak 2009

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Kevork MARDİKYAN (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Önder GÜLER (İTÜ)

ŞUBAT 2009

ÖNSÖZ

Beni bütün çalışma boyunca yönlendiren, zamanından ve bilgilerinden yararlandığım değerli hocam Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ'ye, sonlu elemanlar yöntemini anlamamı sağlayan arkadaşım Kaan KUTUCU'ya, yüksek lisans öğrenimim boyunca verdiği maddi destekten dolayı TÜBİTAK'a ve her zaman yanımda olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Aralık 2008

Mehmet Fatih ERBAŞ

Elektrik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **xiii**
SUMMARY ..... **xv**
1. GİRİŞ **1**
2. METAL OKSİT PARAFUDRLAR **3**
2.1 Çalışma İlkeleri 3
2.2 Parafudrların Gelişim Süreci 4
2.3 Porselen ve Polimer Parafudr Gövdeleri 5
2.4 Metal Oksit Parafudrun Yapısı 7
2.4.1 Metal oksit direnç içeriğindeki bileşenler 7
2.4.2 Çinko oksit elemanı 7
2.5 Silisyum Karbür ve Metal Oksit Parafudrların Karşılaştırılması 8
2.6 Parafudrlar ile İlgili Tanımlamalar 9
3. METAL OKSİT PARAFUDRLARIN ISIL ÖZELLİKLERİ **13**
3.1 Isıl Bozulma Olayı 13
3.2 Isınma Soğuma Karakteristikleri 14
4. METAL OKSİT PARAFUDRLARDA GERİLİM DAĞILIMI **17**
4.1 Parafudrun Gerilim Dağılımının Bulunması İçin Yapılan Çalışmalar 17
4.2 Gerilim Dağılımını Düzenlemek İçin Yapılan Çalışmalar 21
4.2.1 Alan düzenleyicinin yerinin etkisi 22
4.2.2 Alan düzenleyicinin kesitinin etkisi 24
4.2.3 Ara halka kullanılmasının etkileri 25
4.2.4 Kirlenme durumlarındaki gerilim dağılımının incelenmesi 26
5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ **29**
5.1 Yöntemin Tanıtılması 29
5.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Üç Boyutlu Problemlerin Çözümü 30
6. SEY İLE YAPILAN MODELLEMELER **41**
6.1 Örnek Parafudr Modelinin Oluşturulması 41
6.2 Alan Düzenleyici Eklenmesi 46
6.3 Aynı Parafudr İçin İzolatör Malzemesinin ve Gerilim Seviyesinin Değiştirilmesi 48
6.4 Çeşitli Kirlenme Durumlarının İncelenmesi 51
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER **63**
KAYNAKLAR **67**

KISALTMALAR

SiC	**:** Silisyum Karbür
MO	**:** Metal Oksit
IEEE	**:** Institute of Electrical and Electronics Engineers
ZnO	**:** Çinko Oksit
JEC	**:** Japanese Electrotechnical Committee
ANSI	**:** American National Standards Institute
IEC	**:** International Electrotechnical Commission
SEY	**:** Sonlu Elemanlar Yöntemi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Sıcaklığa Bağlı Isıl Enerji Değerleri. 15
Çizelge 4.1 : İki Farklı Alan Düzenleyici Pozisyonu İçin Disklerdeki Maksimum Gerilim Sapması. 24
Çizelge 4.2 : Farklı Kesit Değerleri İçin Maksimum Gerilim Sapması. 24
Çizelge 4.3 : 3 kV ve 6 kV'luk Diskler İçin Maksimum Gerilim Sapması. 25
Çizelge 4.4 : Ara Halkaların Değişik Konumları İçin Maksimum Gerilim Sapmaları. 26
Çizelge 4.5 : Çeşitli Kirlenme Seviyeleri İçin Maksimum Gerilim Sapması. 28
Çizelge 6.1 : Çeşitli Durumlar İçin Aynı Noktalardan Alınmış Potansiyel Değerleri..... 56

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : 10 kV-45 kV Arası Porselen Gövdeli Parafudrlar..... 3
Şekil 2.2 : 180 kV-624 kV Arası Polimer Gövdeli Parafudrlara Bir Örnek..... 4
Şekil 2.3 : Porselen Gövdeli Parafudrun Bağlantı Noktasının Kesiti..... 5
Şekil 2.4 : Porselen ve Polimer Parafudr Gövdeleri ve Dirençleri..... 6
Şekil 2.5 : Porselen ve Polimer Gövdeli Parafudrlar..... 6
Şekil 2.6 : (a) Çinko Oksit Direncin Yapısı; (b) Akım - Gerilim Karakteristiği..... 8
Şekil 2.7 : Metal Oksit ve Silisyum Karbür Dirençlerin Akım-Gerilim Karakteristikleri …..... 9
Şekil 2.8 : Örnek Bir Darbe Gerilimi. 11
Şekil 3.1 : Çinko Oksit Elemanının Akım-Gerilim Karakteristiğinin Sıcaklıkla Değişimi. 13
Şekil 3.2 : Çinko Oksit Direncin Sıcaklıkla P-Q Değişimi. 14
Şekil 3.3 : Üç Farklı Başlangıç Sıcaklığı İçin Soğuma Eğrisi (1.4 W/(m2.K))..... 15
Şekil 3.4 : Üç Farklı Başlangıç Sıcaklığı İçin Soğuma Eğrisi (14 W/(m2.K))..... 16
Şekil 4.1 : Bir Metal Oksit Diskin Eşdeğer Devresi..... 18
Şekil 4.2 : Üç Metal Oksit Diski Olan Örnek Bir Parafudrun Modeli. 18
Şekil 4.3 : Değişik Durumlarda Parafudr Kolonundaki Gerilim Dağılımları..... 19
Şekil 4.4 : Epoksi Kaplama Parafudrun Kesit Görüntüsü. 20
Şekil 4.5 : E1'e 100 V, E4'e 0 V Uygulanması Durumunda Parafudrun Gerilim Dağılımı. 20
Şekil 4.6 : Bir Metal Oksit Parafudrun Kesiti. 21
Şekil 4.7 : Farklı Alan Düzenleyici Yükseklikleri İçin 220 kV'luk Parafudrdaki Gerilim Dağılımı. 23
Şekil 4.8 : Farklı Alan Düzenleyici Yükseklikleri İçin 400 kV'luk Parafudrdaki Gerilim Dağılımı. 23
Şekil 4.9 : Çeşitli Kirlenme Seviyelerinde 220 kV Parafudrdaki Gerilim Dağılımı. 27
Şekil 4.10 : Çeşitli Kirlenme Seviyelerinde 400 kV Parafudrdaki Gerilim Dağılımı. 27
Şekil 5.1 : Üç Boyutlu Örnek Bir Eleman. 30
Şekil 5.2 : Bir Biçim İşlevinin Değişimi. 35
Şekil 6.1 : Parafudrun Boyuna Kesit Çizimi 41
Şekil 6.2 : Parafudrun Oluşturulan Sonlu Elemanlar Ağı..... 42
Şekil 6.3 : Parafudr Üzerindeki Potansiyel Dağılımı..... 42
Şekil 6.4 : Parafudr Üzerindeki Gerilim Dağılımının Grafiği. 43
Şekil 6.5 : Gerilim Dağılımı Grafiğinin Parafudr Üzerinden Alındığı Sınır. 43
Şekil 6.6 : Silisyum Karbür Dirençli Parafudrun İç ve Dış Görünüşü 44
Şekil 6.7 : Silisyum Karbür Dirençli Parafudrun Boyuna Kesit Çizimi..... 44
Şekil 6.8 : Silisyum Karbür Dirençli Parafudr İçin Bulunan Potansiyel Dağılımı.... 45
Şekil 6.9 : SiC Dirençli Parafudr Üzerindeki Gerilim Dağılımının Grafiği. 46
Şekil 6.10 : Farklı Alan Düzenleyici Elektrot Yükseklikleri İçin Gerilim Dağılımları 47

Şekil 6.11 : Parafudr Boyunun %86 Yüksekliğindeki Alan Düzenleyici İçin Farklı Halka Çaplarındaki Gerilim Dağılımları. 47
Şekil 6.12 : Parafudrun Alan Düzenleyici Eklendiğindeki Üç Boyutlu SEY Ağı..... 48
Şekil 6.13 : Alan Düzenleyici Elektrot Varken Parafudr Üzerindeki Gerilim Dağılımının Grafiği. 48
Şekil 6.14 : Parafudr İzolatörünün Porselen Olması Durumu. 49
Şekil 6.15 : Porselen İzolatör ve Alan Düzenleyici Olması Durumu. 49
Şekil 6.16 : Gerilim Seviyesinin 42 kV Olması Durumu. 50
Şekil 6.17 : Gerilim Seviyesi 42 kV ve Alan Düzenleyici Olması Durumu. 50
Şekil 6.18 : Sadece En Üstteki Etekte 1 mm Kalınlığında Su (εr = 80) Olması ve Eteğin Ucundan Suyun Damlaması Durumu. 52
Şekil 6.19 : Beş Etekte de 2 mm Kalınlığında Buz (εr = 3.5) Olması Durumu. 52
Şekil 6.20 : Beş Etekte de 2 mm Kalınlığında Kir (εr = 3) Olması Durumu. 53
Şekil 6.21 : Beş Etekte de 2 mm Kalınlığında Kir (εr = 10) Olması Durumu..... 53
Şekil 6.22 : Beş Etekte de 4 mm Kalınlığında Kir (εr = 10) Olması Durumu..... 54
Şekil 6.23 : Beş Etekte de 4 mm Kalınlığında Buz (εr = 3.5) Olması ve Eteğin Ucundan Buzun Sarkıt Halinde Uzanması Durumu. 54
Şekil 6.24 : (a) Parafudr Eteğinin Ucundan Suyun Damlaması (b) Buzun Sarkıt Halinde Uzanması. 55
Şekil 6.25 : Çeşitli Kirlenme Durumları İçin Potansiyel Değeri Alınan 15 Nokta. .. 55
Şekil 6.26 : Tüm Kirlenme Durumlarında Gerilim Dağılımları. 56
Şekil 6.27 : Normal Durum ve Üç Farklı Kirlenme Durumunun Gerilim Dağılımı Grafikleri. 57
Şekil 6.28 : Normal Durum ile En Üst Etekte Su Olması Durumlarının Grafikleri.. 58
Şekil 6.29 : Normal Durum ile Eteklerde Buz Birikmiş Durumların Grafikleri. 58
Şekil 6.30 : Normal (Temiz ve Alan Düzenleyicisiz) Parafudrda Elektrik Alan Dağılımı 59
Şekil 6.31 : Alan Düzenleyici Elektrot Eklendiği Durumdaki Elektrik Alan Dağılımı. 59
Şekil 6.32 : Eteklerde 4 mm Kalınlığında Kir (ε_r = 10) Olduğundaki Elektrik Alan Dağılımı. 60
Şekil 6.33 : Silisyum Karbür Dirençli Parafudrda Elektrik Alan Dağılımı. 61

DOĞRUSAL OLMAYAN DİRENÇLİ KORUMA ELEMANLARININ MODELLENMESİ

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak metal oksit parafudrun bir modelini oluşturup, çeşitli durumlardaki gerilim dağılımlarını incelemektir. İlk olarak parafudr tanımlaması yapılıp, tarihsel gelişimine değinilmiştir. Metal oksit parafudrların kullanılmaya başlanmasından, silisyum karbür parafudrlar ile aralarındaki farklardan söz edilip, yapıları hakkında bilgi verilmiştir. Bunun ardından parafudrların ısıl özellikleri anlatılıp, bugüne kadar yapılmış olan çalışmaların sonuçlarından söz edilmiştir. Parafudrun ısıl tasarımının ne kadar önemli olduğu ve ısıl bozulmaya gitmesini önlemek için neler yapılması gerektiği örnekler ile verilmiştir.

Bugüne kadar parafudr üzerindeki gerilim dağılımını incelemek için bir çok çalışma yapılmış olup, hepsinin sonucunda dağılımın düzensiz olduğu görülmüştür. Bu çalışmalardan bir kısmı, gerilim dağılımının nasıl daha düzenli hale getirilebileceği konusuna yoğunlaşmış olup, son derece etkili çözümler önermiştir. Bunlardan bazıları örnekleri ile birlikte verilmektedir. Bu sonuçlardan da görülebileceği üzere, parafudr elemanları üzerinde yapılacak basit değişiklikler, gerilim dağılımını düzenlemede etkili sonuçlar vermektedir. Gerilim dağılımı ne kadar düzensiz olursa, en üstteki çinko oksit disk diğer disklere göre o kadar daha fazla bir gerilime, dolayısıyla da ısıl zorlanmaya maruz kalmaktadır. Bu durum da en üstteki diskin ısıl bozulmaya gitmesine, dolayısıyla da tüm parafudrun bozulmasına sebep olabilir.

Bu konular anlatıldıktan sonra, modellemede kullanılacak olan sonlu elemanlar yönteminin tanımlaması ve formülasyonu verilmiştir. Son bölümde ise örnek bir parafudr modeli oluşturularak, çeşitli durumlardaki gerilim dağılımı incelenmiştir. Farklı kirlenme durumları için modellemeler yapılıp, grafiksel olarak birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bu zamana kadar kirlenme analizi için yapılan çalışmaların çoğunun aksine, mümkün olduğunca gerçek kirlenme durumları için modellemeler yapılmıştır.

MODELLING OF PROTECTION ELEMENTS WITH NON-LINEAR RESISTOR

SUMMARY

The goal of this study is, creating a model of metal oxide surge arrester by using finite elements method and analyse voltage distribution for different cases. First, surge arrester description and historical evolution were explained. Starting of metal oxide surge arrester using, it's difference with silicon carbide surge arrester and chemistry were told. After these, thermal properties and studies were mentioned. It was told with examples that how important thermal design is and what can be done to avoid thermal runaway.

So many studies were made about voltage distribution on surge arrester till now and all of them found that the distribution is non uniform. Some of these studies were interested in making the voltage distribution uniform and got effective results. A few results were mentioned with examples. As can be seen from these results, making some simple changes on surge arrester elements can give effective results on distribution uniformity. The zinc oxide disc at top is exposed to voltage and thermal stress more than other discs according to the voltage distribution's non-uniformity. This situation may cause the top disc to go thermal runaway and as a result of this, complete surge arrester may be broken down.

After these topics were mentioned, definition and formulation of finite elements method, which was used in modeling, were given. In last section, an example surge-arrester model was created and voltage distributions for different cases were analysed. Models for different pollution situations were made and the results were compared graphically. Contrarily to most of the studies, which were interested in pollution situations, modellings were made for the real pollution cases as much as possible.

1. GİRİŞ

Parafudrlar, enerji sistemlerini her türlü aşırı gerilime karşı koruyan elemanlardır. Temelde silisyum karbür (SiC) ve metal oksit (MO) dirençli parafudrlar olmak üzere ikiye ayrılırlar. Daha detaylı olarak; kullanıldıkları yerlerdeki koşullar, yalıtım ortamları, gövdelerinin porselen ya da polimer olması gibi çeşitli durumlara göre alt sınıflara ayrılabilirler. IEEE standartlarına göre parafudr; darbe akımını yönlendirerek koruduğu aygıt üzerindeki darbe gerilimini sınırlayan ve aygıtı normal çalışma durumuna geri getiren koruma elemanıdır. Metal oksit parafudr ise; doğrusal olmayan direnç karakteristikli metal oksit malzemelerden üretilen direnç elemanlarını kullanan bir parafudr türüdür [1].

Enerji sistemleri tasarlanırken göz önünde bulundurulan en önemli faktörlerden biri sistemin aşırı gerilimlere karşı korunmasıdır. Yıldırım, anahtarlama, rezonans gibi çeşitli sebeplerden dolayı oluşan aşırı gerilimler sisteme zarar vermektedir. Bu durumlara karşı koruma sağlamak için kullanılan ilk düzenekler atlama aralıklarıdır. Bunlar zamanla sistemlerin daha büyük ve karmaşık hale gelmesiyle geliştirilerek ilk parafudr yapısı olan silisyum karbür dirençli parafudrlar oluşturulmuştur. Giderek artan güvenli koruma gereksinimi, üreticileri daha gelişmiş parafudr biçimlerini üretmeye yöneltmiştir. Bu sayede metal oksit parafudrlar üretilmiş ve birçok uygulamada silisyum karbürlü parafudrlara göre tercih edilmeye başlanmışlardır. Günümüzde de giderek daha önemli bir hale gelmektedirler [2].

Atlama aralıklarına ihtiyaç duyulmayan metal oksit parafudrların üretilmesi birçok gelişmenin önünü açmıştır. Gerek teorik olarak yapılan araştırmalar, gerekse pratikte deneysel olarak yapılan çalışmalar sayesinde parafudrun enerji kapasitesi, çalışma ömrü, dayanıklılığı gibi konularda iyileştirmeler sürekli olarak devam etmektedir. Malzeme teknolojisinin gelişmesiyle, metal oksit parafudrlarda kullanılan doğrusal olmayan çinko oksit (ZnO) direnç elemanı da iyileştirilerek, daha iyi performans, daha kararlı çalışma gibi sonuçlar elde edilmektedir. Porselen gövde malzemesinden polimer malzemeye geçilmesi, parafudrun mekanik karakteristiğinin geliştirilmesinin önünü açmıştır [3]. Çok yüksek gerilim seviyelerine çıkıldığında parafudr tipinde ve

yapısında değişiklik yapmak gerekmektedir. Örneğin 1000 kV'luk bir sistem için, gaz yalıtımlı ve tek bir kolon yerine 4 adet birbirine eş direnç kolonunun olduğu özel bir parafudr kullanılmaktadır. Buna ek olarak birden fazla alan düzenleyicisi bulunmaktadır. Böyle bir parafudrun teorik olarak da deneysel olarak da incelenmesi ve geliştirilmesi, diğerlerinden farklı çalışmalar gerektirir [4]. Sürekli yapılan iyileştirme çalışmaları sonucunda, ileride 1000 kV gerilim seviyesi için normal, tek kolonlu bir parafudr kullanmak mümkün olabilir. Fakat şu an için çok yüksek gerilimlere çıkıldığında özel tip parafudrlar kullanılması zorunludur.

Metal oksit parafudrların en önemli sorunu, üzerindeki gerilim dağılımının düzenli olmamasıdır. Direnç kolonunda yukarıdaki direnç diskleri aşağıdakilere göre daha büyük bir gerilime maruz kalırlar ve bu da en üstteki diskin ısıl olarak diğerlerinden daha fazla zorlanmasına sebep olur. Bu durum en üstteki diskin ısıl bozulmasına ve sonuç olarak da tüm parafudrun arızalanmasına neden olabilir [5, 6]. Bu konuda yapılan araştırmaların bir kısmı elemanların karakteristiklerini iyileştirmeye çalışırken bir kısmı da geometrilerini değiştirmeye yönelmiştir. Karakteristiklerin iyileştirmesi malzeme teknolojisinin gelişmesine bağlıdır. Buna karşın elemanların geometrik şekillerinde yapılabilecek çok basit değişikliklerin gerilim dağılımını düzenlemede önemli katkıları olduğu görülmüştür [6].

Bu çalışmanın amacı, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak bir parafudr modeli oluşturarak gerilim dağılımını inceleyip, daha düzenli hale getirmek için yapılması gerekenleri belirlemektir. Yapılan çalışma sonucunda düzensizliğin en önemli sebebinin parafudrun boyunun artması olduğu görülmüştür. Gerilim seviyesi arttıkça parafudrun boyu da artacağından, yüksek gerilim parafudrların tasarımı alçak ve orta gerilim parafudrlarına göre çok daha zor ve karmaşıktır. Bu nedenle 1000 kV'luk bir enerji sistemi için normal bir parafudr kullanılamayıp, gaz yalıtımlı, 4 kolonlu bir parafudra ihtiyaç duyulmuştur.

Bu zamana kadar yapılmış olan kirlenme durumu analizlerinin birçoğunda, parafudr dışında kir tabakasının eşit bir şekilde yayıldığı varsayılarak sadece dış yüzey iletkenliği değiştirilmiştir. Bu çalışma da ise, gerçekte karşılaşılabileceği düşünülen kirlenme durumları için modellemeler yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

2. METAL OKSİT PARAFUDRLAR

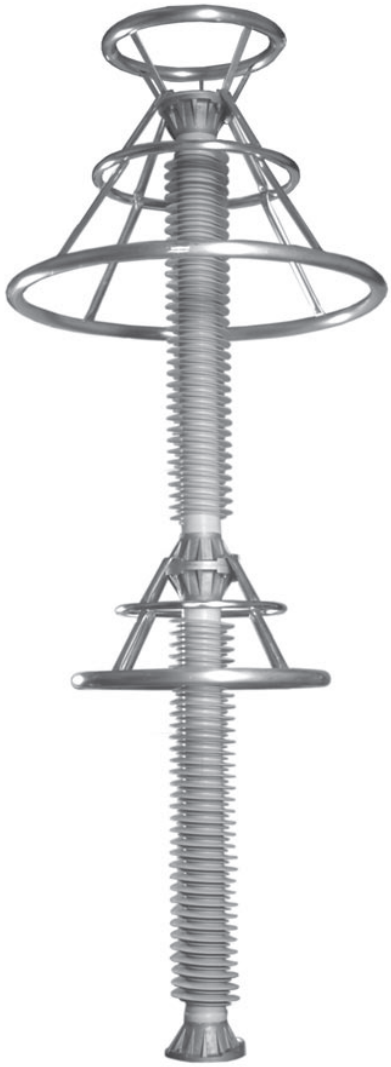
Bu bölümde, tezde modellemesi yapılacak olan metal oksit parafudrları tanıtmak amacıyla, çalışma ilkeleri, tarihsel gelişim süreçi ve yapısal özellikleri açıklanmıştır.

2.1 Çalışma İlkeleri

Parafudrlar enerji sistemlerinde kullanılan, aşırı gerilim yükselmeleri durumunda kısa devre özelliği göstererek hattın geriliminin tehlikeli bir şekilde yükselmesini önleyen cihazlardır (Şekil 2.1, Şekil 2.2). Parafudra ulaşan bir aşırı gerilim dalgasıyla uyarılan direnç blokları, direnç değeri azalarak büyük değerli bir akımın üzerlerinden akmasını sağlar ve böylece aşırı gerilim yükselmesini kısa sürede sınırlar. Aşırı gerilim dalgasının geçmesinden sonra azalmaya başlayan gerilim değeriyle birlikte direnç bloklarının direnç değeri hızla yükselerek akan akım azaltılır ve normal seviyesine indirilir [7].



Şekil 2.1: 10 kV-45 kV Arası Porselen Gövdeli Parafudrlar [8].

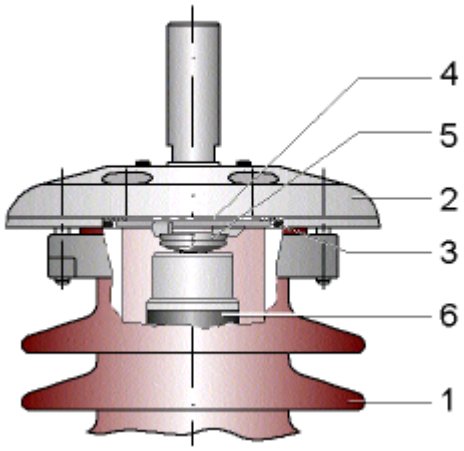


Şekil 2.2: 180 kV-624 kV Arası Polimer Gövdeli Parafudrlara Bir Örnek [9].

2.2 Parafudrların Gelişim Süreci

İlk parafudrlar silisyum karbürden oluşan doğrusal olmayan (non-lineer) karakteristikli dirençler ve bu dirençlere seri olarak bağlı bulunan belirli hava aralıklı seri eklatörlerden oluşmaktadır. Seri eklatörlerin görevleri, parafudrun çalışmaya başlama gerilimine kadar şebekenin yalıtım düzeyini korumak, bu gerilim değerine ulaşıldığında gecikmesiz olarak çalışmak ve ard akımını sıfırdan geçişi sırasında kesmektir [10]. Fakat seri atlama aralıklarının getirdiği birçok sorun yüzünden silisyum karbür parafudrlar her zaman başarılı bir şekilde kullanılamamışlardır [11]. Metal oksit parafudrlar ise atlama aralıksız ve çoğunlukla çinko oksit içerikli doğrusal olmayan karakterli direnç elemanlarından oluşmaktadırlar. Yapılarında bir veya birden fazla disk şeklindeki metal oksit direnç kolonları bulunur. Kolonları

oluşturan kısa silindirik diskler, çinko oksit taneciklerin sıkıştırılıp ısıl bir işleme maruz kalması sonucu oluşurlar [5]. Bir kolondaki disklerin adedi, sürekli en yüksek işletme gerilimine göre tespit edilir [12]. Bu kolonların sayısının ya da boylarının arttırılmasıyla parafudrun dayanabileceği gerilim ve enerji seviyesi de arttırılmış olur. Paralel kolon kullanılması durumunda, akımın aralarında eşit dağılması için paralel kolonlar dikkatli bir şekilde birbirine eş olarak üretilmelidirler. Şekil 2.3'te porselen bir parafudrun bağlantı kısmının kesit görünüşü ve elemanların tanımları gösterilmektedir.



