

79116

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTROSTATİK ORTAMDA YÜKSEK GERİLİM
ELEKTROTLARININ SİMÜLASYONU İÇİN BİR
METOT**

Elek.Yük.Müh. Selim TRABULUS

F.B.E.Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında Hazırlanan

DOKTORA TEZİ

79116

Tez Savunma Tarihi : 17 Kasım 1998

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hüseyin ÇAKIR (YTÜ)

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Nesrin TARKAN (KOÜ)

Prof. Dr. İrfan GÜNEY (MÜ)

Prof. Dr. Tarkan
İ. Güney

İSTANBUL, 1998

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANİSTON MERKEZİ**

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No:
1. GİRİŞ	1
1.1. Problemin Tanıtımı	1
1.2. Bilginin Bugünkü Durumu	1
1.2.1. Elektrik Alan Hesabı İçin Metotlar	1
1.2.2. Alan Optimizasyonu İçin Metotlar	4
1.2.3. Hata Minimizasyonu İçin Metotlar	8
1.3. Çalışmanın Hedefleri	9
2. EŞDEĞER VE YÜZEYSEL DAĞILMIŞ YÜKLERLE KONVANSİYONEL ELEKTRİK ALAN HESABI	11
2.1. Eşdeğer Yük Metodunun Prensibi	11
2.2. Ayırık Eşdeğer Yükler	12
2.3. Yüzey Yükleri	14
2.4. Konvansiyonel Eşdeğer Yük Metodunun Simülasyon Problemleri	15
3. EŞDEĞER YÜK METODUYLA TAM ELEKTROT SİMÜLASYONU	
3.1. Simülasyondaki Problemin ve Gerekli Verilerin Formülasyonu	18
3.2. Hata Minimizasyon Algoritmaları	19
3.2.1. Fletcher Algoritması	20
3.2.1.1 Sınırlamaların Dikkate Alınması	23
3.2.1.2.Sınırlamaların Tesbitinde Tecrübenin Gözönüne Alınması	26
3.2.2. Lineer Çoklu Regresyon Analizi	28
3.3. Elektrot Sistemlerinin Tam Simülasyonu Amacıyla Minimizasyon Problemlerinin Kullanımı	29
3.3.1. Optimal Eşdeğer Yük Sistemlerinin Ortaya Çıkarılması İçin Algoritmaların Pratik Kullanım İmkanları	31
3.3.2. Optimal Eşdeğer Yüklerin Ortaya Çıkarılması Amacıyla Fletcher Algoritmasının Kullanımındaki Stratejiler	31

4. ELEKTROT KENARLARININ BİÇİMİNİN DEĞİŞTİRİLMESİ ÜZERİNDEN ELEKTRİK ALAN OPTİMİZASYONU	34
4.1. Alan Optimizasyonu İçin Düşünceler	37
4.2. Elektrostatik, Hacimsel Yük İçermeyen Elektrik Alanın Geometrik Özellikleri	39
4.2.1. Eşpotansiyel Bir Hat Boyunca Elektrik Alan Şiddetinin Relatif Değişiminin, Ayrılan Alan Çizgisinin Kıvrımıyla Olan İlişkisi	40
4.2.2. Elektrik Alan Hattı Boyunca Alan Şiddeti Miktarının Değişimiyle, Eş Potansiyel Yüzeylerin Ortalama Kıvrımının İlişkisi	42
4.3. Elektrik Alan Optimizasyonu Amacıyla Bir Potansiyel Tertip	44
5. ELEKTRİK ALAN OPTİMİZASYON STRATEJİSİ	48
5.1. Bir Elektrik Alan Optimizasyon Stratejisi İçinde Minimizasyon Algoritmalarının Kullanımı	50
5.2. Sabit ve Minimal Alan Şiddeti İçin Kriter	51
6. OPTİMAL EŞDEĞER YÜK SİSTEMLERİ YARDIMIYLA ELEKTROT SİSTEMLERİNİN SİMÜLASYONU VE ALAN OPTİMİZASYONU İÇİN ÖRNEKLER	57
6.1. Simetrik Gerilim Dağılımıyla Bir Küreye Ait Ark Yolunun Simülasyonu	57
6.2. Sonsuz Geniş Metalik Bir Düzleme Karşılık Plaka Şeklinde Bağlantılı Bir Çubuk Elektrodun Simülasyonu	60
6.3. 6.2.'e Göre Elektrot Sisteminin Bağlantı Plakasının Farklı Büyüklükteki Alana Sahip Kritik Sahalarının Elektrik Alan Optimizasyonu	65
6.3.1. Dönel Eksene Kadar ki Optimizasyon Sahası	65
6.3.2. İki Sabit Kenar Arasındaki Küçük Optimizasyon Sahası	69
6.4. Tek Taraftan Kapalı, Topraklanmış Bir Silindirin Dahilindeki Bir Elektrodun Yüksek Zorlanmalı Ucunun Elektrik Alan Optimizasyonu	71
7. SONUÇ	79
KAYNAKLAR	82
ÖZGEÇMİŞ	