1. Porselen gövde
2. Gaz boşaltmalı kapak
3. Conta
4. Basınç boşaltma çıkışı
5. Sıkıştırma yayı
6. Metal oksit direnç

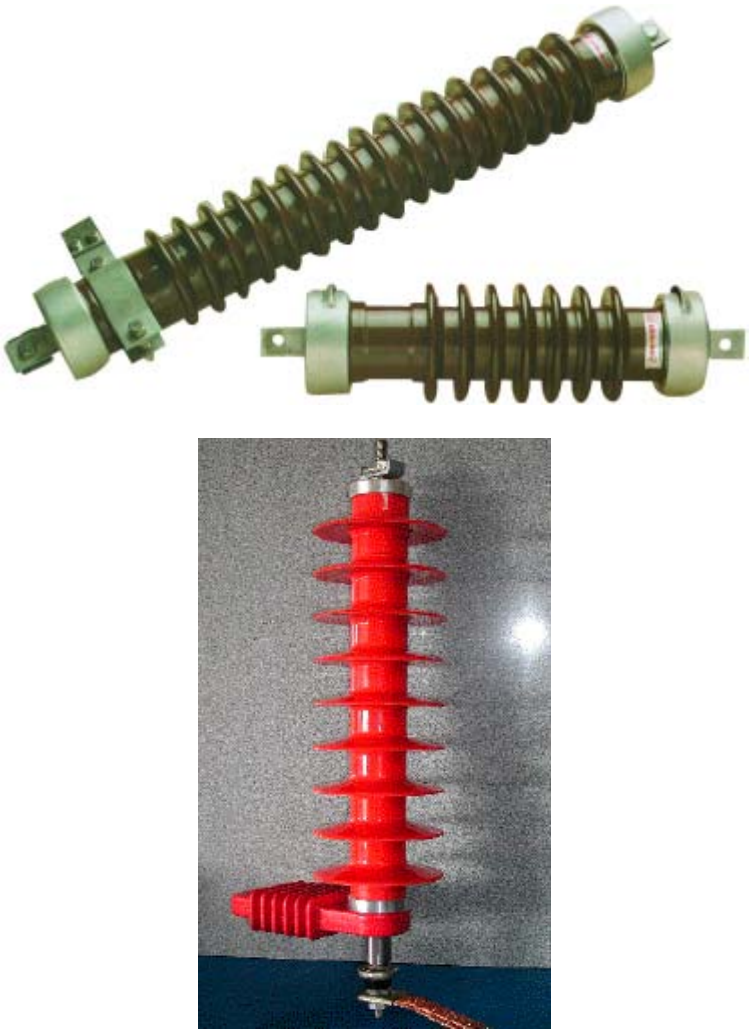
Şekil 2.3: Porselen Gövdeli Parafudrun Bağlantı Noktasının Kesiti [13].

2.3 Porselen ve Polimer Parafudr Gövdeleri

Kolonlar genel olarak hava sızdırmaz bir porselen veya polimer gövde içine yerleştirilmiştir. Gövde kısmı dayanıklı olmalı ve iç elemanları dış ortam koşullarına karşı etkin bir şekilde yalıtmalıdır. Porselen gövdeli parafudrlarda izolatör içinde az da olsa bir boşluk vardır ve buraya nem içermeyen bir gaz doldurulur. Bu boşluğa dış ortamdaki havanın girmemesi için de izolatörün iç kısmına açılan giriş ve çıkışlar kalıcı bir şekilde kapatılır. Polimer gövdeli parafudrlarda iç kısımda herhangi bir boşluk bulunmadığından sızıntı olasılığı da yoktur [7]. Ayrıca polimer parafudrlar porselen parafudrlara göre daha küçük ve hafiftir. İzolatörleri de kırılgan olmadığı için daha dayanıklıdır. Sade ve güvenilir bir yapıda olup, imalatı da daha kolaydır [2]. Şekil 2.4'te porselen ve polimer gövdeler ve direnç diskleri, Şekil 2.5'te ise porselen ve polimer gövdeli parafudrlar gösterilmektedir.



Şekil 2.4: Porselen ve Polimer Parafudr Gövdeleri ve Dirençleri [7].



Şekil 2.5: Porselen ve Polimer Gövdeli Parafudrlar [7].

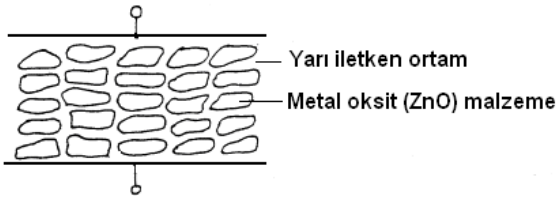
2.4 Metal Oksit Parafudrun Yapısı

2.4.1 Metal oksit direnç içeriğindeki bileşenler

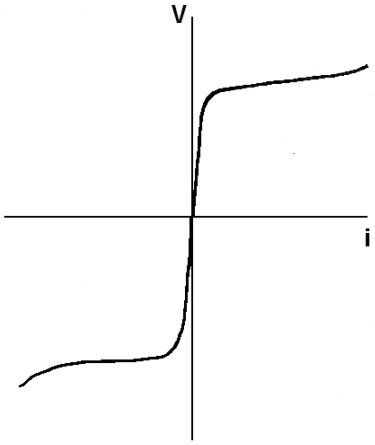
Silisyum karbürün aksine, metal oksit parafudrların dirençleri çeşitli malzemelerin karışımından hazırlanmaktadır. İçlerinde yaklaşık % 95-97 oranında temel bileşen olan çinko oksit bulunmaktadır. Fakat non-lineerlik özelliği küçük miktarlardaki diğer metallerle ve imalat sürecindeki katılaştırma işlemiyle kontrol edilir. İçeriğinde çinko oksitin yanı sıra bizmut, kadmiyum, kobalt, manganez, baryum, antimon, titanyum ve silisyum gibi elemanlar da bulunabilir. Tam birleşimi ve bileşen miktarları üreticiye göre değişir [2].

2.4.2 Çinko oksit elemanı

Çinko oksit elemanı ilk olarak Japonya'da geliştirilmiştir. Yıllarca süren araştırmalar sonucunda doğrusal olmayan akım-gerilim karakteristiği fark edilmiş ve parafudrlarda kullanılmasına başlanmıştır. İlk başlarda bir güç sistemine bağlanıp sürekli olarak gerilim altında tutulduğunda, zaman geçtikçe kaçak akımının arttığı görülmüştür. Bu durum çalışma ömrü açısından güven vermese de, 1978 yılında tamamlanan, 3 kV ila 500 kV arasını kapsayan yeni bir serideki çinko oksit elemanı çok zorlu sıcaklık ve gerilim altında bile uzun süreliğine kararlı bir karakteristiğe sahip olabileceğini göstermiştir. İlk kullanıldığı tarihten beri çinko oksit elemanının karakteristiği üzerinde çalışma ömrü, non-lineerliği ve enerji soğurma kapasitesi gibi konularda birçok iyileştirmeler yapılmıştır [11, 14]. 1980 yılında Japonya, Amerika ve Avrupa'nın önde gelen parafudr imalatçıları metal oksit parafudrları üretmeye başlamışlardır. Metal oksit parafudrlar için ilk olarak 1984 yılında Japon Standartları (JEC) yayınlanmış olup, bunu 1985'te ANSI ve 1986'da IEC Standartları takip etmiştir [11]. Şekil 2.6'da bir çinko oksit direncinin yapısı ve akım-gerilim karakteristiği gösterilmektedir.



(a)

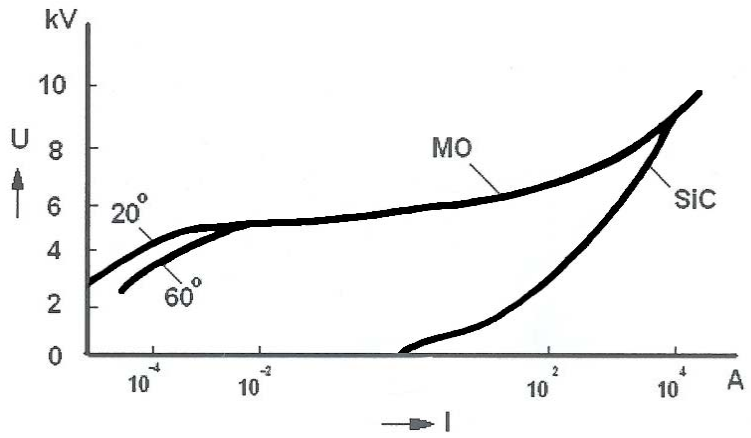


(b)

Şekil 2.6: (a) Çinko Oksit Direncin Yapısı; (b) Akım - Gerilim Karakteristiği [15].

2.5 Silisyum Karbür ve Metal Oksit Parafudrların Karşılaştırılması

Metal oksit ve silisyum karbür parafudrun akım-gerilim karakteristikleri Şekil 2.7'de bir arada verilmiştir. Bu karakteristikler kiloamperler seviyesindeki yüksek akımlarda birbirine çok benzemekte fakat düşük akımlarda farklılık göstermektedir. Sistemin normal çalışma geriliminde silisyum karbür parafudr üzerinden yüzlerce amper akım akıtırken metal oksit parafudr sadece miliamper seviyesinde akım akıtır. Bunun sebebi silisyum karbür dirençlerin non-lineerlik katsayıları 2 ila 6 arasında iken, metal oksit dirençlerin yaklaşık 40 ila 60 arasında olmasıdır [2]. Bu yüzden silisyum karbür parafudrlarda atlama aralığına ihtiyaç duyulurken metal oksit parafudrlarda ihtiyaç yoktur. Bu da daha iyi bir performans, artan güvenilirlik gibi çok önemli avantajları beraberinde getirir. Metal oksit dirençlerin akım gerilim karakteristiği, yaklaşık olarak 10^{-6} A'den 10^{4} A'e kadar yatay bir doğru şeklindedir. Metal oksit elemanı en büyük işletme gerilimine kadar, bağıl dielektrik sabiti 800 ila 1000 arasında değişen bir kapasite gibi davranır [10].



Şekil 2.7: Metal Oksit ve Silisyum Karbür Dirençlerin Akım-Gerilim Karakteristikleri [12].

Metal oksit parafudrlar, silisyum karbür parafudrlara göre çok daha iyi bir koruma karakteristiği gösterirler. Enerji soğurma kapasiteleri daha yüksektir. Yüksek gerilimli iletim hatlarının korunması için çok uygundurlar. Çok iyi enerji boşaltma yetenekleri sayesinde çeşitli yıldırım darbelerine karşı koruma yapabilirler. Gövdelerinin kirlenmesinden daha az etkilenip, enerji altındayken yıkanabilirler. Boyutları ve ağırlıkları silisyum karbür parafudrların yarısından daha azdır. Bu sayede montajları daha kolaydır ve daha az hacim kaplarlar. Yapıları basit ve parça sayıları da az olduğundan güvenilirlikleri daha fazladır. Ayrıca katı, sıvı, gaz gibi çeşitli yalıtım ortamlarında kullanılabilirler. Bu ortamlarda elektriksel karakteristikleri hemen hemen değişmez [2].

2.6 Parafudrlar İle İlgili Tanımlamalar

Parafudrlar, aşırı gerilimleri güvenli bir seviye olan, sistemin yalıtımının bozulma seviyesinin altına getirir. Parafudrun izin verdiği maksimum gerilim, koruma seviyesini belirler. Sistemin yalıtımının bozulma seviyesi ile parafudrun koruma seviyesi arasındaki fark, koruma için bırakılan marjı gösterir. Bu marjın mümkün olduğunca fazla olması, dolayısıyla da sistemin yalıtım bozulma sınırına fazla yaklaşmaması istenir. Fakat aşırı gerilim darbelerine karşı daha dayanıklı bir parafudr kullanılmak istenirse bu marjın azalması kaçınılmazdır. Bu noktada optimum bir seçim yapılmalıdır.

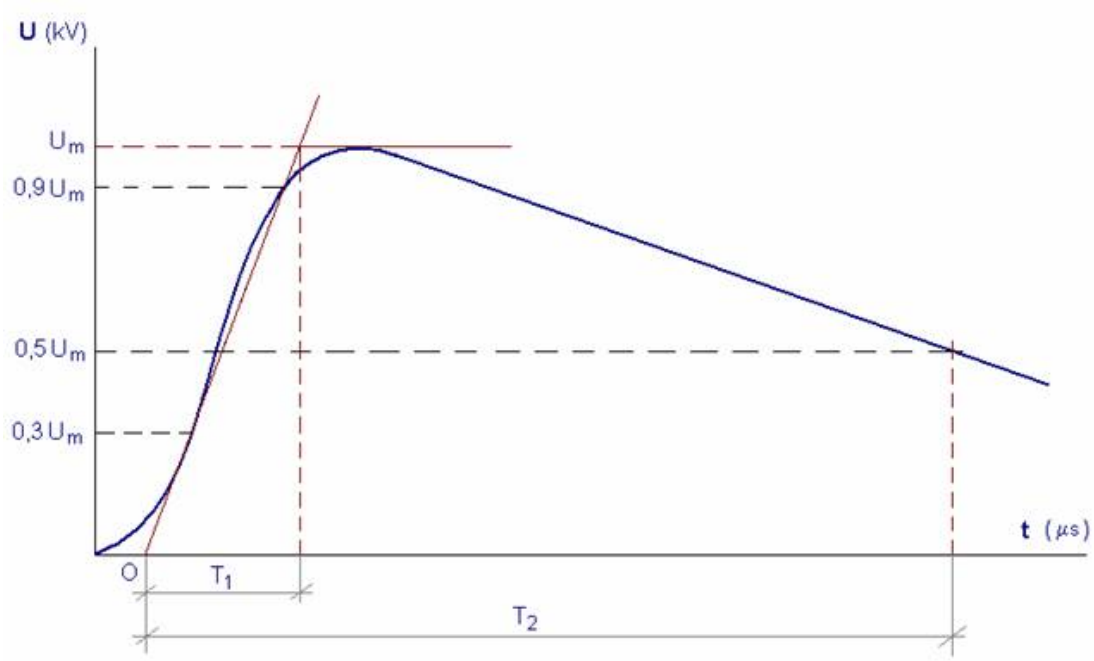
Genel olarak parafudrlar şu koşulları yerine getirmelidirler [10]:

1) Çalışmaya başlama gerilimi, mümkün olduğu kadar aşırı gerilimin şekline ve cinsine bağlı olmamalıdır. Dış etkenlerin etkisi (yağmur, kar, sis, kir,…) mümkün olduğu kadar küçük olmalıdır.
2) Anma darbe boşalma akımları geçerken oluşan artık gerilim, izin verilen sınırı aşmamalı ve parafudr fazla zorlanmamalıdır.
3) Çalışmaya başlama gerilimi, dış etkiler altında dahi izin verilen en büyük işletme geriliminin altına düşmemelidir.
4) Büyük zaman aralıklarında da, beklemesiz çalışmalıdırlar.
5) Şebekeyi herhangi bir şekilde etkilememelidirler.

Parafudrlarla ilgili bazı önemli tanımlar şunlardır [1, 10]:

- Çalışmaya başlama gerilimi ($u_{çb}$): Parafudrun çalışmaya başladığı anda, uçları arasındaki gerilim değerine denir.
- Çalışmaya başlama süresi ($t_{çb}$): Bir darbe geriliminin anma başlangıç noktasından itibaren parafudrun çalışmaya başladığı ana kadar geçen süredir.
- %100 darbe çalışmaya başlama gerilimi ($u_{çb100}$): Parafudru her defasında çalıştıran en küçük 1.2/50'lik darbe geriliminin tepe değerine denir.
- Alternatif çalışmaya başlama gerilimi ($U_{çb}$): Parafudrun uçları arasına sinüsoidal bir alternatif gerilim uygulandığında çalışmasını sağlayan en küçük alternatif gerilimin etkin değeridir.
- Darbe boşalma akımı (i_b): Bir atlama olayında parafudrdan geçen darbe akımıdır.
- Anma darbe boşalma akımı (i_{bN}): Parafudrların sınıflandırılmasında kullanılan 8/20'lik darbe akımının tepe değeridir.
- Ard (izleme) akımı (I_a): Darbe boşalma akımının geçişini izleyen ve şebeke gerilimi altında parafudrdan geçen akımdır.
- Artık gerilim (u_a): Boşalma akımının geçişi sırasında parafudrun uçları arasında meydana gelen en büyük gerilimdir.
- Delinme: Katı yalıtkan içinde oluşan hasar verici boşalmadır.
- Yüzeysel atlama: Katı yalıtkanın yüzeyi boyunca oluşan hasar verici boşalmadır.

Şekil 2.8'de örnek bir darbe gerilimi gösterilmektedir.



Şekil 2.8: Örnek Bir Darbe Gerilimi [16].

Darbe; göz önüne alınmaya değer salınımları olmaksızın hızla en büyük değerine ulaşan ve genellikle daha yavaş bir şekilde sıfıra düşen tek yönlü bir gerilim veya akım dalgasıdır.

Darbe alnı, darbenin tepe değere ulaşmadan önceki bölümüdür.

Darbe sırtı, darbenin tepe değere ulaştıktan sonraki bölümüdür.

Darbenin sırt yarı değer süresi, anma başlangıç noktası ile gerilim veya akımın tepe değerinin yarısına düştüğü an arasında geçen süredir.

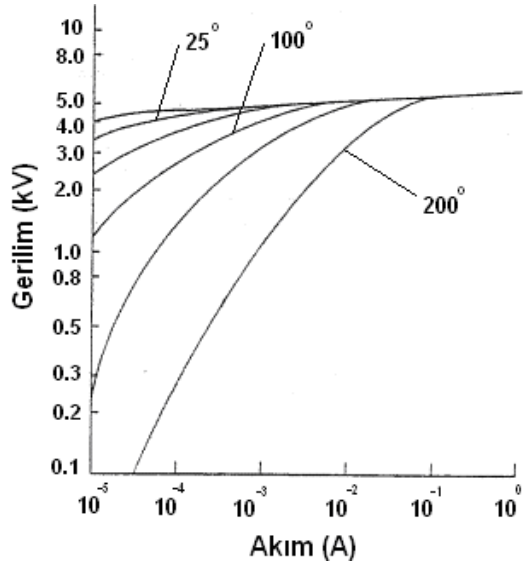
Standart yıldırım gerilim darbesi, alın süresi 1,2 μs ve sırt yarı değer süresi 50 μs olan darbe gerilimidir.

Açma kapama gerilim darbesi, alın süresi 30 μs'den büyük olan gerilim darbesidir.

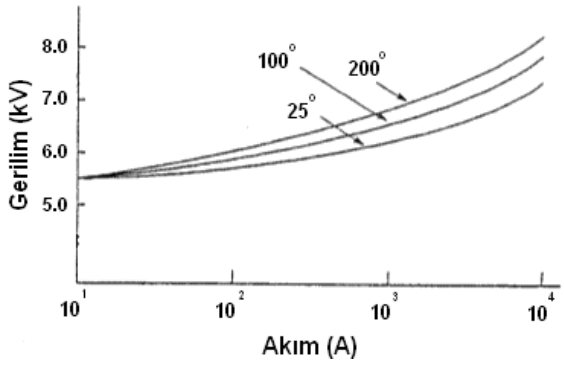
3. METAL OKSİT PARAFUDRLARIN ISIL ÖZELLİKLERİ

3.1 Isıl Bozulma Olayı

Metal oksit parafudrlar çok yüksek enerjilere bile rahatlıkla dayanabilirler. Fakat her enerji soğurduklarında, bu enerji sıcaklıklarının artmasına sebep olur. Bu sıcaklık artışı dirençlerini yükseltir. Bunun sonucu oluşan güç kaybı artar. Eğer bu güç kaybından dolayı oluşan ısı, çinko oksit elemanın dışarı yaydığı ısı değerini geçerse, sıcaklık ve akım artmaya devam eder ve sonunda çinko oksit eleman aşırı ısınarak bozulur ve erir. Bu olaya ısıl bozulma denir [2].



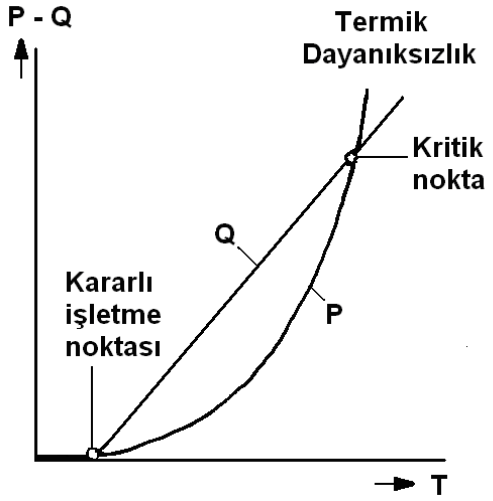
(a)



(b)

Şekil 3.1: Çinko Oksit Elemanının Akım-Gerilim Karakteristiğinin Sıcaklıkla Değişimi [11].

Şekil 3.1'de çinko oksit elemanının akım-gerilim karakteristiğinin sıcaklıkla olan değişimi verilmiştir. Şekil 3.1(a) düşük akım bölgesini göstermektedir. Bu bölgede eleman negatif bir sıcaklık katsayısına sahiptir. Şekil 3.1(b) ise yüksek akım bölgesi içindir ve burada eleman hafifçe pozitif bir karakteristik göstermektedir [11]. Sıcaklığa bağlılık karakteristikleri metal oksit parafudrun ısıl tasarımı için son derece önemlidir.



Şekil 3.2: Çinko Oksit Direncin Sıcaklıkla P-Q Değişimi [12].
Q: Parafudrdan dışarı yayılan ısı
P: Güç kaybından dolayı dirençte oluşan ısı

Şekil 3.2'de gösterildiği gibi kritik noktanın üstünde P-Q farkı gittikçe arttığından dirençler tahrip olur. Disklerin bu kritik noktaya gelmesi önlenmelidir [12]. Bu yüzden bir parafudr tasarlanırken, çinko oksit elemanının sadece enerji soğurma kapasitesi değil, aynı zamanda ısı üretimi ve yayma dengesinin de (ısıl kararlılığının) göz önünde bulundurulması gerekir.

3.2 Isınma Soğuma Karakteristikleri

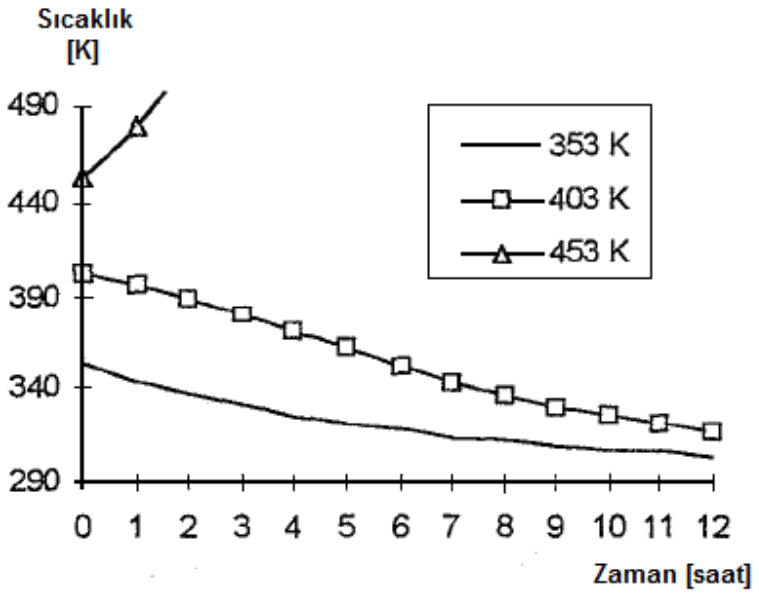
Metal oksit parafudrların ısınma soğuma karakteristiklerini incelemek için, değişik programlar kullanılarak farklı çalışmalar yapılabilir. Örnek olarak, 60 kV'luk bir parafudr için değişik sıcaklıklara ulaştıktan sonraki soğuma eğrisinin, CADdyTERM denen, sonlu elemanlar yöntemini kullanan bir program ile hesaplanmasını inceleyelim. Bu örnekte parafudrun dışındaki ısıl iletim katsayısı değişik hava durumlarına bağlı olarak 1,4 ve 14 W/(m^2.K) alınmıştır. Ortam sıcaklığı 293^{o}K olarak kabul edilmiştir. Başlangıç sıcaklıkları 353^{o}K, 403^{o}K ve 453^{o}K olan üç durum

için hesap yapılmıştır. Hesaplamada üreticiden alınan sıcaklığa bağlı ısıl enerji bilgileri kullanılmıştır [17]. Bu bilgilerden bazıları Çizelge 3.1'de gösterilmektedir.

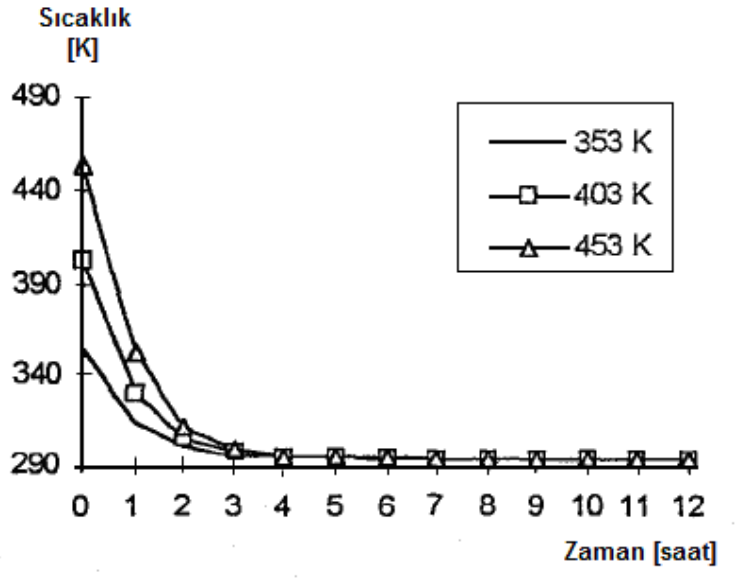
Çizelge 3.1: Sıcaklığa Bağlı Isıl Enerji Değerleri [17].

Sıcaklık [^{o}K]	303	353	403	453
Isıl Enerji [W/m^{3}]	2153	10765	32295	76701

Farklı ısıl iletim katsayılarındaki soğuma eğrileri arasındaki farkı göstermek için, üç farklı başlangıç sıcaklığındaki soğuma eğrileri Şekil 3.3 ve 3.4'te sırasıyla 1,4 ve 14 W/(m^{2}.K) ısıl iletim katsayıları için verilmiştir [17].



Şekil 3.3: Üç Farklı Başlangıç Sıcaklığı İçin Soğuma Eğrisi (1,4 W/(m^{2}.K)) [17].



Şekil 3.4: Üç Farklı Başlangıç Sıcaklığı İçin Soğuma Eğrisi (14 W/(m^2.K)) [17].

Bir başka incelemede ise, "normal" ve "yüksek" olmak üzere iki farklı güç kaybı karakteristiği olan metal oksit diskler gözlemlenmiştir. Her iki tipte önce bir sıcaklığın artma sürecine, ardından da uygulanan gerilimin normal işletme gerilimine düşürülmesi ve güç tüketiminin takip edilmesi işlemlerine maruz bırakılmıştır. Sonuç olarak, normal kayıplı disklerde, belirli bir sıcaklık değerinden kararlı hale geri dönüş mümkünken, yüksek kayıplı disklerde aynı sıcaklıktan kararlı hale geri dönüş mümkün olmamaktadır [18].

Yapılan bu incelemelerde çeşitli yöntemler kullanılarak, metal oksit parafudrun geçici ve sürekli hal durumlarındaki ısıl davranışı gözlemlenmiştir. Yukarıdaki sonuçlardan da görülebileceği gibi, parafudrun farklı gerilim, sıcaklık ve hava koşullarında ısıl bozulmaya gidip gitmeyeceği tahmin edilip, ısıl bozulmaya gitmeden çıkabileceği maksimum sıcaklık değerleri hesaplanabilmektedir. Bu incelemelerin ortak amacı, parafudrun ısıl bozulmaya gitmesini önlemek için yapılması gerekenleri belirlemektir.

4. METAL OKSİT PARAFUDRLARDA GERİLİM DAĞILIMI

Metal oksit parafudrlar enerji sistemlerinde, sistemi aşırı gerilimlere karşı korumak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu parafudrların ömrü, normal çalışma durumlarındaki performanslarına bağlıdır. Fakat normal çalışma durumunda gerilim dağılımının düzensiz olduğu görülmektedir [6]. Eski tip atlama aralıklı parafudrlarda düzenli olmayan bir gerilim dağılımı, aralıkların aşırı zorlanmasına ve zaman zaman kıvılcımların oluşmasına sebep olmaktadır. Metal oksit parafudrlarda düzenli bir gerilim dağılımı gereksinimi ise, çinko oksit disklerdeki güç kaybının doğrudan üzerindeki gerilime bağlı olmasından kaynaklanmaktadır [19]. En üstteki disk diğer disklere göre daha büyük bir gerilime maruz kalır ve bu sebepten dolayı da diğer disklere göre ısıl olarak daha fazla zorlanır. Uzun süre devam eden ısıl zorlanma ise çinko oksit diskin ısıl bozulmaya gitmesine, sonuç olarak da tüm parafudrun arızalanmasına sebep olabilmektedir [5]. Bu sorunu çözmek için gerilim dağılımının mümkün olduğunca düzenli hale getirilmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır [6].

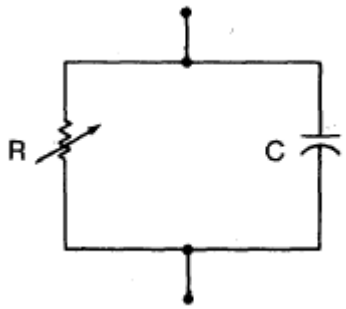
Parafudr üzerinde gerilimin dengesiz dağılmasının sebebi, diskler ile toprak arasında olan kaçak kapasitelerdir. Bu kapasiteler disklerden toprağa kapasitif akımların akmasına sebep olurlar. Kaçak kapasiteler parafudr boyunca dağılmış olduğundan, parafudrun üst kısmından alt kısmına göre daha fazla akım akar. Böylece, üst kısma yakın elemanlardan geçen akım değeri ortalama değere göre daha fazla olurken, alt kısma yakın elemanlarda ise daha azdır. Kaçak kapasiteler parafudrun boyuna bağlı olduğu için, gerilim dağılımında ortalama değerden sapma parafudrun boyu ne kadar artarsa o kadar fazla olur. Bu yüzden boyları daha uzun olan yüksek gerilim parafudrlarının tasarımı alçak gerilim parafudrlarınınkinden daha karmaşıktır [19].

4.1 Parafudrun Gerilim Dağılımının Bulunması İçin Yapılan Çalışmalar

Parafudrun bir modelini kullanarak gerilim dağılımını hesaplamak mümkündür. Fakat kaçak kapasitelerin doğru değerlerini hesaplamak kolay değildir. Çünkü kaçak kapasiteler parafudrun boyuna ya da alan düzenleyici olup olmamasına göre

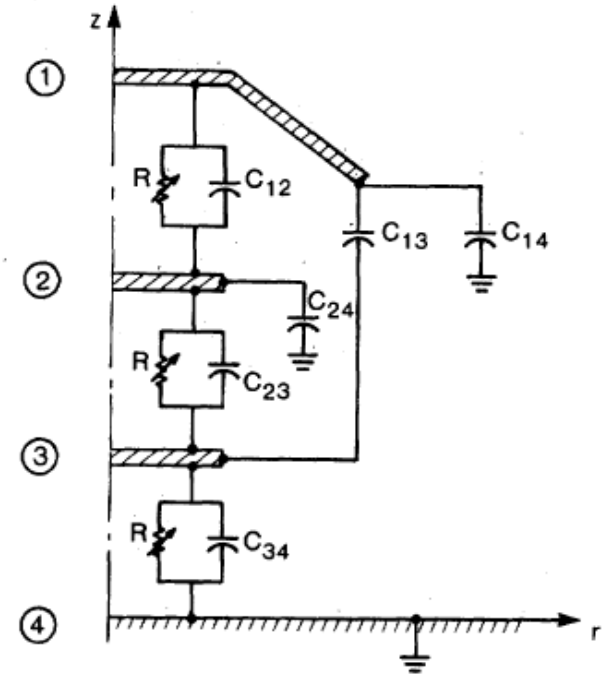
değişmektedir. Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak bunların hesaplanması mümkündür.

Çözüm için iç modellemede metal oksit disk doğrusal olmayan R direnci ve C kapasitesinin paralel bağlanmasıyla gösterilmiştir. Şekil 4.1'de böyle bir eşdeğer devre gösterilmektedir [19].



Şekil 4.1: Bir Metal Oksit Diskin Eşdeğer Devresi [19].

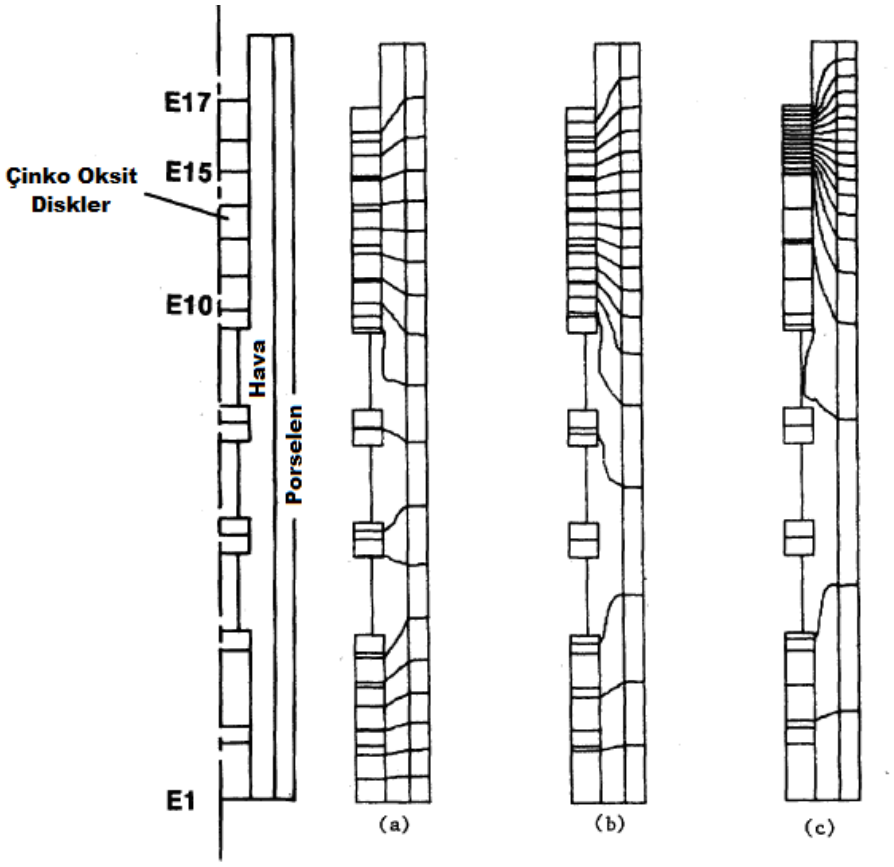
Parafudrun tamamının modeli, elemanların bir araya getirilmesi ile oluşturulmaktadır. Örnek olarak bir alan düzenleyici, üç metal oksit diski olan bir parafudr Şekil 4.2'de gösterilmektedir.



Şekil 4.2: Üç Metal Oksit Diski Olan Örnek Bir Parafudrun Modeli [19].

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, 16 metal oksit diski ve 3 tane iletken ara halkası olan bir parafudrun çeşitli durumlardaki gerilim dağılımları kapasiteleri

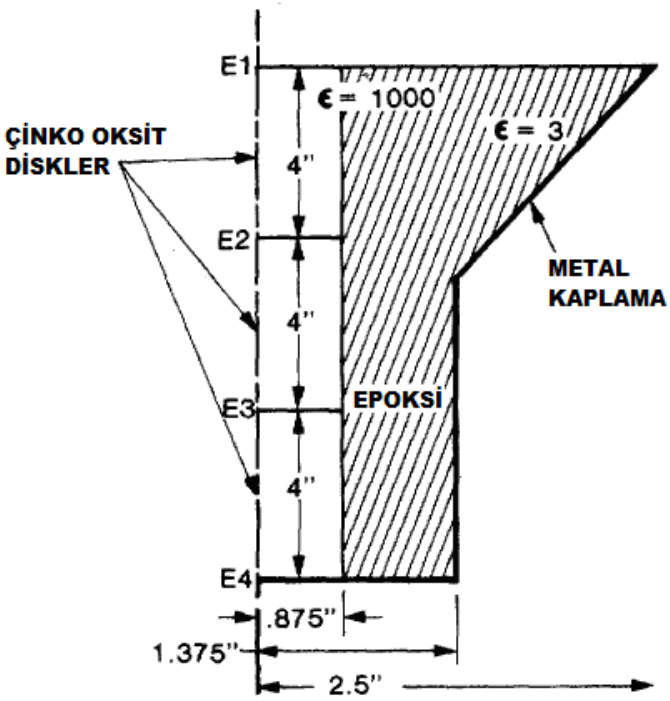
hesaplanarak elde edilmiştir. Şekil 4.3'te sonuçlar verilmektedir. Şekil 4.3 (a)'da 17. elektroda 100 V uygulanırken yere 0 V, (b)'de 17. elektroda 100 V, 10. elektroda 50 V, yere 0 V, (c)'de 17. elektroda 100 V, 15. elektroda 25 V ve yere 0 V uygulanmıştır [19].



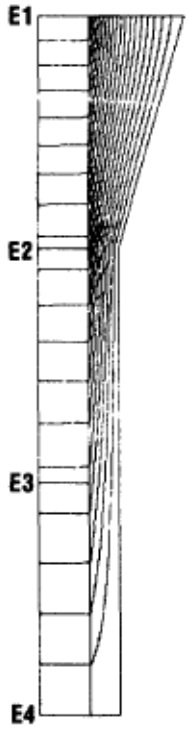
Şekil 4.3: Değişik Durumlarda Parafudr Kolonundaki Gerilim Dağılımları [19].

Farklı bir örnek olarak Şekil 4.4'te epoksi ve metal kaplama ile çevrilmiş, üç çinko oksit diski olan bir parafudr gösterilmektedir.

Parafudra anma geriliminin %65'i olan 21,1 kV uygulanırken, akan dirençsel akım son derece küçük olup mikroamperler seviyesindedir. Normal işletme koşullarında akan kapasitif akım, dirençsel akımın yaklaşık 40 katı olmaktadır [20]. Şekil 4.5'te gerilim dağılımı görülmektedir. Beklendiği gibi üstteki diskte gerilim dağılımı %44 ile en fazla olurken, alttaki diskte %24 ile en az olmaktadır. %33 olan ortalama değerden bu sapmanın nedeni kaçak kapasitelerdir [19].



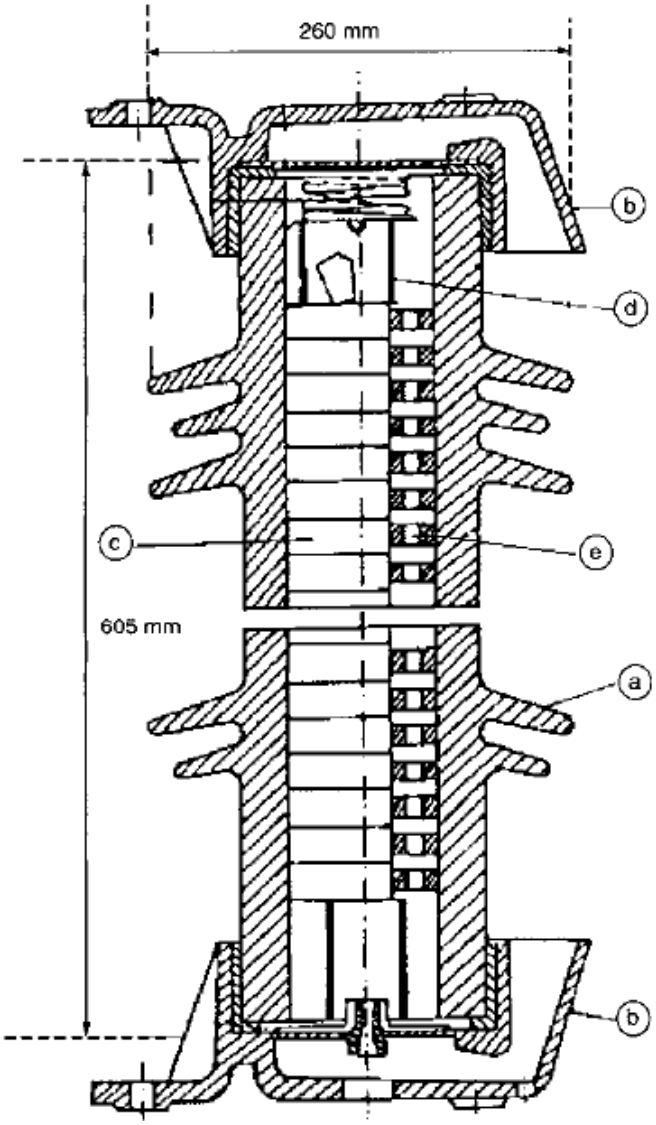
Şekil 4.4: Epoksi Kaplama Parafudrun Kesit Görüntüsü [19].



Şekil 4.5: E1'e 100 V, E4'e 0 V Uygulanması Durumunda Parafudrun Gerilim Dağılımı [19].

4.2 Gerilim Dağılımını Düzenlemek İçin Yapılan Çalışmalar

Parafudrdaki gerilim dağılımı, kullanılan malzemenin elektriksel özelliklerine olduğu kadar, geometrik şekline ve elemanların konumlandırıldığı yere de bağlıdır. Şekli ve konumunda yapılacak basit değişiklikler gerilim dağılımını olumlu yönde etkileyebilmektedir. Gerilim dağılımını düzenli hale getirmek için yapılan ilk çalışmalarda, geometrik şekillerinde değişiklik yapılması hiç düşünülmemiştir. Burada 220 kV ve 400 kV'luk parafudrlarda kullanılan malzemelerin temiz ve kirlenmiş durumlardaki geometrik şekilleri incelenerek, bazı optimum değerler için bulunmuş olan sonuçlar verilecektir [6].



a) Porselen gövde, b) kelepçe, c) ZnO disk, d) ara halka, e) dolgu maddesi

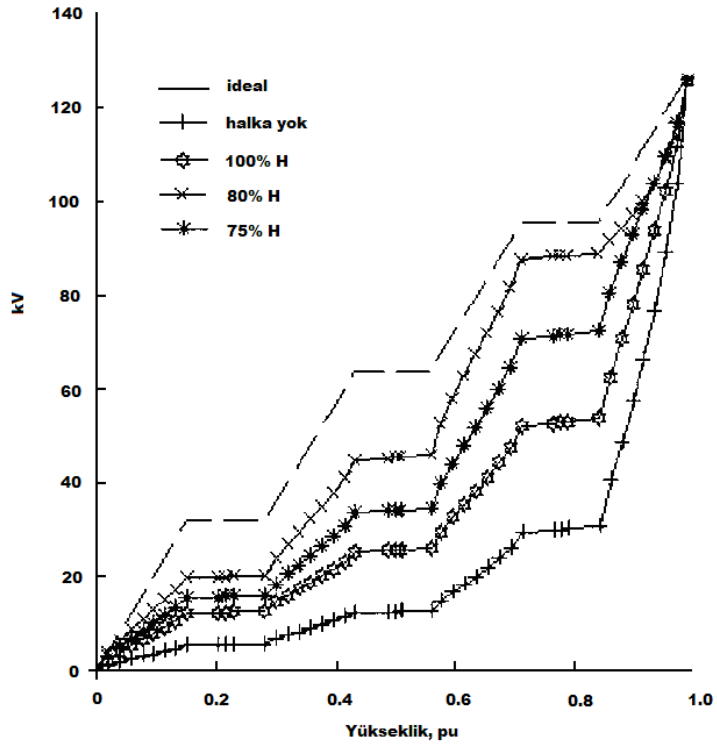
Şekil 4.6: Bir Metal Oksit Parafudrun Kesiti [6].

Şekil 4.6'da bir parafudrun kesiti gösterilmektedir. 220 kV ve 400 kV'luk parafudrların toplam yükseklikleri sırasıyla 2,66 metre ve 3,79 metredir [6].

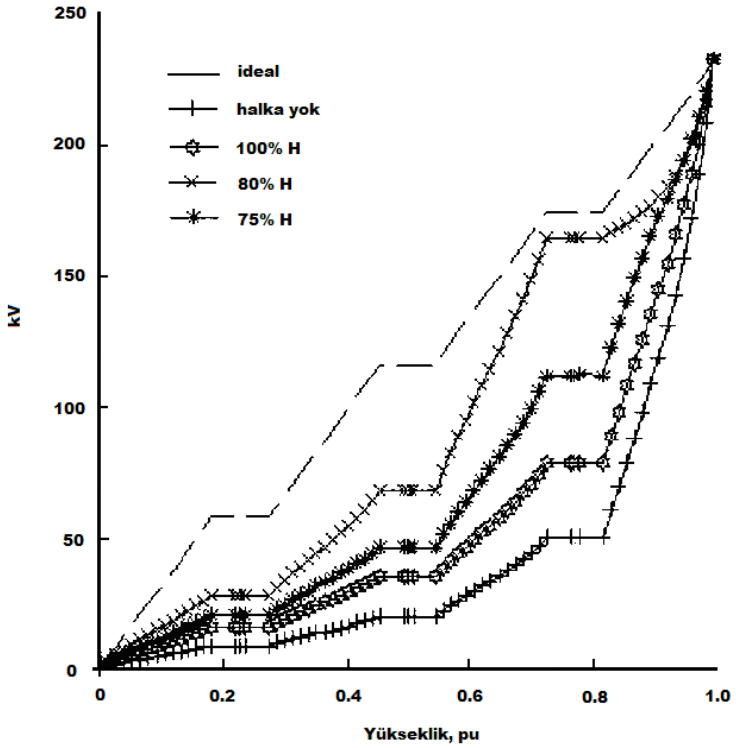
4.2.1 Alan düzenleyicinin yerinin etkisi

IEEE standartlarına göre alan düzenleyici; genellikle dairesel ya da elips şeklinde olan, elektrostatik alan dağılımını iyileştirmek için yerleştirilmiş metal bir parçadır. Alan düzenleyiciye göre alan ve gerilim dağılımının değişimi şu şekilde açıklanabilir: parafudr ile toprak arasındaki kaçak kapasiteler gerilim dağılımının düzensiz olmasına sebep olur. Alan düzenleyici eklendiğinde, kaynakla parafudr arasında ek bir kapasite oluşmasını sağlar ve bu ek kapasite yere karşı olan kaçak kapasiteyi kompanze eder. Sonuçta da gerilim dağılımı daha düzenli hale gelir. Alan düzenleyicinin boyu parafudrun boyuyla aynı ya da daha uzunsa, parafudrun üst kısmı ile arasında oluşan kapasite, aşağı kısmı ile arasında oluşandan daha fazla olur. Ancak halka ile üst kısımlar arasındaki gerilim farkı az olduğundan, alt kısımdaki disklerle kıyaslandığında, gerilim dağılımındaki iyileşmeyi azaltır. Halka boyu azaldıkça, alt kısımla arasında olan kapasite artar ve böylece alt kısmın gerilimi de artmış olur. Bunun sonucunda üst kısımdaki gerilim farkı azalır. Optimum bir noktadan sonra, halka boyunu daha aşağıya indirmek orta ve alt kısımlarla arasında olan kapasiteyi arttırır ve maksimum gerilim farkının olduğu nokta ortalara doğru kayar. Bunun sonucunda maksimum fark büyümeye başlar.

Alan düzenleyicinin ne kadar etkili olacağı direkt olarak yerleştirildiği pozisyona bağlıdır. En etkili olduğu yerin bulunması için parafudrun gerilim dağılımı, alan düzenleyicinin farklı yüksekliklerde olduğu durumlara göre hesaplanmıştır. Şekil 4.7 ve 4.8'de sırasıyla 220 kV ve 400 kV'luk parafudrlar için bazı sonuçlar verilmiştir [6].



Şekil 4.7: Farklı Alan Düzenleyici Yükseklikleri İçin 220 kV'luk Parafudrdaki Gerilim Dağılımı [6].



Şekil 4.8: Farklı Alan Düzenleyici Yükseklikleri İçin 400 kV'luk Parafudrdaki Gerilim Dağılımı [6].

Sonuç olarak gerilim, yukarıdaki diskte ortalamanın üzerindeyken, aşağıdaki diskte altındadır. Çizelge 4.1'de farklı halka pozisyonları için iki parafudrun da disklerindeki ortalama gerilimden maksimum sapma gösterilmektedir.

Çizelge 4.1: İki Farklı Alan Düzenleyici Pozisyonu İçin Disklerdeki Maksimum Gerilim Sapması [6].

% Halka yüksekliği / Parafudr yüksekliği	**% V_{max}/V_{ort} 220 kV Parafudr**	**% V_{max}/V_{ort} 400 kV Parafudr**
Halka Yok	452.5	521.0
100	293.5	369.2
92	234.7	285.2
86	204.0	257.9
80	200.0	264.0
75	211.6	276.1
70	232.3	304.9

Çizelge 4.1'den görüldüğü üzere alan düzenleyici için parafudrun toplam yüksekliğinin %75 ila %86 arasında bir optimum değer belirlenmiştir. Gerçekte, gerilimin artmasıyla disklerin iletkenliği de artacağından, disklerdeki maksimum gerilim değeri bu değerlerden daha az olabilir. Fakat alan düzenleyici için belirlenen optimum yükseklik aynı kalacaktır.

4.2.2 Alan düzenleyicinin kesitinin etkisi

Alan düzenleyici tarafından diskler ile arasında oluşturulan kapasite direkt olarak halkanın kesitine bağlıdır. Bunun etkisini belirlemek için, alan düzenleyici aynı optimum yükseklikte tutularak farklı kesit değerleri için gerilim dağılımları ölçülmüştür [6]. Sonuçlar Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2: Farklı Kesit Değerleri İçin Maksimum Gerilim Sapması [6].

Halka Çapı (mm)	**% V_{max}/V_{ort} 220 kV Parafudr**	**% V_{max}/V_{ort} 400 kV Parafudr**
40	222.4	281.8
60	200.0	257.9
100	165.8	221.3

Sonuç olarak gerilim farkını minimuma indirmek için büyük kesitli bir halkanın kullanılmasının çok etkili olduğu görülmektedir.

4.2.3 Ara halka kullanılmasının etkileri

Porselen gövdenin yüksekliği parafudrun gerilim seviyesine ve çevresel faktörlere bağlıdır. Belirli bir gerilim değeri için gövdenin boyu disklerin toplam boyundan daha fazla olabilir. Bu farkı gidermek için metal ara halkalar kullanılır. Bu ara halkalar parafudr boyunun %40'ına kadar ulaşabilir. Ara halkaların etkisini anlamak için 6 kV'luk disklerin ve 3 kV'luk disklerin kullanıldığı 220 kV ve 400 kV luk parafudrlar incelenmiştir. 6 kV'luk disklerin toplam yüksekliği 220 kV ve 400 kV'luk parafudrlar için sırasıyla 1,44 metre ve 2,52 metredir. Aynı durum için 3 kV'luk diskler kullanıldığında toplam yükseklik sırasıyla 1,86 metre ve 3,25 metre olmaktadır. Parafudrların toplam boylarının 2,66 m ve 3,79 m olması gerekmektedir. Bu durumda 6 kV'luk diskler kullanıldığında ihtiyaç duyulan ara halka, 3 kV'luk diskler kullanıldığında ihtiyaç duyulandan daha fazladır [6]. İki durum için de hesaplanan maksimum gerilim farkları Çizelge 4.3'de verilmektedir.

Çizelge 4.3: 3 kV ve 6 kV luk diskler için maksimum gerilim sapması [6].

ZnO Diskin Gerilim Değeri (kV)	**% V_{max}/V_{ort} 220 kV Parafudr**	**% V_{max}/V_{ort} 400 kV Parafudr**
3	180.3	233.1
6	200.0	257.9

Çizelge 4.3'ten açıkça görülmektedir ki kullanılan ara halka yüksekliği ne kadar az olursa gerilim dağılımı o kadar düzenli olmaktadır. Bunun sebebi, ara halka varlığının parafudr boyunca birim uzunluktaki ortalama gerilimi yükseltmesi ve böylece toprağa olan kaçak kapasiteleri arttırmasıdır [6].

Ara halkalar parafudrun üst kısmına, alt kısmına ya da alt ve üste eşit dağıtılmış olarak yerleştirilebilirler. Ara halka kullanımı bazı durumlarda kaçınılmaz olduğundan, bu konudaki çalışmalar bunların konumlandırılması için en uygun yeri bulmaya yönelmiştir. Burada en uygun yerden kasıt, gerilim dağılımına olan olumsuz etkilerinin en az olacağı yerdir. Alan düzenleyici optimum değer aralığında olan %80 değerinde tutulmak kaydıyla, ara halkaların üç çeşit konumlandırılması yapılmış ve gerilim farkları hesaplanmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.4'te verilmektedir.

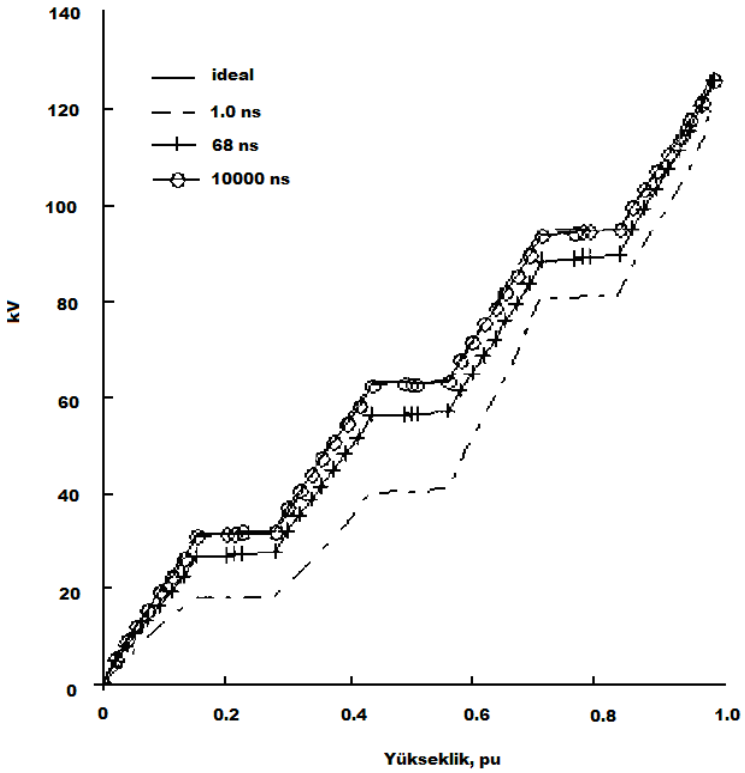
Çizelge 4.4: Ara Halkaların Değişik Konumları İçin Maksimum Gerilim Sapmaları [6].

Ara Halka Konumları	**% V_{max}/V_{ort} 220 kV Parafudr**	**% V_{max}/V_{ort} 400 kV Parafudr**
Altta	174.5	225.5
Alt ve Üstte Eşit	189.2	230.4
Üstte	200.0	264.0

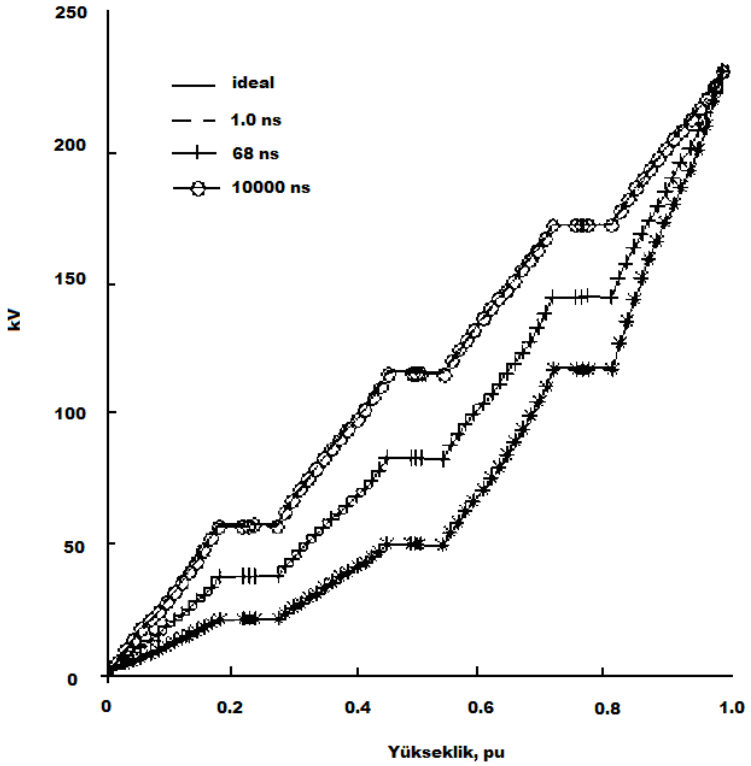
Çizelge 4.4'ten görüldüğü üzere, ara halkaları en alta yerleştirmek gerilim dağılımındaki farkın en aza indirilmesini sağlamaktadır. Bu şekilde, alan düzenleyici tarafından disklere sağlanan kapasite, diğer ara halka konumlarına göre daha fazladır ve parafudr boyunca ortalama gerilim sapmasının değeri daha küçüktür. Bu sayede daha iyi bir gerilim dağılımı elde edilmiş olur ve bu da maksimum zorlanmada azalmaya sebep olur [6].

4.2.4 Kirlenme durumlarındaki gerilim dağılımının incelenmesi

Çevresel koşullara bağlı olan kirlenme, parafudrun gerilim dağılımını önemli ölçüde etkileyebilir. Dış yüzey üzerinde biriken kir tabakası iletkenliğin artmasına sebep olur [21]. Kirlenme seviyesi ne kadar fazlaysa, yüzey iletkenliği de o kadar fazla olur ve bu da gerilim dağılımını olumlu yönde etkiler. Farklı kirlenme durumlarının sonuçları da farklı olmaktadır [22]. Bu çalışmada üç farklı durum incelenmiştir: yüzey iletkenliğinin 1 nS (nanoSiemens = 1.10^{-9} S) olduğu oldukça temiz durum, 68 nS olduğu düşük kirlenme seviyesi ve 10^4 nS olduğu orta kirlenme seviyesi. Şekil 4.9 ve 4.10'da 220 kV ve 400 kV'luk parafudrlar için bu üç durumda hesaplanmış gerilim dağılımı gösterilmektedir. Çizelge 4.5'te de maksimum gerilim farkı gösterilmektedir [6].



Şekil 4.9: Çeşitli Kirlenme Seviyelerinde 220 kV Parafudrdaki Gerilim Dağılımı [6].



Şekil 4.10: Çeşitli Kirlenme Seviyelerinde 400 kV Parafudrdaki Gerilim Dağılımı [6].

Çizelge 4.5: Çeşitli Kirlenme Seviyeleri İçin Maksimum Gerilim Sapması [6].

Yüzey iletkenliği (kirlenme) (nS)	**% V_{max}/V_{ort} 220 kV Parafudr**	**% V_{max}/V_{ort} 400 kV Parafudr**
1.0 (temiz)	199.7	256.1
68 (düşük kir.)	130.1	192.5
10000 (orta kir.)	100.0	100.0

Hesaplamalar yapılırken alan düzenleyici optimum yüksekliğinde tutulup, kir tabakasının yüzeyde düzenli bir şekilde dağıldığı varsayılmıştır.

Çizelge 4.5'ten görüldüğü üzere orta seviyedeki bir kirlenme yere karşı olan kaçak kapasiteleri neredeyse etkisiz hale getirmektedir. Bunun sebebi kir tabakası üzerinden geçen akımın, yere karşı olan kaçak kapasitelerden geçen akımdan çok daha kuvvetli olmasıdır.

Kirlenme durumu için yapılan çalışmalar göstermektedir ki, temiz durum için hesaplanan etkilerin aynısı kirli durumlar için de geçerli olmaktadır. Fakat kirli durumlardaki maksimum gerilim farkı temiz durumlara göre daha azdır [6].

5. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

5.1 Yöntemin Tanıtılması

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), her türlü fiziksel problemin çözümüne uygulanabilen sayısal bir yöntemdir. Yapı, davranışı daha önce belirlenmiş olan birçok elemana bölünür. Elemanlar "düğüm" adı verilen noktalarda tekrar birleştirilirler. Bu şekilde cebirsel bir denklem takımı elde edilir. İncelenen probleme bağlı olarak bu şekilde yüzlerce hatta binlerce denklem elde edilebilir. Bu denklem takımının çözümü ise bilgisayar kullanımını zorunlu kılmaktadır.

Sonlu elemanlar yönteminde temel fikir sürekli fonksiyonları bölgesel sürekli fonksiyonlar (genellikle polinomlar) ile temsil etmektir. Bunun anlamı, bir eleman içerisinde hesaplanması istenen büyüklüğün (örneğin deplasmanın) değeri o elemanın düğümlerdeki değerleri kullanılarak interpolasyon ile bulunmasıdır. Bu nedenle sonlu elemanlar yönteminde bilinmeyen ve hesaplanması istenen değerler düğümlerdeki değerlerdir. Bir varyasyonel prensip (örneğin; enerjinin minimum olması prensibi) kullanılarak büyüklük alanının düğümlerdeki değerleri için bir denklem takımı elde edilir. Bu denklem takımının matris formundaki gösterimi

$$[K] . [D] = [R] \qquad \textbf{(5.1)}$$

şeklindedir. Burada [D] büyüklük alanının düğümlerdeki bilinmeyen değerlerini temsil eden vektör, [R] bilinen yük vektörü ve [K] ise bilinen sabitler matrisidir.

SEY'de genel olarak iki çözüm yöntemini kullanır:

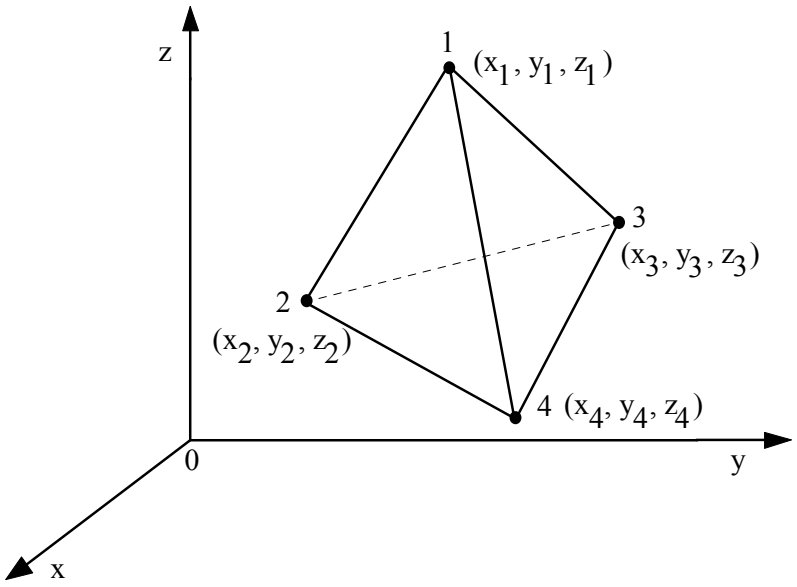
1) Varyasyonel yöntem: Fonksiyonların minimumunu bulmaya dayanan yöntemdir.
2) Galerkin yöntemi: Bir moment yöntemidir. Buna kalanlar yöntemi de denir.

Herhangi bir problemin SEY ile çözümünde, problemin geometrisi çizildikten, malzemeler ve problemin başlangıç ve sınır koşulları tanımlandıktan sonra şu temel adımlar izlenir:

1) Çözüm bölgesinin sonlu elemanlara veya alt bölgelere bölünmesi (ayrıklaştırma)
2) Her bir eleman için temel denklemlerin yazılması
3) Çözüm bölgesindeki elemanların birleştirilmesi
4) Elde edilen lineer denklem takımının çözümü

Modelleme, bir fiziksel yapı veya sürecin analitik veya sayısal olarak yeniden inşa edilmesidir. Sonlu elemanlar yönteminde modelleme basitçe düğüm ve elemanlardan oluşan bir ağ yapısı hazırlamak değildir. Problemi gerekli şekilde modelleyebilmek için gerekli sayı ve tipteki elemana karar vermek ancak problemin fiziğinin iyi şekilde anlaşılmasıyla mümkündür. Kötü şekil verilmiş elemanlar ile hesaplanması istenilen büyüklüğün hesaplama alanı içindeki değişimini yansıtamayacak kadar büyük boyutlu elemanlar modellemede istenmez. Diğer yandan zaman ve bilgisayar olanaklarını boş yere harcamamıza neden olacak, gereksiz, çok sayıda elemandan oluşan bir modelleme de istenmemektedir. Hesaplanması istenilen büyüklüğü ve hesaplama alanı içindeki değişimini yeterli doğrulukta verecek kadar sıklıkta bir eleman dağılımına ihtiyaç vardır. Hesaplanan değerlerin kabul edilebilir olup olmadıklarının kontrol edilmesi ayrı bir öneme sahiptir [23, 24].

5.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Üç Boyutlu Problemlerin Çözümü



Şekil 5.1: Üç Boyutlu Örnek Bir Eleman.

En basit üç boyutlu eleman, düğümlerinden herbiri bir köşesinde bulunan dört düğümlü düzgün dört yüzlüdür. Bu elemanda düğümler 1, 2, 3 ve 4 olarak saat yönünün tersi yönünde, herhangi bir yüzden başlayarak numaralandırılır (Şekil 5.1).

Düğüm potansiyelleri V_1, V_2, V_3, V_4 ve düğüm genel koordinatları (x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3), (x_4, y_4, z_4) olarak gösterilir ve eleman içinde potansiyelin çokterimli biçimindeki bir işleve göre doğrusal olarak değiştiği varsayılırsa

$$V(x,y,z) = a + bx + cy + dz \tag{5.2}$$

yazılır. Her düğümün potansiyeli ve koordinatları kullanılarak aşağıdaki denklem sistemi elde edilebilir:

$$\begin{aligned} V_1 &= a + bx_1 + cy_1 + dz_1 \\ V_2 &= a + bx_2 + cy_2 + dz_2 \\ V_3 &= a + bx_3 + cy_3 + dz_3 \\ V_4 &= a + bx_4 + cy_4 + dz_4 \end{aligned} \tag{5.3}$$

Bu denklem sistemi çözülerek a, b, c ve d katsayıları

$$a = \frac{1}{6V}(a_1V_1 + a_2V_2 + a_3V_3 + a_4V_4) \tag{5.4}$$

$$b = \frac{1}{6V}(b_1V_1 + b_2V_2 + b_3V_3 + b_4V_4) \tag{5.5}$$

$$c = \frac{1}{6V}(c_1V_1 + c_2V_2 + c_3V_3 + c_4V_4) \tag{5.6}$$

$$d = \frac{1}{6V}(d_1V_1 + d_2V_2 + d_3V_3 + d_4V_4) \tag{5.7}$$

olarak bulunur. Bu eşitliklerde V dörtyüzlünün hacmidir ve

$$V = \frac{1}{6}\begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \tag{5.8}$$

dir. a, b, c, d'nin içindeki katsayılar ise

$$a_1 = \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} = (x_2y_3z_4 + x_4y_2z_3 + x_3y_4z_2) - (x_4y_3z_2 + x_2y_4z_3 + x_3y_2z_4)$$

(5.9)

$$a_2 = -\begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} = (x_4y_3z_1 + x_3y_1z_4 + x_1y_4z_3) - (x_1y_3z_4 + x_4y_1z_3 + x_3y_4z_1)$$

(5.10)

$$a_3 = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} = (x_1y_2z_4 + x_4y_1z_2 + x_2y_4z_1) - (x_4y_2z_1 + x_2y_1z_4 + x_1y_4z_2)$$

(5.11)

$$a_4 = -\begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix} = (x_3y_2z_1 + x_2y_1z_3 + x_1y_3z_2) - (x_1y_2z_3 + x_2y_3z_1 + x_3y_1z_2)$$

(5.12)

$$b_1 = -\begin{vmatrix} 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} = (y_3z_2 + y_2z_4 + y_4z_3) - (y_3z_4 + y_2z_3 + y_4z_2) \qquad \textbf{(5.13)}$$

$$b_2 = \begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} = (y_3z_4 + y_1z_3 + y_4z_1) - (y_3z_1 + y_4z_3 + y_1z_4) \qquad \textbf{(5.14)}$$

$$b_3 = -\begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} = (y_2z_1 + y_4z_2 + y_1z_4) - (y_2z_4 + y_1z_2 + y_4z_1) \qquad \textbf{(5.15)}$$

$$b_4 = \begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \end{vmatrix} = (y_2z_3 + y_1z_2 + y_3z_1) - (y_2z_1 + y_3z_2 + y_1z_3) \qquad \textbf{(5.16)}$$

$$c_1 = -\begin{vmatrix} x_2 & 1 & z_2 \\ x_3 & 1 & z_3 \\ x_4 & 1 & z_4 \end{vmatrix} = (x_4z_2 + x_3z_4 + x_2z_3) - (x_2z_4 + x_3z_2 + x_4z_3) \quad \textbf{(5.17)}$$

$$c_2 = \begin{vmatrix} x_1 & 1 & z_1 \\ x_3 & 1 & z_3 \\ x_4 & 1 & z_4 \end{vmatrix} = (x_1z_4 + x_3z_1 + x_4z_3) - (x_4z_1 + x_3z_4 + x_1z_3) \quad \textbf{(5.18)}$$

$$c_3 = -\begin{vmatrix} x_1 & 1 & z_1 \\ x_2 & 1 & z_2 \\ x_4 & 1 & z_4 \end{vmatrix} = (x_4z_1 + x_2z_4 + x_1z_2) - (x_1z_4 + x_2z_1 + x_4z_2) \quad \textbf{(5.19)}$$

$$c_4 = \begin{vmatrix} x_1 & 1 & z_1 \\ x_2 & 1 & z_2 \\ x_3 & 1 & z_3 \end{vmatrix} = (x_1z_3 + x_2z_1 + x_3z_2) - (x_3z_1 + x_2z_3 + x_1z_2) \quad \textbf{(5.20)}$$

$$d_1 = -\begin{vmatrix} x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & 1 \end{vmatrix} = (x_4y_3 + x_3y_2 + x_2y_4) - (x_2y_3 + x_3y_4 + x_4y_2) \quad \textbf{(5.21)}$$

$$d_2 = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & 1 \end{vmatrix} = (x_1y_3 + x_3y_4 + x_4y_1) - (x_4y_3 + x_3y_1 + x_1y_4) \quad \textbf{(5.22)}$$

$$d_3 = -\begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_4 & y_4 & 1 \end{vmatrix} = (x_4y_2 + x_2y_1 + x_1y_4) - (x_1y_2 + x_2y_4 + x_4y_1) \quad \textbf{(5.23)}$$

$$d_4 = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix} = (x_1y_2 + x_2y_3 + x_3y_1) - (x_3y_2 + x_2y_1 + x_1y_3) \quad \textbf{(5.24)}$$

dir. Üç boyutlu ve dörtyüzlü elemanlardan oluşmuş bir bölgede herbir eleman içindeki potansiyel dağılımı o elemana ilişkin bulunan a, b, c, d katsayıları

$$V(x,y) = a + bx + cy + dz$$

bağıntısında yerine konularak bulunabilir. Buna göre bir eleman için potansiyel bağıntısı

$$V(x,y,z) = \begin{bmatrix} 1 & x & y & z \end{bmatrix} \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad \textbf{(5.25)}$$

olur. Buradan V(x, y, z) bağıntısı kapalı biçimde

$$V(x,y,z) = \alpha_1 V_1 + \alpha_2 V_2 + \alpha_3 V_3 + \alpha_4 V_4 = \sum_{i=1}^{4} \alpha_i V_i \quad \textbf{(5.26a)}$$

veya

$$V(x,y,z) = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \alpha_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad \textbf{(5.26b)}$$

elde edilir. Köşelerindeki potansiyel değerleri bilinen bir eleman içinde herhangi (x,y,z) noktasındaki potansiyel değeri yukarıdaki bağıntılardan yararlanılarak bulunabilir. Son yazılan eşitliklerde

$$\alpha_1(x,y,z) = \frac{1}{6V}(a_1 + b_1 x + c_1 y + d_1 z) \quad \textbf{(5.27)}$$

$$\alpha_2(x,y,z) = \frac{1}{6V}(a_2 + b_2 x + c_2 y + d_2 z) \quad \textbf{(5.28)}$$

$$\alpha_3(x,y,z) = \frac{1}{6V}(a_3 + b_3 x + c_3 y + d_3 z) \quad \textbf{(5.29)}$$

$$\alpha_4(x,y,z) = \frac{1}{6V}(a_4 + b_4 x + c_4 y + d_4 z) \quad \textbf{(5.30)}$$

olup kullanılan sonlu elemanların şekline bağlı biçim işlevleridir (şekil fonksiyonlarıdır). α biçim işlevleri, dört köşe arasında doğrusal interpolasyon

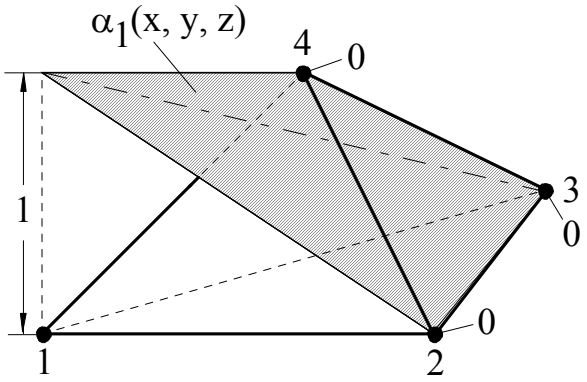
işlevleridir. i'inci köşe üzerinde, sadece o köşenin indisine sahip olan α_i bire, diğerleri ise sıfıra eşittir. Biçim işlevlerinin bu özelliği

$$\alpha_i(x_j, y_j, z_j) = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \tag{5.31}$$

ve

$$\sum_{i=1}^{4} \alpha_i(x,y) = 1 \tag{5.32}$$

şeklinde yazılabilir. Şekil 5.2'de örnek olarak $\alpha_1(x,y,z)$ biçim işlevinin değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.2: Bir Biçim İşlevinin Değişimi.

Bir dörtyüzlü eleman içindeki elektrostatik potansiyel enerji

$$W^{(e)} = \frac{1}{2}\iiint_V \varepsilon |E|^2 dV = \frac{1}{2}\iiint_V \varepsilon \left|\nabla V^{(e)}\right|^2 dV \tag{5.33}$$

dir. Burada üç boyutlu çözüm bölgesi içinde serbest yüklerin bulunmadığı $(\rho = 0)$ kabul edilir. Eleman içindeki potansiyelin değişim bağıntısı

$$V(x,y,z) = V^{(e)} = \sum_{i=1}^{4} \alpha_i V_i \tag{5.34}$$

ve V_i sabit, $\alpha_i = \alpha_i(x,y,z)$ olduğundan eleman içindeki potansiyelin gradyanı

$$\nabla V^{(e)} = \sum_{i=1}^{4} V_i \cdot \nabla \alpha_i \qquad \textbf{(5.35)}$$

olur. Bunu $W^{(e)}$ bağıntısında kullanmak için $\left|\nabla V^{(e)}\right|^2$ terimi çarpımların toplamı şeklinde yazılırsa

$$\left|\nabla V^{(e)}\right|^2 = \sum_{i=1}^{4} \sum_{j=1}^{4} V_i \cdot V_j \cdot \nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j \qquad \textbf{(5.36)}$$

bulunur. Bu da enerji bağıntısında yerine konursa

$$W^{(e)} = \frac{1}{2} \varepsilon \sum_{i=1}^{4} \sum_{j=1}^{4} V_i \cdot \left| \iiint \nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j \cdot dV \right| \cdot V_j \qquad \textbf{(5.37)}$$

bağıntısı elde edilir. Burada

$$\iiint \nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j \cdot dV = k_{ij}^{(e)} \qquad \textbf{(5.38)}$$

olarak belirtilirse $W^{(e)}$ bağıntısı ikinci dereceden bir matris biçiminde

$$W^{(e)} = \frac{1}{2} \varepsilon \left[V^{(e)}\right]^T \cdot \left[K^{(e)}\right] \cdot \left[V^{(e)}\right] \qquad \textbf{(5.39)}$$

olur. Burada $\left[V^{(e)}\right]$ sütun matris, $\left[V^{(e)}\right]^T$ ise bu matrisin transpozesi (devriği) dir.

$$\left[V^{(e)}\right] = \begin{bmatrix} V_1^{(e)} \\ V_2^{(e)} \\ V_3^{(e)} \\ V_4^{(e)} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(5.40)}$$

$$\left[K^{(e)}\right] = \begin{bmatrix} k_{11}^{(e)} & k_{12}^{(e)} & k_{13}^{(e)} & k_{14}^{(e)} \\ k_{21}^{(e)} & k_{22}^{(e)} & k_{23}^{(e)} & k_{24}^{(e)} \\ k_{31}^{(e)} & k_{32}^{(e)} & k_{33}^{(e)} & k_{34}^{(e)} \\ k_{41}^{(e)} & k_{42}^{(e)} & k_{43}^{(e)} & k_{44}^{(e)} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(5.41)}$$

Bu matris, bir elemana ilişkin katsayılar matrisi olarak adlandırılır. Simetrik ve kare matris olan katsayılar matrisinin $k_{ij}^{(e)}$ terimleri, i ve j düğümleri arasındaki ilişkiyi gösteren terimlerdir. Katsayılar matrisinin terimleri

$$k_{ij}^{(e)} = \iiint \nabla\alpha_i \cdot \nabla\alpha_j \cdot dV \qquad \textbf{(5.42)}$$

bağıntısında α(x, y, z) biçim işlevlerinin gradyanları kullanılarak hesaplanabilir. Skaler çarpımda $\vec{i}\cdot\vec{i} = \vec{j}\cdot\vec{j} = \vec{k}\cdot\vec{k} = 1$, $\vec{i}\cdot\vec{j} = \vec{i}\cdot\vec{k} = \vec{j}\cdot\vec{k} = 0$ olduğu göz önüne alınarak

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

$$= \iiint \left[\frac{1}{6V}\left(\frac{\partial\alpha_1}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\alpha_1}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\alpha_1}{\partial z}\vec{k}\right)\right]\left[\frac{1}{6V}\left(\frac{\partial\alpha_1}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\alpha_1}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\alpha_1}{\partial z}\vec{k}\right)\right]\cdot dV$$

$$= \frac{1}{36V^2}(b_1\vec{i} + c_1\vec{j} + d_1\vec{k})(b_1\vec{i} + c_1\vec{j} + d_1\vec{k})\iiint dV$$

$$= \frac{1}{36V}(b_1^2 + c_1^2 + d_1^2) \qquad \textbf{(5.43)}$$

$$k_{12}^{(e)} = \iiint \nabla\alpha_1 \cdot \nabla\alpha_2 \cdot dV$$

$$= \iiint \left[\frac{1}{6V}\left(\frac{\partial\alpha_1}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\alpha_1}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\alpha_1}{\partial z}\vec{k}\right)\right]\left[\frac{1}{6V}\left(\frac{\partial\alpha_2}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\alpha_2}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\alpha_2}{\partial z}\vec{k}\right)\right]\cdot dV$$

$$= \frac{1}{36V^2}(b_1\vec{i} + c_1\vec{j} + d_1\vec{k})(b_2\vec{i} + c_2\vec{j} + d_2\vec{k})\iiint dV$$

$$= \frac{1}{36V}(b_1^2\, b_2^2 + c_1^2\, c_2^2 + d_1^2\, d_2^2) \qquad \textbf{(5.44)}$$

$$k_{13}^{(e)} = \iiint \nabla\alpha_1 \cdot \nabla\alpha_3 \cdot dV$$

$$= \iiint \left[\frac{1}{6V}\left(\frac{\partial\alpha_1}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\alpha_1}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\alpha_1}{\partial z}\vec{k}\right)\right]\left[\frac{1}{6V}\left(\frac{\partial\alpha_3}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\alpha_3}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\alpha_3}{\partial z}\vec{k}\right)\right]\cdot dV$$

$$= \frac{1}{36V^2}(b_1\underset{\rightarrow}{i} + c_1\underset{\rightarrow}{j} + d_1\underset{\rightarrow}{k})(b_3\underset{\rightarrow}{i} + c_3\underset{\rightarrow}{j} + d_3\underset{\rightarrow}{k})\iiint dV$$

$$= \frac{1}{36V}(b_1^2\, b_3^2 + c_1^2\, c_3^2 + d_1^2\, d_3^2) \qquad \textbf{(5.45)}$$

$$k_{14}^{(e)} = \iiint \nabla\alpha_1 \cdot \nabla\alpha_4 \cdot dV$$

$$= \iiint \left[\frac{1}{6V}\left(\frac{\partial\alpha_1}{\partial x}\underset{\rightarrow}{i} + \frac{\partial\alpha_1}{\partial y}\underset{\rightarrow}{j} + \frac{\partial\alpha_1}{\partial z}\underset{\rightarrow}{k}\right)\right]\left[\frac{1}{6V}\left(\frac{\partial\alpha_4}{\partial x}\underset{\rightarrow}{i} + \frac{\partial\alpha_4}{\partial y}\underset{\rightarrow}{j} + \frac{\partial\alpha_4}{\partial z}\underset{\rightarrow}{k}\right)\right]\cdot dV$$

$$= \frac{1}{36V^2}(b_1\underset{\rightarrow}{i} + c_1\underset{\rightarrow}{j} + d_1\underset{\rightarrow}{k})(b_4\underset{\rightarrow}{i} + c_4\underset{\rightarrow}{j} + d_4\underset{\rightarrow}{k})\iiint dV$$

$$= \frac{1}{36V}(b_1^2\, b_4^2 + c_1^2\, c_4^2 + d_1^2\, d_4^2) \qquad \textbf{(5.46)}$$

Benzer şekilde

$$k_{21}^{(e)} = k_{12}^{(e)} \qquad \textbf{(5.47)}$$

$$k_{22}^{(e)} = \frac{1}{36V}(b_2^2 + c_2^2 + d_2^2) \qquad \textbf{(5.48)}$$

$$k_{23}^{(e)} = \frac{1}{36V}(b_2^2\, b_3^2 + c_2^2\, c_3^2 + d_2^2\, d_3^2) \qquad \textbf{(5.49)}$$

$$k_{24}^{(e)} = \frac{1}{36V}(b_2^2\, b_4^2 + c_2^2\, c_4^2 + d_2^2\, d_4^2) \qquad \textbf{(5.50)}$$

$$k_{31}^{(e)} = k_{13}^{(e)} \qquad \textbf{(5.51)}$$

$$k_{32}^{(e)} = k_{23}^{(e)} \qquad \textbf{(5.52)}$$

$$k_{33}^{(e)} = \frac{1}{36V}(b_3^2 + c_3^2 + d_3^2) \qquad \textbf{(5.53)}$$

$$k_{34}^{(e)} = \frac{1}{36V}(b_3^2\, b_4^2 + c_3^2\, c_4^2 + d_3^2\, d_4^2) \qquad \textbf{(5.54)}$$

$$k_{41}^{(e)} = k_{14}^{(e)} \tag{5.55}$$

$$k_{42}^{(e)} = k_{24}^{(e)} \tag{5.56}$$

$$k_{43}^{(e)} = k_{34}^{(e)} \tag{5.57}$$

$$k_{44}^{(e)} = \frac{1}{36V}(b_4^2 + c_4^2 + d_4^2) \tag{5.58}$$

veya genel olarak i = 1, 2, 3, 4 ve j = 1, 2, 3, 4 olmak üzere eleman katsayılar matrisinin terimleri

$$k_{ij}^{(e)} = \frac{1}{36V}(b_i^2\, b_j^2 + c_i^2\, c_j^2 + d_i^2\, d_j^2) \tag{5.59}$$

eşitliğinden bulunabilir [25, 26].

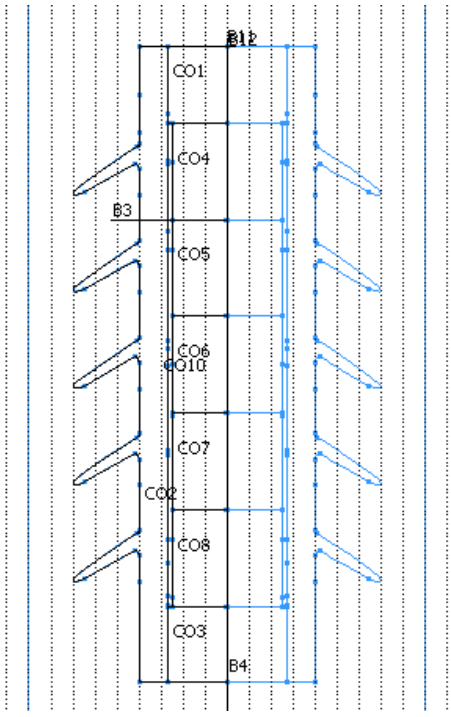
6. SEY İLE YAPILAN MODELLEMELER

Bu bölümde, tez kapsamında yapılan, parafudrlarda SEY ile gerilim dağılımı incelemelerinin açıklamaları ve sonuçları sunulmuştur.

6.1 Örnek Parafudr Modelinin Oluşturulması

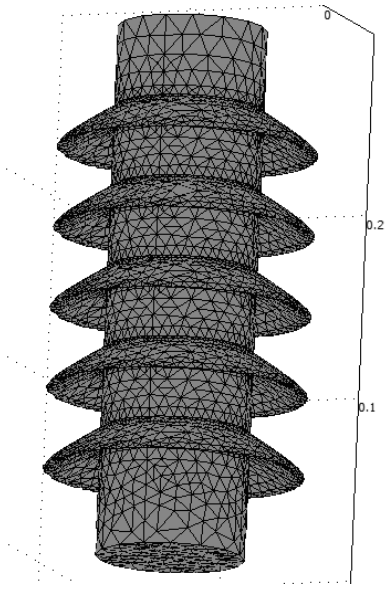
Modellemede göz önüne alınan polimer gövdeli parafudrun teknik bilgileri [27, 28]:
İşletme gerilimi: 21 kV;
Parafudrun yüksekliği: 289 mm;
Gövde izolatörünün etek sayısı: 5; izolatör eteklerinin çapı: 140 mm;
Polimer gövdenin bağıl dielektrik sabiti, $\varepsilon_r = 3,9$;
ZnO disklerin çapı: 50 mm; ZnO'nun bağıl dielektrik sabiti, $\varepsilon_r = 800$;
Fiber glas kalınlığı: 2 mm; Fiber glasın bağıl dielektrik sabiti, $\varepsilon_r = 4,6$.

Bu veriler kullanılarak SEY ile analiz yapan bir bilgisayar programında parafudr modellemesi yapılmıştır. İlk aşama olan çizim kısmı Şekil 6.1'de gösterilmektedir.



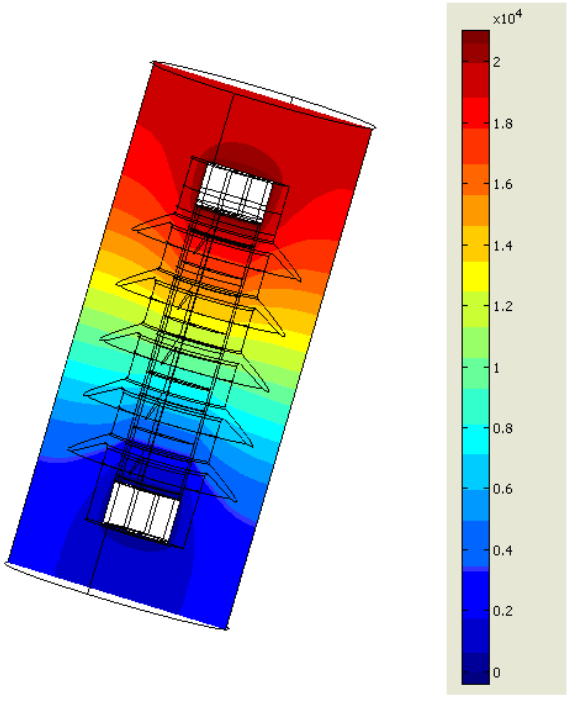
Şekil 6.1: Parafudrun Boyuna Kesit Çizimi.

Parafudrun kesit çizimi yapıldıktan, yapısındaki malzemelerin elektriksel özellikleri belirtildikten ve problemin sınır koşulları tanımlandıktan sonra SEY ağı oluşturma işlemi gerçekleştirilir. Şekil 6.2'de elde edilen üç boyutlu SEY ağı gösterilmiştir.



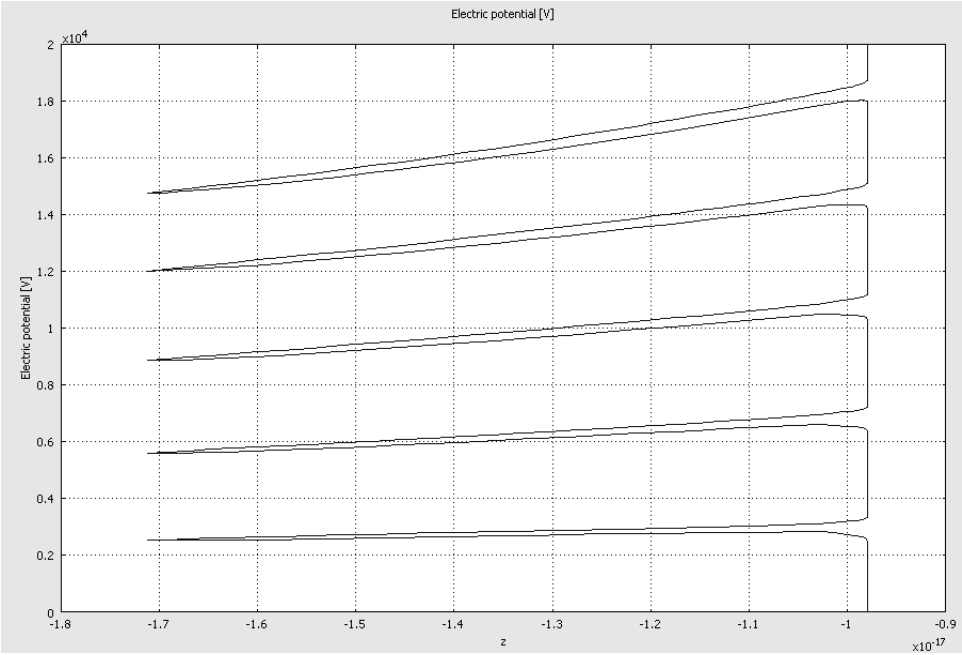
Şekil 6.2: Parafudrun Oluşturulan Sonlu Elemanlar Ağı.

Ağ oluşturulduktan sonra problem çözdürülerek programdan istenen elektriksel büyüklüklerle ilgili bilgiler alınabilmektedir. Şekil 6.3'te bu şekilde elde edilmiş parafudr üzerindeki potansiyel dağılımı gösterilmektedir.

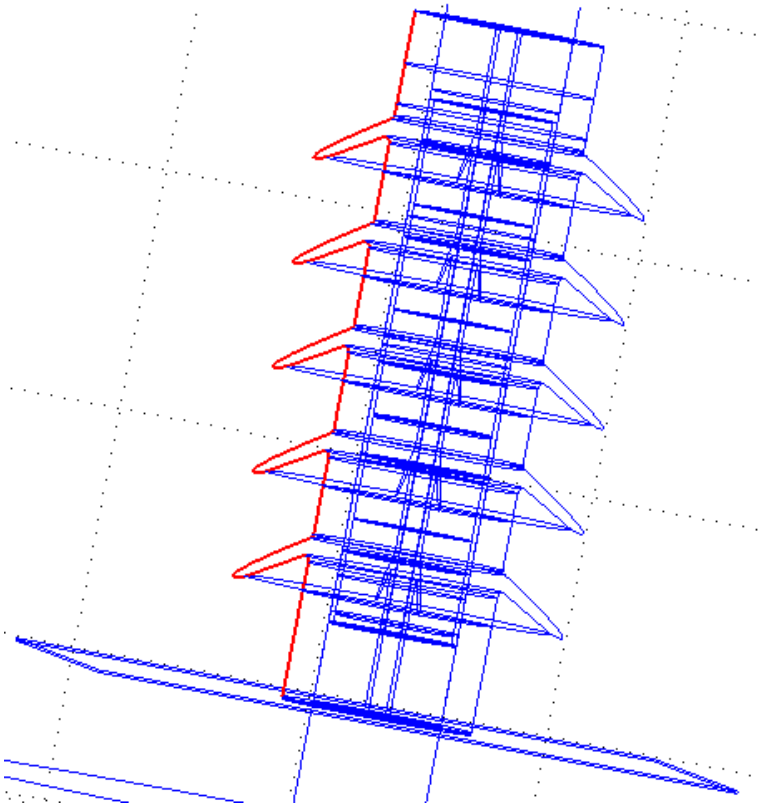


Şekil 6.3: Parafudr Üzerindeki Potansiyel Dağılımı.

Şekil 6.4'te parafudr gövdesi üzerindeki gerilim dağılımının grafiği, Şekil 6.5'te ise bu değerlerin parafudr üzerinde alındığı (kırmızı) sınırı gösteren çizim verilmektedir.



Şekil 6.4: Parafudr Üzerindeki Gerilim Dağılımının Grafiği.

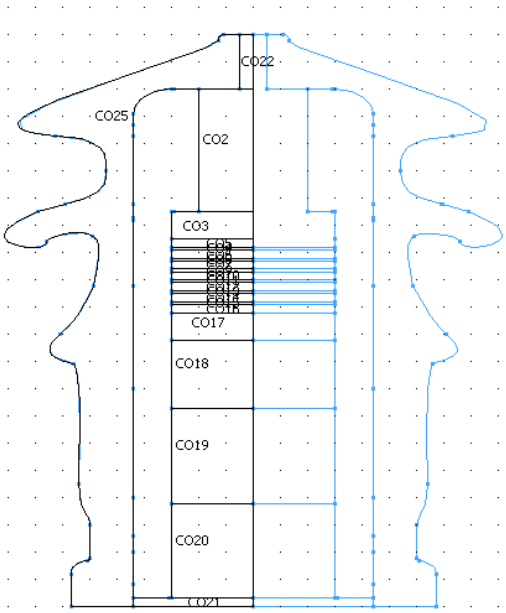


Şekil 6.5: Gerilim Dağılımı Grafiğinin Parafudr Üzerinden Alındığı Sınır.

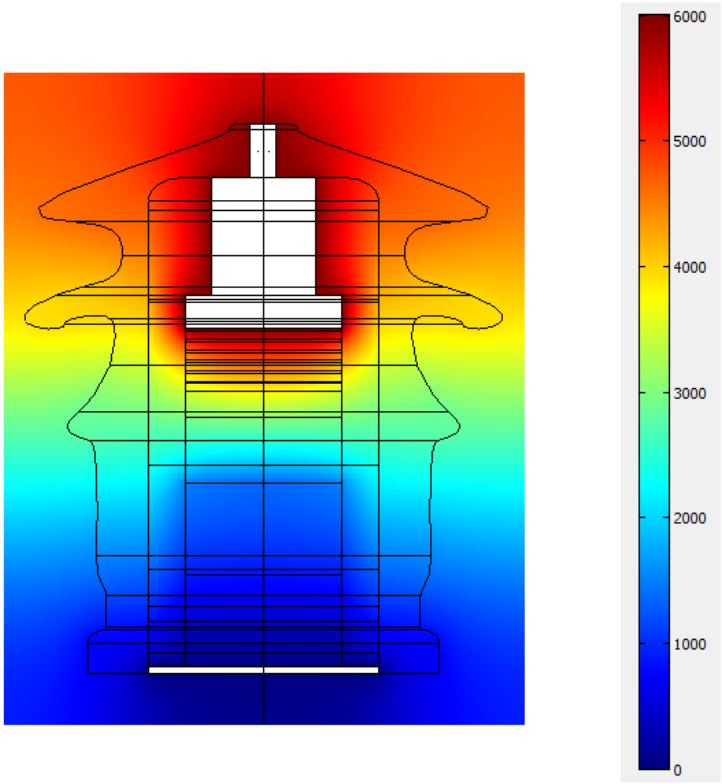
Metal oksit parafudrla karşılaştırma yapmak amacıyla işletme gerilimi 6 kV, boyu 210 mm olan atlama aralıklı, silisyum karbür (SiC) dirençli bir parafudrun da modellemesi yapılmıştır. Şekil 6.6'da atlama aralıklı parafudrun iç ve dış görünümü, Şekil 6.7'de bu parafudrun kesit çizimi, Şekil 6.8'de ise parafudr yüzeyi boyunca bulunan potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 6.6: Silisyum Karbür Dirençli Parafudrun İç ve Dış Görünüşü.

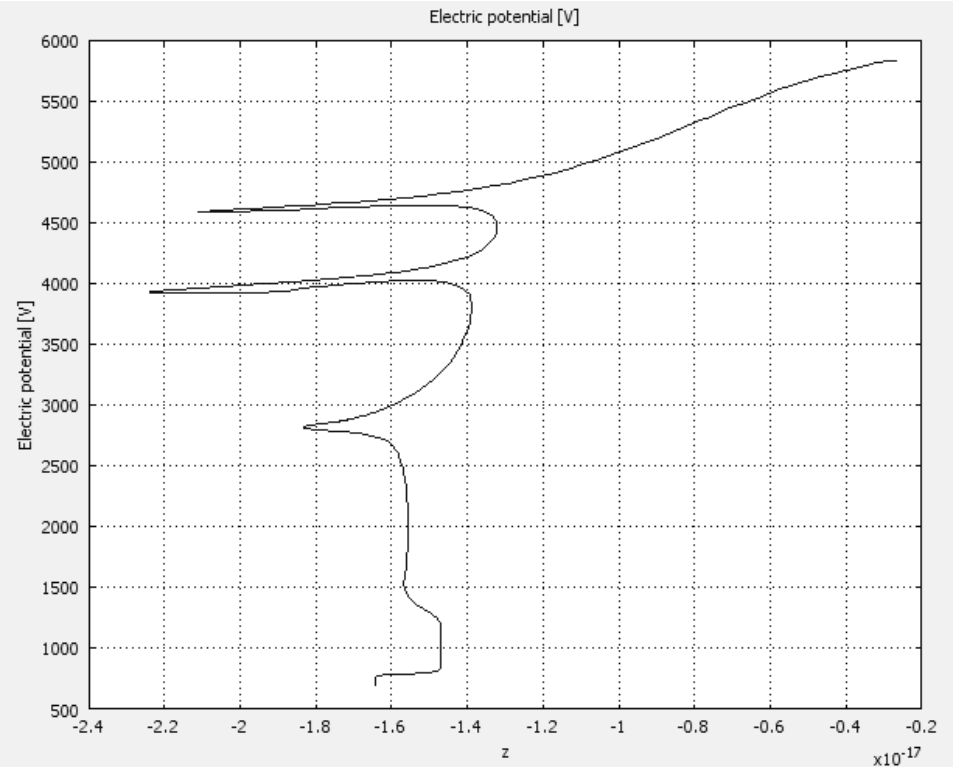


Şekil 6.7: Silisyum Karbür Dirençli Parafudrun Boyuna Kesit Çizimi.



Şekil 6.8: Silisyum Karbür Dirençli Parafudr İçin Bulunan Potansiyel Dağılımı.

Şekil 6.9'dan da görülebileceği üzere, metal oksit parafudrlarla karşılaştırıldığında silisyum karbür dirençli parafudrlardaki gerilim dağılımı çok daha düzensizdir. Bunun başlıca sebebi, bağıl dielektrik sabiti 9,72 olan silisyum karbür dirençlerdir. Bu dirençlerin akım-gerilim karakteristiklerinin doğrusal olmama (nonlineerlik) katsayıları 2 ila 6 arasında olduğundan, bu tür dirençlerin kullanıldığı parafudurlarda seri eklatörlerin kullanılması gerekmektedir. Seri eklatörler, silisyum karbür değişken dirençlere seri olarak bağlı olan ve aralarında hava boşlukları bulunan elektrotlardır. Seri eklatörlerin (atlama aralıklarının) görevleri; normal işletme koşullarında şebekenin yalıtım düzeyini korumak, herhangi bir aşırı gerilimde gerilim belirli bir değeri (koruma düzeyini) aştığı zaman gecikmesiz olarak çalışmak, parafudr çalışırken parafudrdan akan şebeke akımı olan ard akımını sıfırdan geçişi sırasında kesmek, boşalma ve ard akımlarını elektrot yüzeylerinde herhangi bir arıza meydana getirmeden boşaltmaktır [10]. Daha önceki bölümlerde de söz edildiği üzere, seri eklatörler birçok soruna neden olmakta ve gerilim dağılımını düzensizleştirmektedirler. Silisyum karbür dirençli parafudrların karmaşık olan yapıları da gerilim dağılımını bozan bir başka etkendir.

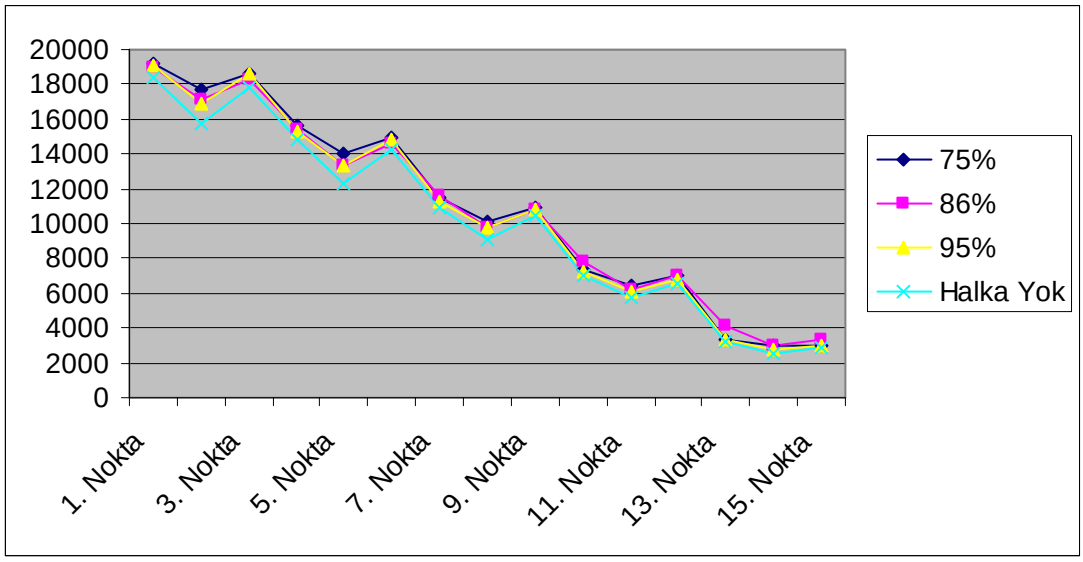


Şekil 6.9: SiC Dirençli Parafudr Üzerindeki Gerilim Dağılımının Grafiği.

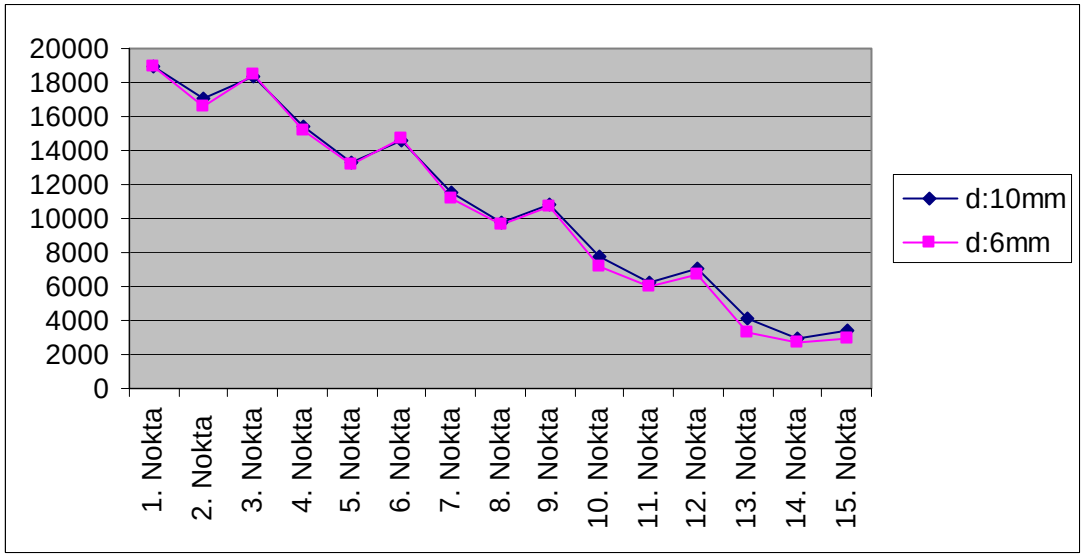
6.2 Alan Düzenleyici Eklenmesi

Şekil 6.4'ten açıkça görüldüğü üzere, parafudr yüzeyi boyunca gerilim dağılımı oldukça düzensizdir. Bu düzensizliğin ne gibi sorunlara yol açacağından önceki bölümlerde söz edilmiştir. Aynı bölümlerde gerilim dağılımının nasıl daha düzgün hale getirilebileceğinden de söz edilmiştir. Öne sürülen çözümler her parafudr için farklılık göstermektedir. Buradaki parafudrun gerilim dağılımını daha düzgün bir hale getirmek için halka şeklinde bir alan düzenleyici elektrot eklenebilir. Bunu için alan düzenleyici elektrodun konum yüksekliği ve kesiti belirlenmelidir. Şekil 6.10'da, farklı alan düzenleyici yükseklikleri için parafudr yüzeyinde aynı noktalardan alınan potansiyel değerleri karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırma sonucunda alan düzenleyicinin yüksekliği için, 289 mm'lik parafudr boyunun %86'sı olan 249 mm'lik yüksekliğin uygun olduğu görülmüştür. Halkanın kesiti için de 78,5 mm^2 (10 mm çap) uygundur. Önceki bölümlerdeki açıklamalarda da söylendiği üzere, halkanın kesiti ne kadar büyük olursa o kadar iyi sonuç alınmaktadır. Fakat modellenen parafudrun boyutları göz önüne alındığı zaman, daha büyük kesitli bir halkanın kullanılması pratikte pek mümkün olmadığından sonuçları da gerçekçi olmayacaktır. Şekil 6.11'de parafudr boyunun %86 yüksekliğindeki alan düzenleyici

için, 10 mm ve 6 mm çapında halkalar (alan düzenleyici elektrotlar) kullanıldığında oluşan gerilim dağılımları verilmektedir. Buradan da görülebileceği üzere, halka kesiti ne kadar büyükse gerilim dağılımı da o kadar düzgün olmaktadır.

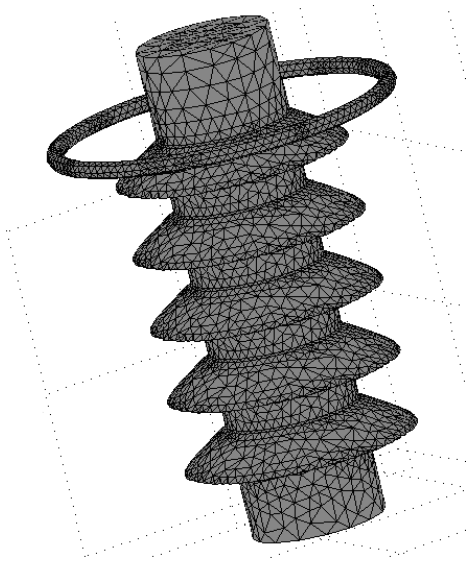


Şekil 6.10: Farklı Alan Düzenleyici Elektrot Yükseklikleri İçin Gerilim Dağılımları.

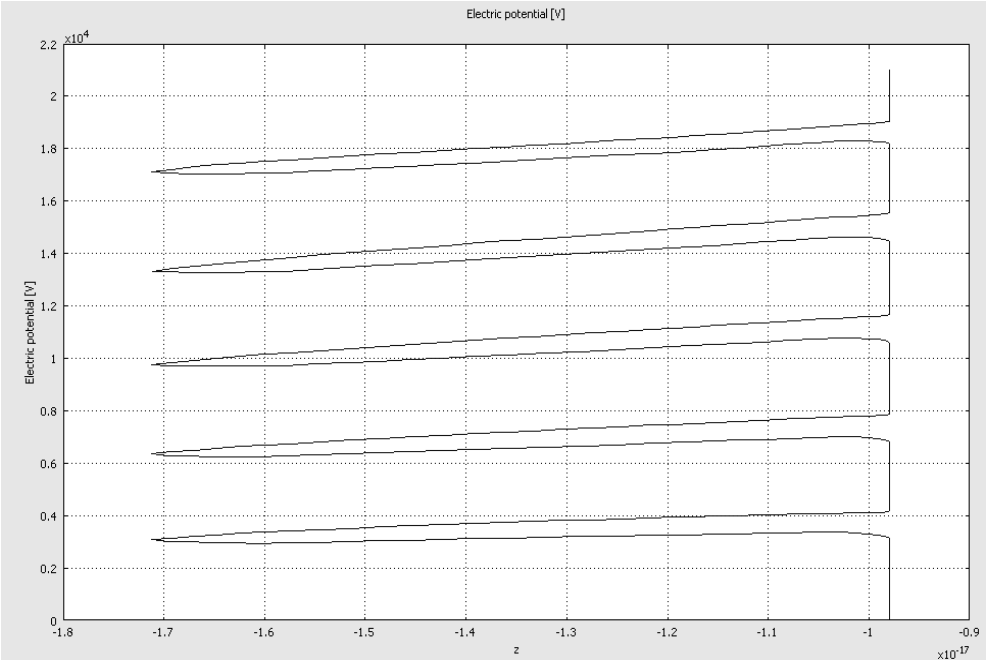


Şekil 6.11: Parafudr Boyunun %86 Yüksekliğindeki Alan Düzenleyici İçin Farklı Halka Çaplarındaki Gerilim Dağılımları.

Şekil 6.12'de parafudrun alan düzenleyici eklenmiş hali, Şekil 6.13'te ise bu durumdaki gerilim dağılımının grafiği gösterilmektedir. Bu grafikten de görüldüğü üzere, uygun bir alan düzenleyici eklendiğinde gerilim dağılımı tamamen doğrusal olmasa bile önemli ölçüde düzeltilebilmektedir.



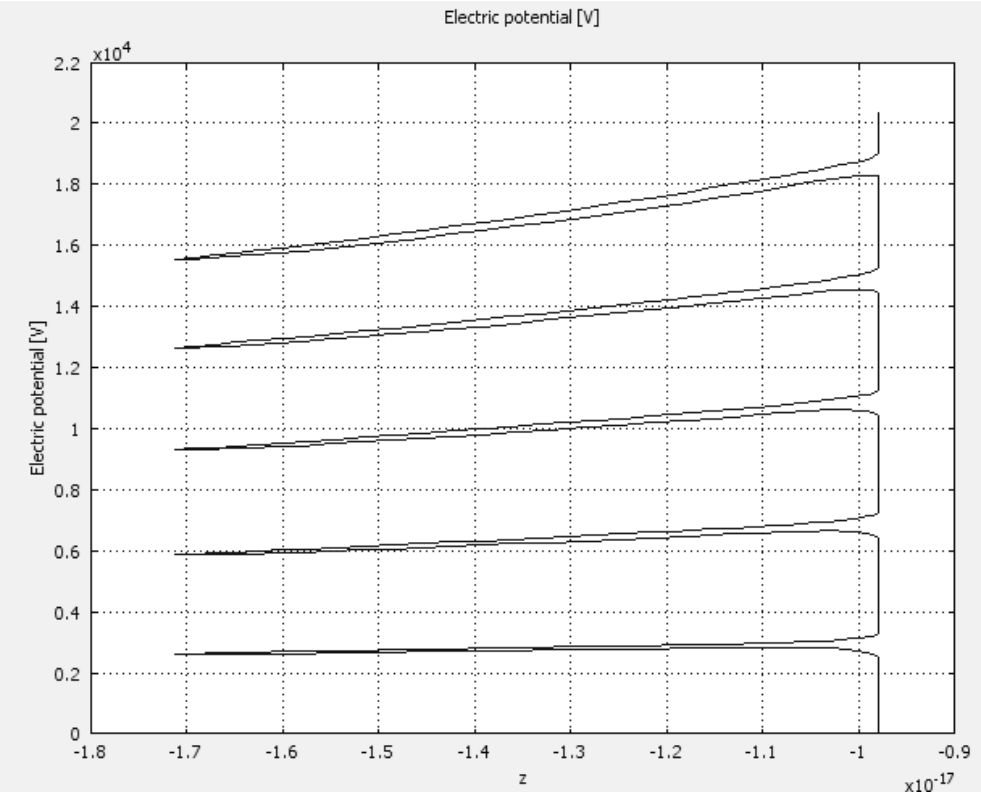
Şekil 6.12: Parafudrun Alan Düzenleyici Eklendiğindeki Üç Boyutlu SEY Ağı.



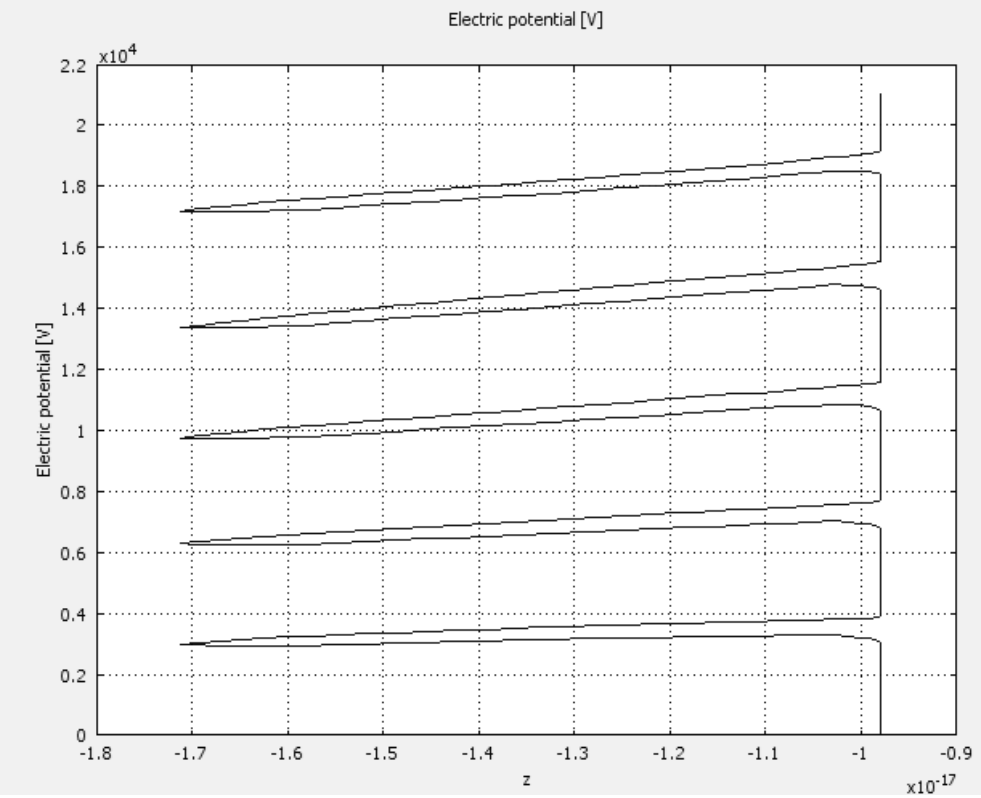
Şekil 6.13: Alan Düzenleyici Elektrot Varken Parafudr Üzerindeki Gerilim Dağılımının Grafiği.

6.3 Aynı Parafudr İçin İzolatör Malzemesinin ve Gerilim Seviyesinin Değiştirilmesi

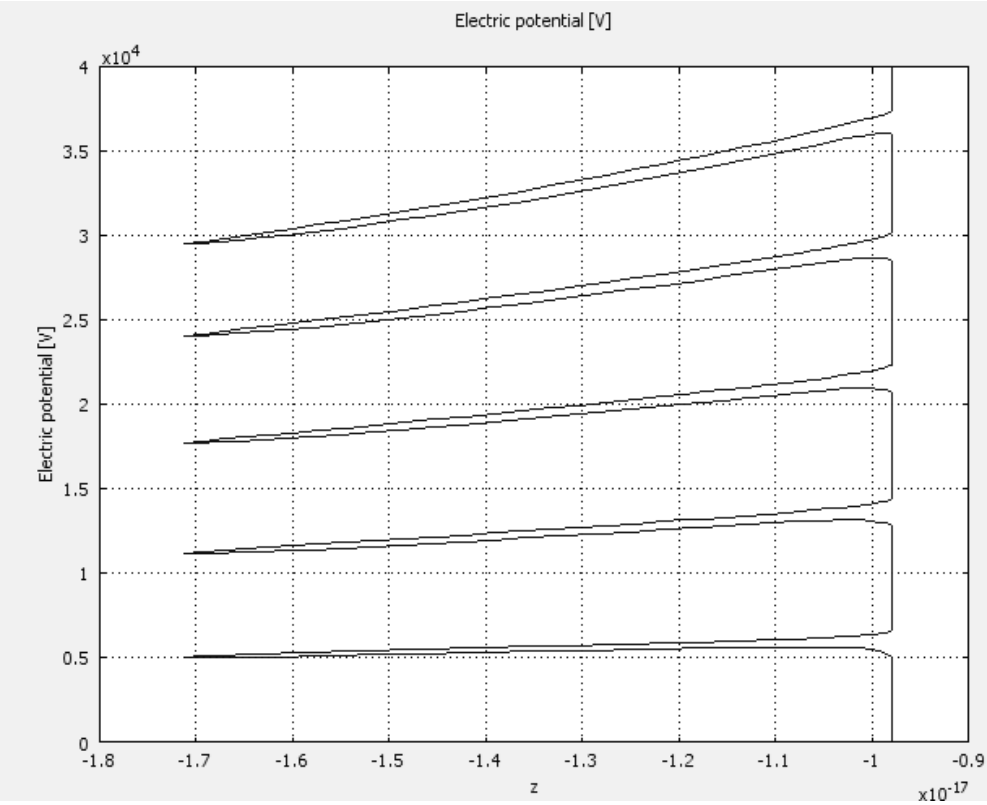
Aynı parafudr için izolatör malzemesi olarak bağıl dielektrik sabiti 3,9 olan polimer malzemesi kullanmak yerine, bağıl dielektrik sabiti 7 olan porselen kullanıldığı durum için ve gerilim seviyesinin 21 kV yerine 42 kV olduğu durum için de modellemeler yapılmıştır. Bu durumlar için gerilim dağılımı grafikleri Şekil 6.14, 6.15, 6.16 ve 6.17'de gösterilmektedir.



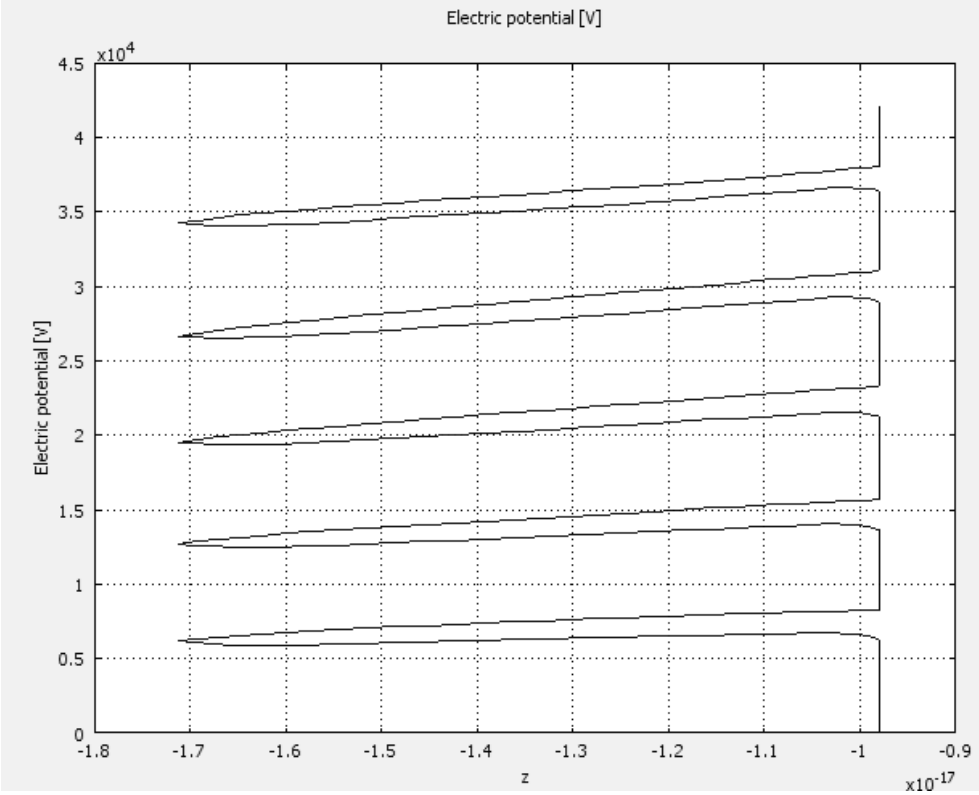
Şekil 6.14: Parafudr İzolatörünün Porselen Olması Durumu.



Şekil 6.15: Porselen İzolatör ve Alan Düzenleyici Olması Durumu.



Şekil 6.16: Gerilim Seviyesinin 42 kV Olması Durumu.



Şekil 6.17: Gerilim Seviyesi 42 kV ve Alan Düzenleyici Olması Durumu.

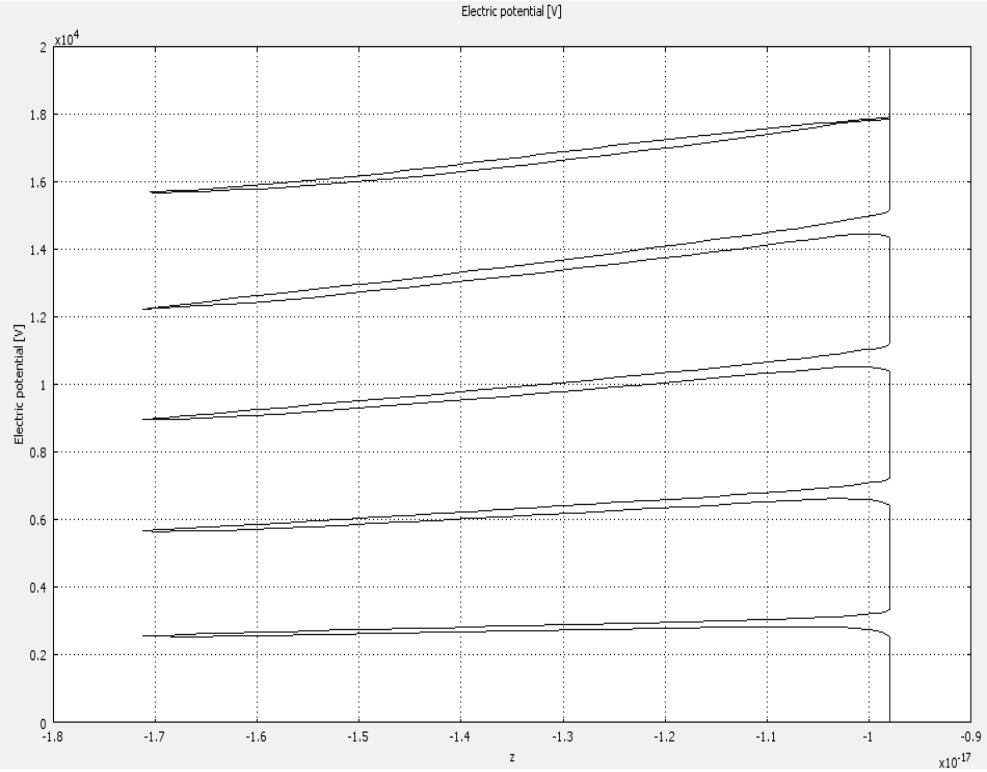
Bu grafiklerden izolatör malzemesinin polimer ya da porselen olmasının gerilim dağılımı üzerinde çok fazla bir etkisinin olmadığı görülmektedir. İki durumda da gerilim dağılımı yaklaşık aynı derecede düzensizdir ve alan düzenleyici eklendiğinde yine aynı derecede düzgün hale gelmektedir. Aynı durum, gerilim seviyesinin 42 kV'a çıkartıldığında da geçerlidir. Parafudr yüzeyi boyunca gerilim dağılımındaki düzensizlik yaklaşık olarak aynı seviyededir. Normal koşullarda gerilim seviyesi arttıkça, gerilim dağılımındaki düzensizliğin de artması beklenir fakat buradaki örneklemede iki gerilim seviyesi için de aynı boyutlardaki parafudr kullanılmıştır. Gerçekte gerilim seviyesi arttıkça parafudrun boyutları da büyür. Bu örneklerden anlaşılan, gerilim seviyesi arttıkça dağılımın daha düzensiz hale gelmesinin sebebinin artan gerilim seviyesi değil, artan parafudr yüksekliğinden kaynaklandığıdır.

6.4 Çeşitli Kirlenme Durumlarının İncelenmesi

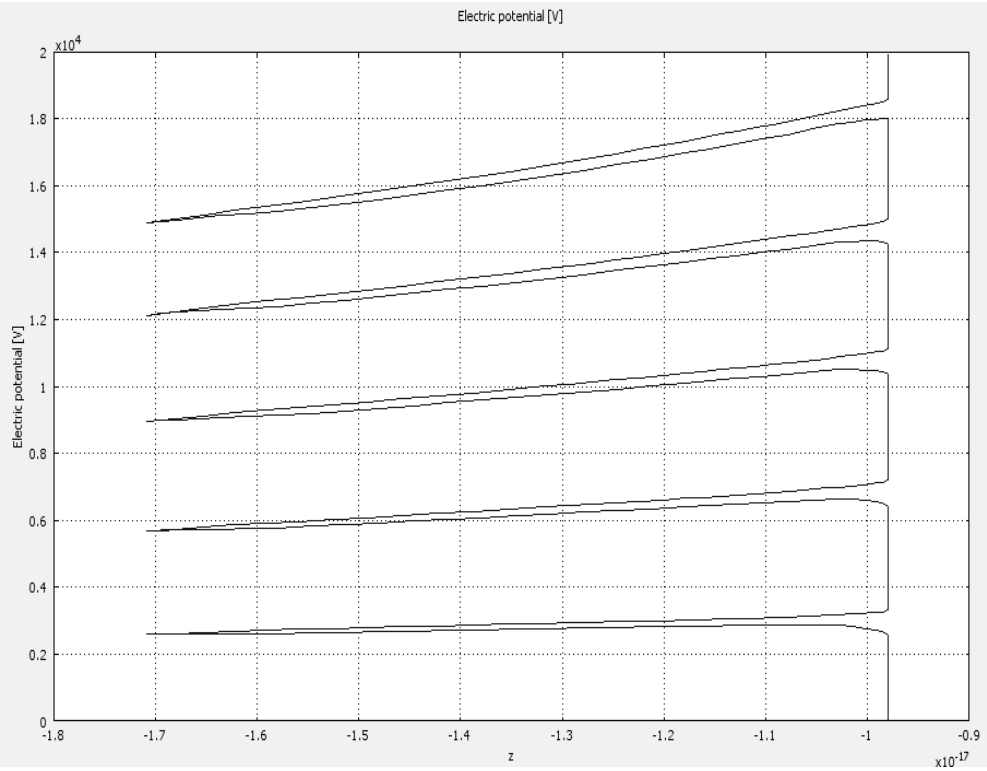
Parafudrların kirlenme durumları için yapılan çalışmalarda genellikle kirin parafudrun dışında eşit bir şekilde yayıldığı varsayılmaktadır. Bu durumda kirin etkisini göstermek için sadece dış yüzeyin elektriksel iletkenlik değeri değiştirilir. Fakat gerçekte parafudr dışındaki kirlenmenin her noktada eşit olması pek mümkün değildir. Buradaki çalışmada, gerçekte karşılaşılabileceği düşünülen çeşitli kirlenme durumları incelenmiştir. Bu durumların numaralandırılması şu şekilde yapılmıştır:

1. Durum: Kirlenmenin olmadığı, normal 21 kV'luk polimer gövdeli model;
2. Durum: Kirlenmenin olmadığı, alan düzenleyici eklenmiş durum;
3. Durum: Sadece en üstteki etekte 1 mm kalınlığında su olması ve eteğin ucundan suyun ($\varepsilon_r = 80$) damladığı durum;
4. Durum: 5 etekte de 2 mm kalınlığında buz ($\varepsilon_r = 3.5$) olması durumu;
5. Durum: 5 etekte de 2 mm kalınlığında kir ($\varepsilon_r = 3$) olması durumu;
6. Durum: 5 etekte de 2 mm kalınlığında kir ($\varepsilon_r = 10$) olması durumu;
7. Durum: 5 etekte de 4 mm kalınlığında kir ($\varepsilon_r = 10$) olması durumu;
8. Durum: 5 etekte de 4 mm kalınlığında buz ($\varepsilon_r = 3.5$) olması ve eteğin ucundan buzun sarkıt halinde uzanması durumu.

3 – 8 arasındaki kirlenme durumlarının gerilim dağılımı grafikleri sırasıyla Şekil 6.18, 6.19, 6.20, 6.21, 6.22 ve 6.23'te verilmektedir.

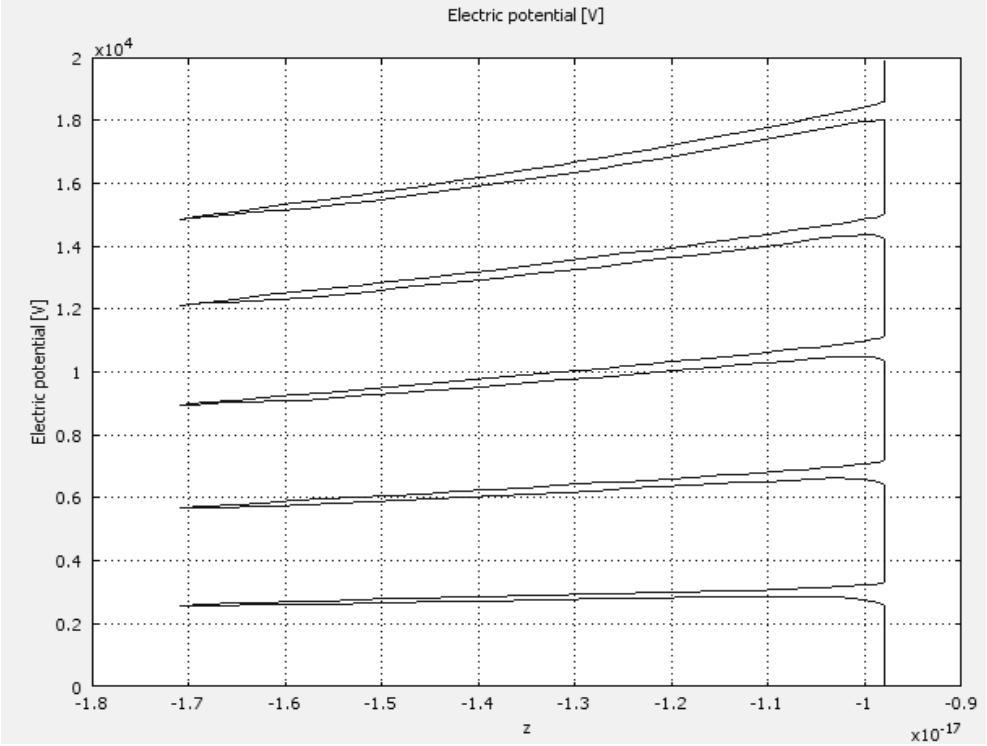


Şekil 6.18: Sadece En Üstteki Etekte 1 mm Kalınlığında Su ($\varepsilon_r = 80$) Olması ve Eteğin Ucundan Suyun Damlaması Durumu.

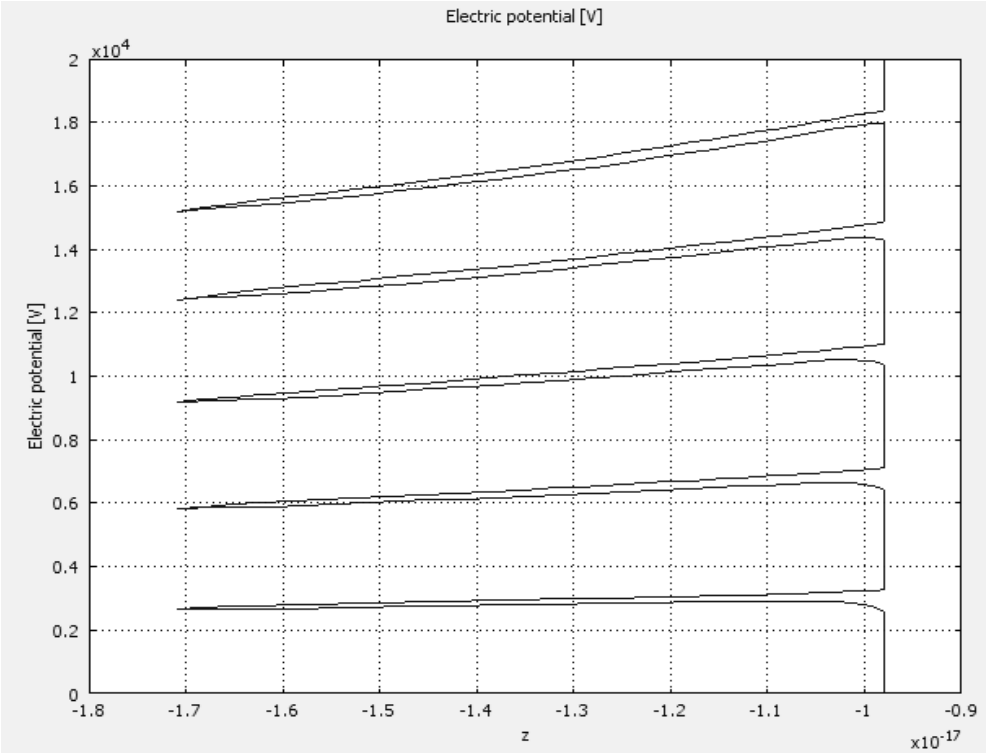


Şekil 6.19: Beş Etekte de 2 mm Kalınlığında Buz ($\varepsilon_r = 3.5$) Olması Durumu.

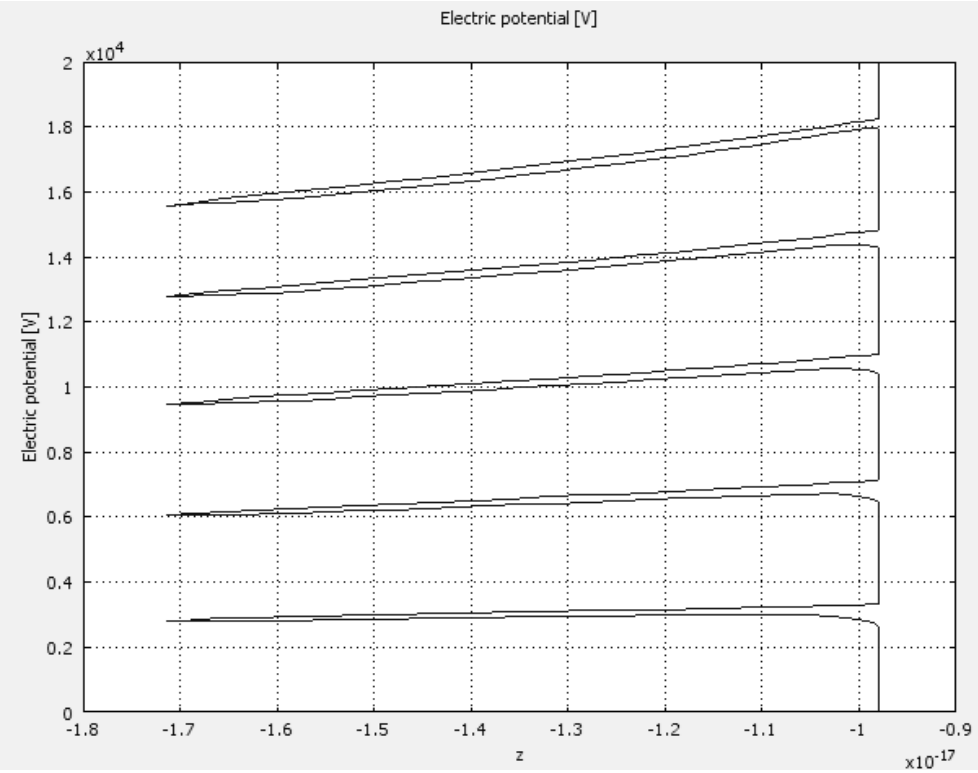
Beşinci, altıncı ve yedinci durumlarda farklı özelliklerde kir tabakaları incelenmiştir.



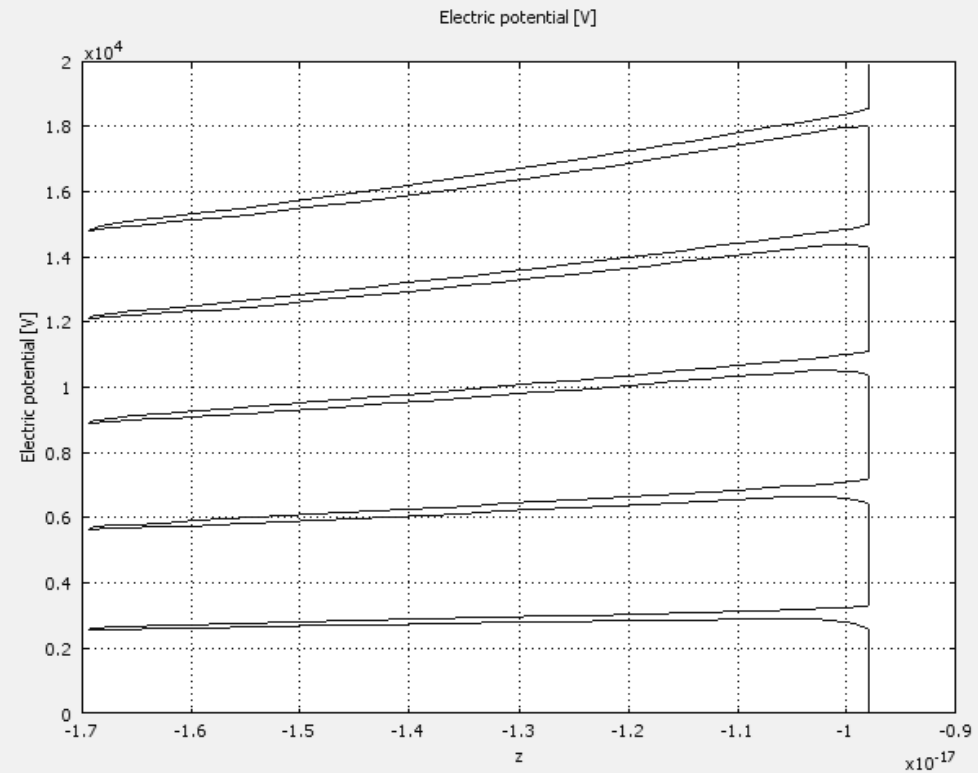
Şekil 6.20: Beş Etekte de 2 mm Kalınlığında Kir ($\varepsilon_r = 3$) Olması Durumu.



Şekil 6.21: Beş Etekte de 2 mm Kalınlığında Kir ($\varepsilon_r = 10$) Olması Durumu.

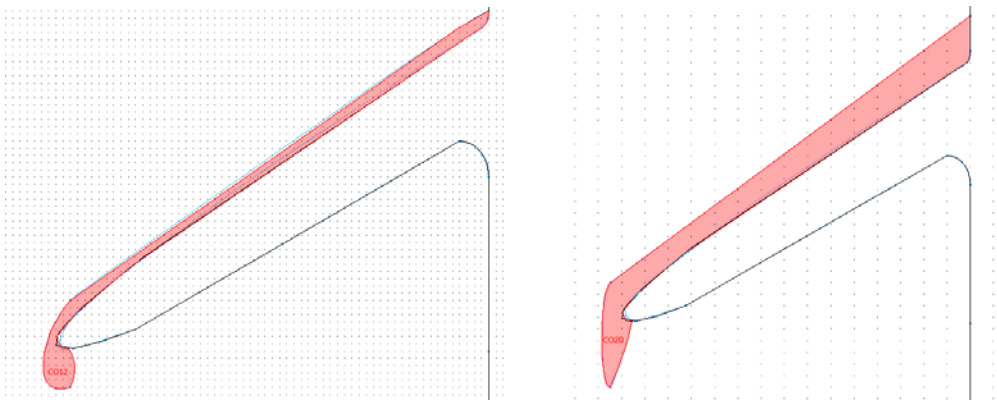


Şekil 6.22: Beş Etekte de 4 mm Kalınlığında Kir ($\varepsilon_r = 10$) Olması Durumu.



Şekil 6.23: Beş Etekte de 4 mm Kalınlığında Buz ($\varepsilon_r = 3.5$) Olması ve Eteğin Ucundan Buzun Sarkıt Halinde Uzanması.

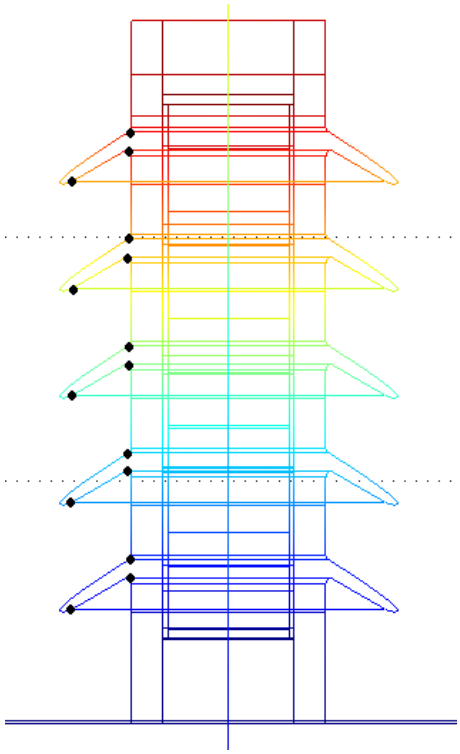
3. ve 8. durumlarındaki suyun ve buzun, parafudr gövde izolatörü eteğinin ucundan sarkmasının nasıl çizildiği Şekil 6.24'te gösterilmektedir.



(a) (b)

Şekil 6.24: (a) Parafudr Eteğinin Ucundan Suyun Damlaması (b) Buzun Sarkıt Halinde Uzanması.

Bu bölümde incelenen sekiz durum için, parafudr üzerinde aynı 15 noktadan potansiyel değerleri alınmış olup, gerilim dağılımı grafikleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Şekil 6.25'te gerilim değeri alınan referans noktalar gösterilmiştir.

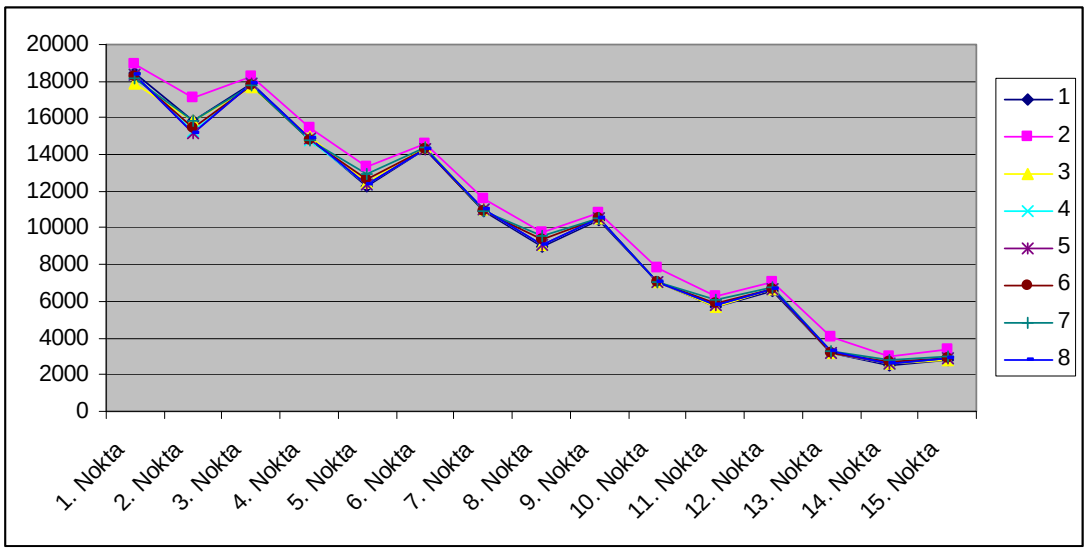


Şekil 6.25: Çeşitli Kirlenme Durumları İçin Potansiyel Değeri Alınan 15 Nokta.

Çizelge 6.1: Çeşitli Durumlar İçin Aynı Noktalardan Alınmış Potansiyel Değerleri.

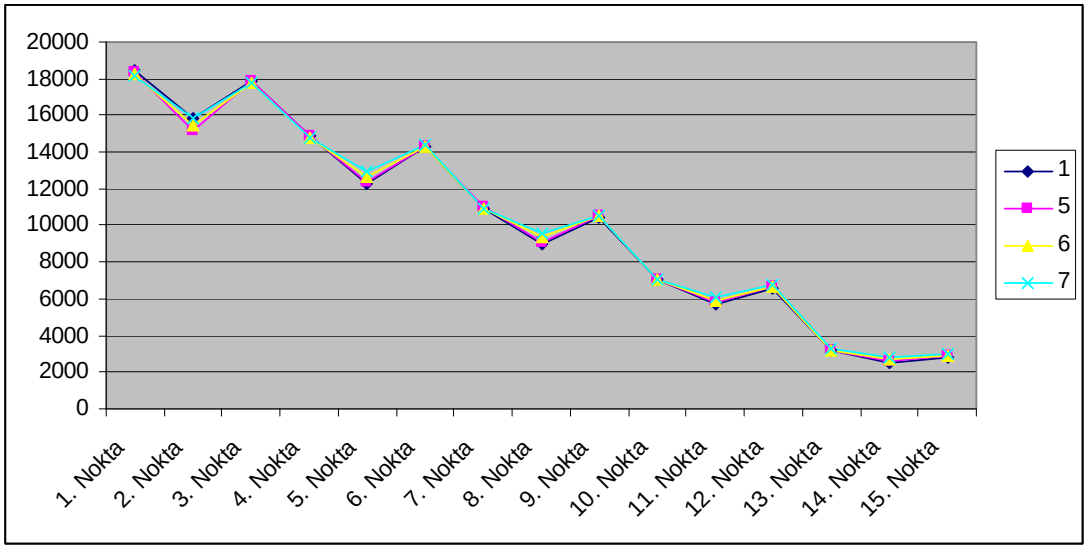
Potansiyel	Durumlar							
(V)	1	2	3	4	5	6	7	8
1. Nokta	18432	18942	17828	18380	18392	18245	18138	18363
2. Nokta	15799	17090	15807	15221	15197	15497	15819	15176
3. Nokta	17844	18300	17714	17839	17840	17822	17805	17836
4. Nokta	14842	15450	14943	14827	14831	14757	14735	14832
5. Nokta	12262	13332	12475	12389	12367	12637	12939	12373
6. Nokta	14291	14629	14397	14306	14305	14319	14355	14318
7. Nokta	10964	11583	11019	10972	10974	10932	10944	10985
8. Nokta	9028	9726	9121	9130	9113	9328	9577	9125
9. Nokta	10474	10786	10520	10496	10493	10515	10569	10511
10. Nokta	7049	7801	7068	7066	7066	7049	7087	7086
11. Nokta	5691	6260	5742	5772	5759	5913	6111	5772
12. Nokta	6599	7025	6626	6637	6634	6659	6719	6657
13. Nokta	3183	4103	3197	3221	3218	3231	3299	3247
14. Nokta	2552	2956	2575	2607	2600	2684	2821	2620
15. Nokta	2828	3374	2839	2861	2857	2887	2962	2884

İlk olarak Şekil 6.26'da tüm durumların grafiklerine bir arada bakılırsa, genel olarak alan düzenleyicinin olduğu 2. durum haricinde diğer durumlar arasında çok fark olmadığı görülür. Bu da bize çok ağır olmayan kirlenme durumlarında gerilim dağılımının fazla etkilenmediğini göstermektedir. Sadece eteğin ucunda su damlası olan 3. durumda, en üst eteğin gerilim dağılımı biraz bozulmaktadır. Benzer bir olayın olduğu 8. durumda ise bu kadar açık bir bozulma görülmemektedir. Buradan kirlenmeye yol açan maddenin dielektrik sabitinin ne kadar önemli olduğu anlaşılmaktadır.



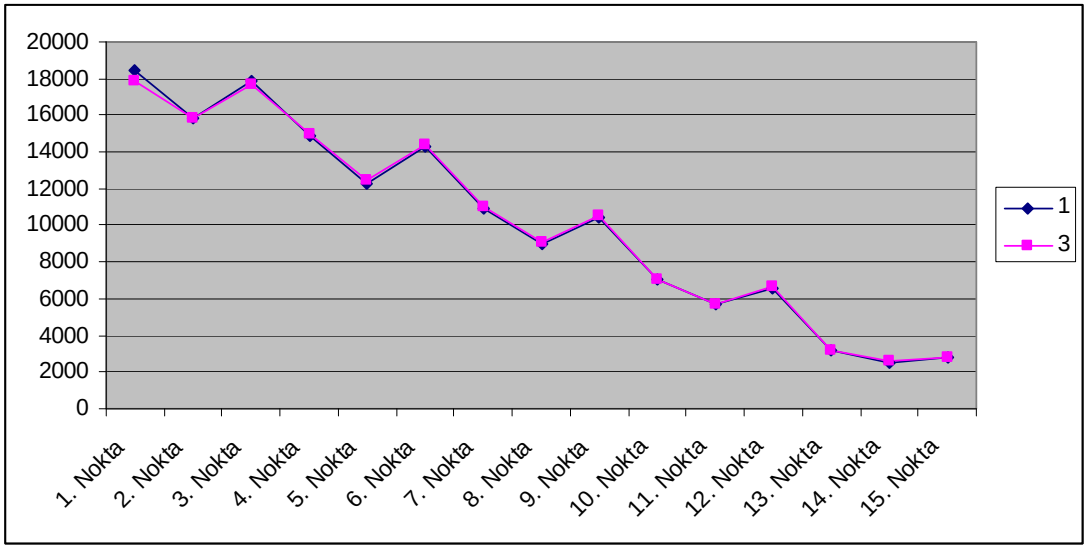
Şekil 6.26: Tüm Kirlenme Durumlarında Gerilim Dağılımları.

Üç farklı kirlenme durumuna Şekil 6.27'de bir arada bakarsak, üç durumunda birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Kalınlığını 4 mm, bağıl dielektrik sabitini de 10 olarak aldığımız 7. durumda, gerilim dağılımında küçük bir miktar iyileşme olmaktadır. Buradan kirlenme ne kadar fazlaysa gerilim dağılımına olan olumlu etkisinin de o kadar fazla olduğunu görüyoruz.

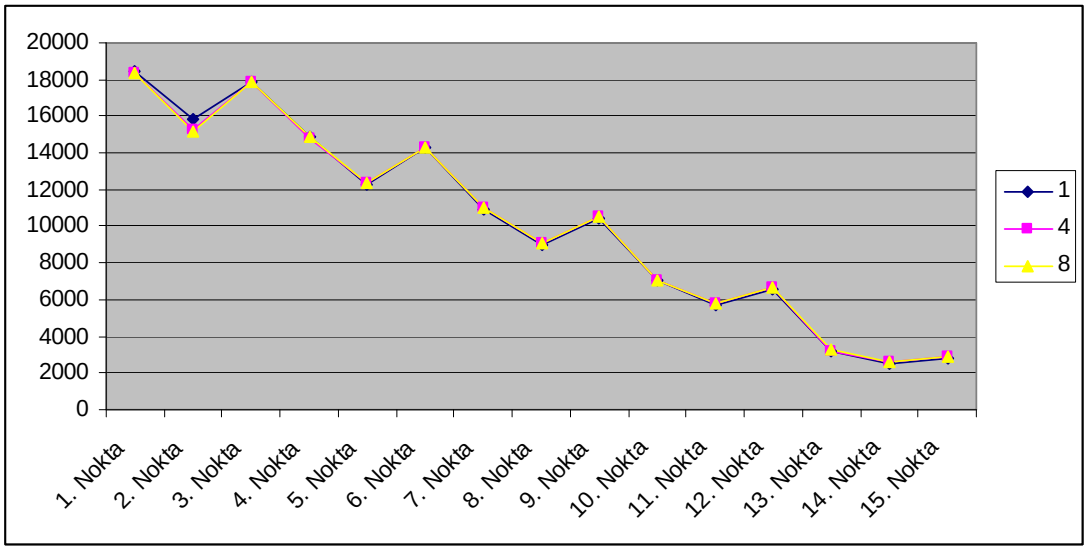


Şekil 6.27: Normal Durum ve Üç Farklı Kirlenme Durumunun Gerilim Dağılımı Grafikleri.

Şekil 6.28'de en üst etekte su olması ve eteğin ucundan suyun damlaması durumunun normal durum ile karşılaştırılması verilmektedir. Grafikten açıkça görüldüğü üzere bu durum sadece en üstteki eteğin gerilim dağılımını bir miktar bozmakta, geri kalan kısımlara hiç etki etmemektedir. Bu sonuca Şekil 6.18'deki grafikten de ulaşabiliriz. Şekil 6.29'da ise iki farklı buzlanma durumu görülmektedir. Burada eteklerin üzerinin 2 mm kalınlığında buz kaplandığı durum ile 4 mm kalınlığında buz kaplandığı ve eteğin ucunda buzun sarkıt halinde kaldığı durum arasında gözle ayırt edilebilecek bir fark olmadığı görülmektedir. Oysaki Şekil 6.27'de kirlenme durumlarını incelerken, dielektrik sabitleri aynı, sadece kalınlığının 2 mm'den 4 mm'ye çıktığı 6. ve 7. durumların grafikleri arasında gözle görülebilir bir fark vardı. Buradan bir kez daha anlaşılmaktadır ki, kirlenmeye yol açan maddenin dielektrik sabiti ne kadar küçükse, kalınlığı fazla bile olsa parafudrun gerilim dağılımına önemli bir etkisi olmamaktadır. Bu durumda en fazla etkiyi bağıl dielektrik sabiti 80 olan suyun yaptığını söyleyebiliriz. Zira bu durum Şekil 6.28 ve 6.29'da açıkça görülmektedir.



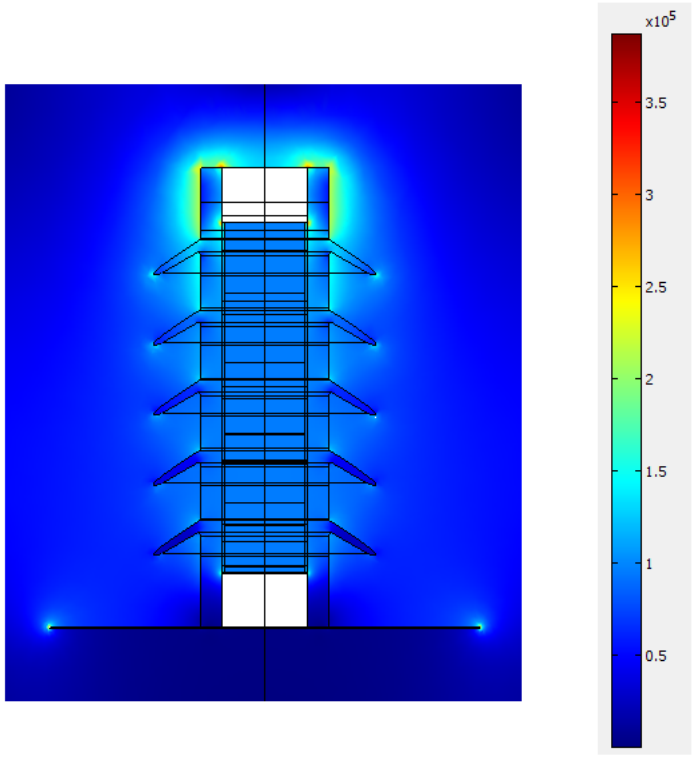
Şekil 6.28: Normal Durum ile En Üst Etekte Su Olması Durumlarının Grafikleri.



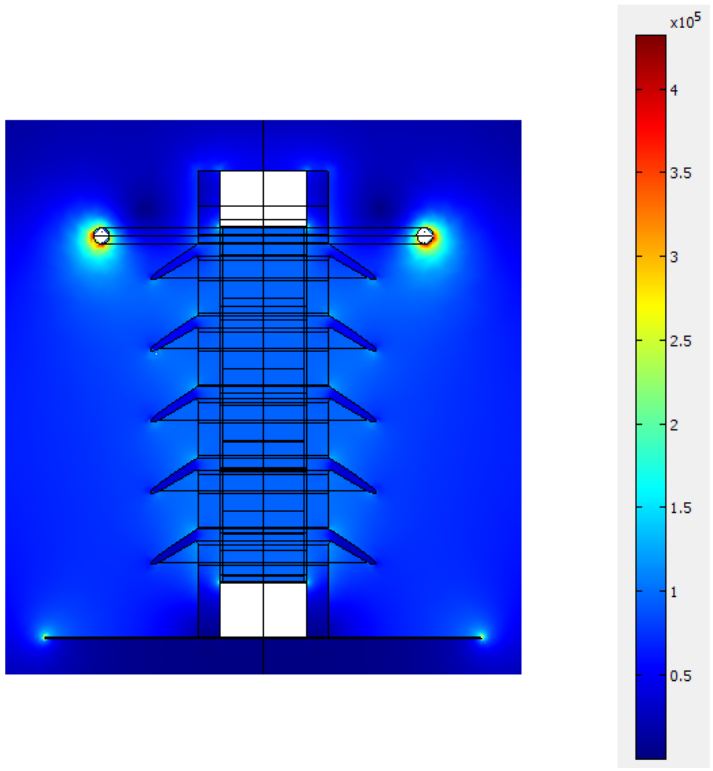
Şekil 6.29: Normal Durum ile Eteklerde Buz Birikmiş Durumların Grafikleri.

Parafudrun kirlenme durumundaki potansiyel dağılımı çalışma kararlılığı açısından çok önemlidir. Hafif kirlenme durumlarında fazla bir bozulma olmasa da, parafudrun büyük bir bölümünü kar tabakasının kaplaması gibi çok ağır kirlenmelerin gerilim dağılımını önemli ölçüde etkileyebileceği unutulmamalıdır [29].

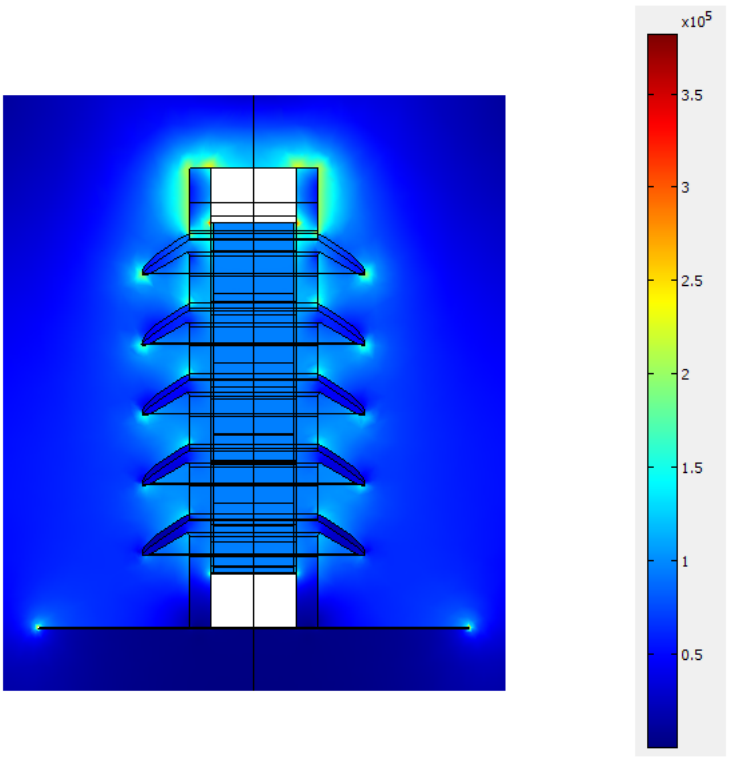
Şekil 6.30, 6.31 ve 6.32'de metal oksit parafudrun normal (temiz ve alan düzenleyici elektrot yokkenki), alan düzenleyici eklendiğindeki ve eteklerinin üzeri 4 mm kalınlığında, bağıl dielektrik sabiti $\varepsilon_r = 10$ olan kir tabakasıyla kaplı olduğu durumlar için alan dağılımları gösterilmektedir.



Şekil 6.30: Normal (Temiz ve Alan Düzenleyicisiz) Parafudrda Elektrik Alan Dağılımı.

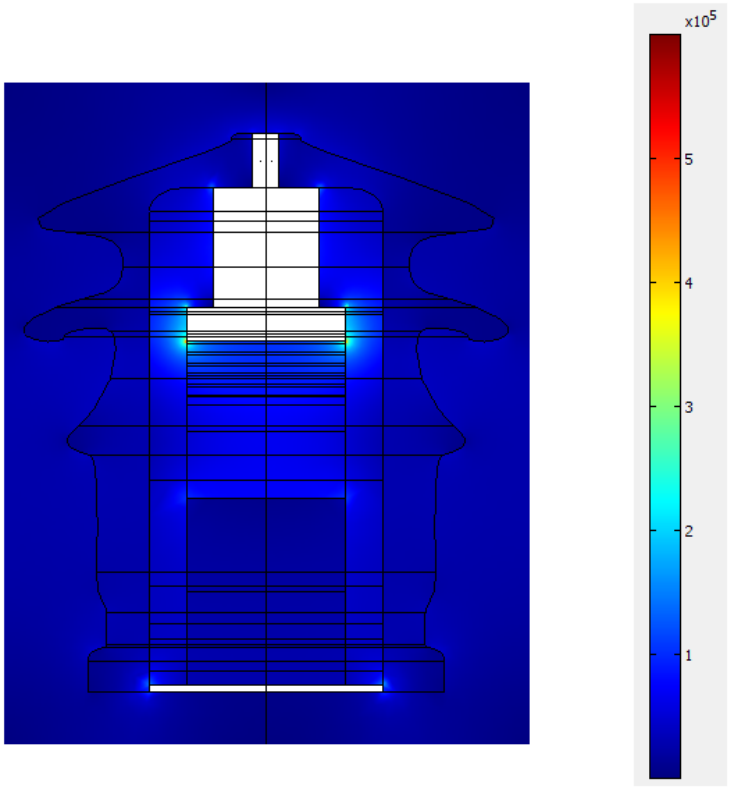


Şekil 6.31: Alan Düzenleyici Elektrot Eklendiği Durumdaki Elektrik Alan Dağılımı.



Şekil 6.32: Eteklerde 4 mm Kalınlığında Kir ($\varepsilon_r = 10$) Olduğundaki Elektrik Alan Dağılımı.

Parafudrda çeşitli durumlarda elektrik alan dağılımlarını gösteren bu şekillerden görüldüğü üzere, kirlenme durumu elektrik alan dağılımını fazla etkilememektedir. Alan düzenleyicinin varlığı ise elektrik alan dağılımını çok fazla değiştirmektedir ve parafudr yüzeyi boyunca elektrik alan değerlerini neredeyse eşit hale getirmektedir. Şekil 6.33'te ise silisyum karbür dirençli parafudrun elektrik alan dağılımı gösterilmektedir. Metal oksit parafudrun aksine silisyum karbür dirençli parafudrun yapısı daha karmaşık olduğundan elektrik alan dağılımı da daha düzensizdir.



Şekil 6.33: Silisyum Karbür Dirençli Parafudrda Elektrik Alan Dağılımı.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Parafudrlar, enerji sistemlerini her türlü aşırı gerilime karşı koruyan elemanlardır. Şu ana kadar parafudr yerine daha iyi koruma sağlayabilecek bir eleman üretilememiştir. Bu nedenle aşırı gerilimlere karşı koruma için parafudrların kullanılması kaçınılmazdır. İlk kullanılmaya başlandıklarından itibaren sürekli geliştirilmişlerdir. En önemli gelişme, ilk parafudr yapısı olan silisyum karbür parafudrdan, metal oksit parafudrlara geçilmiş olmasıdır. Yapılarında atlama aralıklarının olmaması metal oksit parafudrların en önemli üstünlükleridir. Atlama aralıklı parafudrlara göre daha iyi bir koruma karakteristiği sergilerler. Yapıları basit ve parça sayıları da az olduğundan silisyum karbür parafudrlara göre oldukça güvenilirdirler. Parafudrlarda diğer bir önemli gelişme de porselen gövdeden polimer gövdeye geçilmesidir. Polimer gövdeli parafudrların porselen gövdelilere göre birçok üstünlüğü vardır ve giderek daha fazla tercih edilmektedirler. Ayrıca parafudr gövde malzemesi olarak polimer malzeme kullanılması sayesinde mekanik gelişmelerin de önü açılmıştır. Bunların dışında, parafudrların enerji kapasitesi, çalışma ömrü, dayanıklılığı gibi konularda sürekli olarak iyileştirmeler yapılmaktadır [11]. Tüm bu gelişimler için düzenli olarak araştırmalar ve deneyler yapılması gerekmektedir [3].

Metal oksit parafudrlar çok büyük enerjilere bile rahatlıkla dayanabilirler. Fakat ısıl bozulmaya gitmemeleri için ısı üretme ve yayma dengelerine dikkat edilmesi gerekmektedir [2]. Bu nedenle bir metal oksit parafudr tasarlanırken, sadece enerji soğurma kapasitesine, sistemi koruma karakteristiklerine değil, aynı zamanda ısıl kararlılığına da dikkat edilmesi gerekmektedir. Çeşitli programlar kullanılarak parafudrların hangi sıcaklık değerine kadar ısıl kararlılıklarını koruyabilecekleri hesaplanabilmektedir. Zor koşullarda çalıştırılan parafudrlar için bu hesaplamalar yapılırsa, çinko oksit disklerin ısıl bozulmaya gitmeleri engellenebilir ve parafudr kurtarılabilir.

Metal oksit parafudrlar üzerlerindeki gerilim dağılımı düzenli değildir. En üstteki metal oksit direnç bloku (disk) diğer disklere göre daha büyük bir gerilime maruz kalır ve bu da ısıl olarak daha fazla zorlanmasına sebep olur. Uzun süre devam eden

ısıl zorlanma ise çinko oksit diskin ısıl bozulmaya gitmesine, sonuç olarak da tüm parafudrun arızalanmasına sebep olabilmektedir [5]. Bu durumu engellemek için yapılan çalışmalar sonucunda, parafudr elemanlarının geometrik şekilleri ve yerlerinde yapılan basit değişikliklerin, gerilim dağılımını düzenlemede önemli katkıları olduğu görülmüştür. Örneğin parafudrlarda tepesine tutturulan bir alan düzenleyici elektrot kullanılabilir. Bu alan düzenleyici elektrodun en etkili olduğu yükseklik, her parafudra göre değişiklik göstermekle birlikte, genel olarak parafudr boyunun %75~90 arasında bulunması uygundur. Halka şeklindeki bu elektrodun enine kesiti ise ne kadar büyük olursa gerilim dağılımının o kadar düzenli olduğu görülmüştür. Ayrıca ara halka kullanılacak ise, parafudrun en alt kısmına koyulması daha iyi sonuç vermektedir [6].

Tezde örnek olarak verilen gerçek bir parafudr modeli kullanılarak yapılan çalışmada da, gerilim dağılımının ne kadar düzensiz olduğu görülmüştür. Aynı parafudr modeli için hem izolatör tipi, hem de gerilim seviyesi değiştirilerek elde edilen sonuçlar incelendiğinde, gerilim dağılımının yaklaşık olarak aynı düzensizliği gösterdiği görülmüştür. Buradan anlaşılmaktadır ki, gerilim dağılımının düzensiz olmasının sebebi parafudr tipi ya da gerilim seviyesi değil, artan yükseklikliktir. Bu nedenle boyu daha fazla olan bir yüksek gerilim parafudru için bu düzensizlik çok daha fazla olmaktadır. Örnek modele parafudr boyunun %86 yüksekliğinde bir alan düzenleyici eklendiğinde ise, gerilim dağılımı tamamen düzelmese bile büyük oranda iyileştiği görülmüştür. İncelenen değişik durumlar içerisinde hiçbiri alan düzenleyiciye alternatif olarak düşünülecek kadar bile iyi sonuç vermemiştir.

Bu zamana kadar yapılan kirlenme durumu analizlerinde, genellikle kir tabakasının parafudrun dışında eşit bir şekilde dağıldığı varsayılmıştır. Fakat gerçek koşullarda kirlenme, böyle düzgün dağılımlı olmamaktadır. Bu tez çalışmasında, gerçekte karşılaşılabileceği düşünülen çeşitli kirlenme durumları için modellemeler yapılmıştır. Bunların sonucunda ise, çok ağır kirlenme dışındaki durumların parafudr yüzeyindeki gerilim dağılımına fazla bir etkilerinin olmadığı görülmüştür. Bununla birlikte, kirlenmeye sebep olan maddenin, kalınlığı az olsa bile, dielektrik sabiti ne kadar büyükse gerilim dağılımına da o kadar fazla etki ettiği anlaşılmıştır. Bu durumda en fazla etkiyi suyun (dielektrik sabiti 80) yaptığı söylenebilir.

Sonuç olarak, gerilim dağılımını daha düzenli hale getirmek için, parafudr tipine, boyutlarına, gerilim seviyesine göre yapılabilecek ufak değişiklikler önemli sonuçlar

verebilmektedir. Alan düzenleyici kullanımı, parafudra göre optimum değerleri belirlendiğinde çok başarılı olmaktadır. Kirlenme durumları içinse, çok ağır koşullar veya sürekli kir birikme sonucu giderek artan bir kirlenme olmadığı sürece fazla bir önlem alınmasına gerek görülmemektedir. Fakat çok ağır kirlenme durumlarına mutlaka dikkat edilmesi gerekir [29].

KAYNAKLAR

[1] **IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (>1kV),** IEEE Std C62.11™-2005, pp. 5-7

[2] **Bialek, T.,** 1999: Insulation System Protection with Zinc Oxide Surge Arresters. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 15, No. 1, pp. 5-10

[3] **Nigris, M., Sironi, A., Bonfanti, I., Giornelli, F., Valagussa, C., and Shing, L. K.,** 1998: Most Recent Developments in Surge Arresters Technology and Testing. IEEE, CESI, Milano, Italy, EPRI, Beijing, China, pp. 194-200

[4] **Meng, B., Zhang, B., and He, J.,** 2007: Potential Distribution Analysis and Improvement of 1000 kV Gas Insulted Switch Metal Oxide Arrester. *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Seoul, Korea, Oct. 8-11, pp. 1321-1325

[5] **Alame, N., and Melik, G.,** 1991: Axial Voltage and Gradient Distribution of Metal Oxide Surge Arrester. *The 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Tokyo, Japan, July 8-12, pp. 1149-1151

[6] **Kumar, U., and Mogaveera, V.,** 2002: Voltage Distribution Studies on ZnO Arresters. *IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 149, No. 4, pp. 457-460

[7] **Url-1** <http://www.elimsangroup.com/urunler/polimerparafudr/Polimer_Parafudr.pdf>, alındığı tarih 24.12.2008

[8] **ABB Catalogue Card GXD/06/02/E,** 1998, "Surge Arrester Type GXD 10÷45

[9] **ABB HS Pexlim T-T Catalogue,** 2007, "Zinc-Oxide Surge Arrester HS Pexlim"

[10] **Özkaya, M.,** 2005, "Yüksek Gerilim Tekniği, Cilt-2", İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Birsen Yayınevi, İstanbul, pp. 167-178

[11] **Kobayashi, M., Mizuno, M., Hayashi, M., and Sughita, Y.,** 1986: Metal Oxide Surge Arrester. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. EI-21, No. 6, pp. 989-996.

[12] **Alparslan, Y.,** 1989: Metal Oksit Parafudrların Boyutlandırılması, Testi ve Uygulanması. *ODTÜ EEMB 30. Yıl Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, pp. 153-157.

[13] **Siemens 3EP5 Catalogue,** 2006, "Surge Arrester 3EP5"

[14] **Shirakawa, S., Yamada, S., Tanaka, S., Ejiri, I., Watahiki, S., and Kondo, S.,** 2000: Improved Zinc Oxide Surge Arresters Using High Voltage Gradient 300 V/mm, 400 V/mm ZnO Elements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, No. 2, pp. 569-574

[15] **Erdinç, A. Ö.,** 1985, "Metal Oksit Parafudrlar", (Özel not)

[16] **Url-2 <** http://www.emsad.org.tr/edergi/transformator_testleri_dosyalar/ image025.jpg>, alındığı tarih 24.12.2008

[17] **Pinto, A. D., Coimbra, A. P., Antunes, L., and e Moura, A. M.,** 1998, "Thermal Analysis of a ZnO Surge Arrester Using the Finite Element Approach", IEEE, pp. 172-175

[18] **Stockum, F. R.,** 1994: Simulation of the Nonlinear Thermal Behaviour of Metal Oxide Surge Arresters Using a Hybrid Finite Difference and Emprical Model. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, No. 1, Wadsworth, Ohio, pp. 306-312

[19] **Csendes, Z. J., and Hamann, J. R.,** 1981: Surge Arrester Voltage Distribution Analysis by the Finite Element Method. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, No. 4, pp. 1806-1813

[20] **Haddad, A., and Naylor, P.,** 1998: Finite-element computation of capacitance networks in multiple-electrode systems: application to ZnO surge arresters. *IEEE Proc.-Sci. Meas. Technol.*, Vol. 145, No. 4, pp. 129-135

[21] **Singh, R. P., and Singh, T. V. P.,** 2002: Influence of Pollution on the Performance of Metal Oxide Surge Arresters. *IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering*, India, pp. 224-229

[22] **Chrzan, K., Pohl, Z., Grzybowski, S., and Köhler, W.,** 1997: Pollution Performance of 110 kV Metal Oxide Arresters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, No. 2, pp. 728-733

[23] **Url-3** < http://www.biymed.com/femmuh/analiz/fem/seynedir.htm>, alındığı tarih 24.12.2008

[24] **Url-4** < http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_elements>, alındığı tarih 24.12.2008.

[25] **Kalenderli, Ö.,** 1995, "Elektrik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi", Ders Notları, İTÜ, İstanbul.

[26] **Zimmerman, W. B. J.,** 2006, "Multiphysics Modelling with Finite Element Methods", World Scientific, Singapore.

[27] **Vahidi, B., Nasab, R. S., Moghani, J. S., and Hosseinian, S. H.,** 2005, "Three Dimensional Analyses of Electric Field and Voltage Distribution on ZnO Surge Arrester with Broken Sheds", IEEE/PES Trans. and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific Dalian, China, pp. 1-2

[28] **Vahidi, B., Nasab, R. S., Moghani, J. S., and Hosseinian, S. H.,** 2004: Electric Field and Voltage Distribution on ZnO Surge Arrester. IEEE, Tehran, Iran, pp. 367-368

[29] **Kojima, S., Oyama, M., and Yamashita, M.,** 1988: Potential Distributions of Metal Oxide Surge Arresters Under Various Environmental Conditions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, No. 3, Kawasaki, Japan, pp. 984-989

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad:	**Mehmet Fatih ERBAŞ**
Doğum Yeri ve Tarihi:	**İstanbul, 29.05.1984**
Adres:	**Sinpaş, Firuze-2, Daire-13, Sarıyer/İST**
Lisans Üniversite:	**İstanbul Teknik Üniversitesi**