SEMBOL LİSTESİ

A,B,C,O	Noktalar
D	Regresyon analizindeki potansiyel katsayılara ait bilgi matrisinin elemanları
E,	Alan şiddeti (nümerik,vektörel)
F	Potansiyel simülasyon hata fonksiyonu
G	Gradyanlar
H	Fletcher algoritmasında pozitif tanımlı simetrik bir matrisin elemanları
K	Sabit
K (k')	k' modülünün 1.mertebeden eliptik integrali
P	Eşdeğer yüklerin potansiyel katsayısı
Q	Eşdeğer yükler
S	Fletcher algoritmasıyla minimizasyonda bağımsız değişkenlerin değişim doğrultuları
T	Bir matrisin transpoze edilme işareti
X	Bağımsız değişken
Y	Bağımlı değişken
U	Gerilim
W	Ehemmiyet
F ₀	Sabit
F _q	Yük miktarlarına bağlı potansiyel simülasyon hata fonksiyonu
F ₁ ,F ₂	Yüzeyler
E _{ref}	Referans alan şiddeti
E _g	Bir alan şiddeti dağılımının sınır alan şiddeti değeri
E _f	Optimizasyon bölgesiyle sınırlı sabit kenar noktalardaki alan şiddeti değeri
E _{max}	Maksimum alan şiddeti değeri

E_{min}	Minimum alan şiddeti değeri
E_{ort}	Bir alan şiddeti dağılımının aritmetik ortalama değeri
Q_p	Noktasal yükler
Q_L	Çizgisel yükler
Q_R	Dairesel yükler
X_0	Bir fonksiyonun minimum noktası
a, c	Sabitler
d, b	Mesafeler
f	Regresyon analizindeki potansiyellere ait bilgi vektörünün elemanları
g	Gradyanlar
h	Bir yüzeyin ortalama kıvrımı
k	Bir alan çizgisinin kıvrımı
l	Uzunluklar
p	Nokta
n	Eşdeğer yük sayısı
$\bar{n}$	Eşpotansiyel çizgi doğrultusundaki birim vektör
$\bar{r}$	Eşdeğer yükün konum vektörü
s	Standard sapma
v	Değişken
l_{ref}	Referans uzunluk
n_0	Eşpotansiyel yüzeyin referans noktalarının sayısı
α, β	Sınırlamasız değişken
γ	Gradyan farkı
Δ	Operatör
δ	Fletcher algoritmasıyla minimizasyonda bağımsız değişkenlerin değişim adımları
ϵ	Dielektrik sabiti
$\Theta, \vec{\Theta}$	Kayma yoğunluğu (nümerik ,vektör)

λ	Skaler büyüklük
ξ	Relaksyon faktörü
ρ_F	Sınır yüzey yükleri
Φ	Potansiyel
$\Phi_{\text{gerçek}}$	Gerçek potansiyel
Φ_{istenen}	İstenen potansiyel
Ψ	Dönme açısı



TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca katkılarını esirgemeyen, bilgi ve tecrübesinden her zaman istifade ettiğim değerli Hocam Sayın **Prof.Dr.Hüseyin ÇAKIR** ' a teşekkür etmeği bir borç bilirim.



Ö Z E T

Yüksek gerilim elektrotlarının simülasyon problemlerinin çözümünde nümerik hesaplama metodlarının önemi büyüktür. Özellikle eşdeğer yük metodu, homojen elektrostatik ortamlarda daha başarılı sonuçlar verdiği için bu çalışmanın temelini oluşturmaktadır.

Eşdeğer yük metoduna, Fletcher Algoritması ve Lineer Çoklu Regresyon Analizi gibi çok bilinen farklı hata minimizasyon algoritmaları tatbik edilerek, elektrik alan hesabı için optimal bir yakınsama elde edilmeye çalışılmıştır.

Özellikle Fletcher algoritması esas alınarak bulunan yeni simülasyon metodunun, farklı elektrot tertiplerinin elektrik alan optimizasyonunu nasıl sağladığı konvansiyonel çözüm tarzı da dikkate alınarak örneklerle gösterilmiştir.

Bu örnekler seçilirken mevcut şalt tesis yapılarında en çok rastlanılan elektrot tertiplerinin modellerinin kullanılmasına özen gösterilmiştir.

VORWORT

Bei der Lösung der Nachbildungsprobleme in Bezug auf Hochspannungselektrode haben numerische Berechnungsmethode eine grosse Wichtigkeit. Da man weiss, dass Ersatzladungsmethode die mehr erfolgreichen Ergebnisse für homogene und elektrostatische Isolierungsmedien gibt, bildet es Grundlage dieser Arbeit.

Durchführend die verschiedenen Fehleroptimierungsmethode, wie Fletcher Algorithm und Linear Multiple Regression Analysis, auf Ersatzladungsmethode ist es sich bemüht worden, eine optimale Naeherung zu erreichen.

Wirkung der entstehenden Methode auf elektrische Feldberechnung ist ausführlich untersucht und mehrere Beispiele gegeben auf verschiedene Elektrodformen durchgeführt.

1.GİRİŞ

1.1.Problemin Tanıtımı

Yüksek gerilimlerin kullanımı, çok büyük boyutlu deneme ve ölçme donanımlarıyla birlikte işletme elemanlarını da gerektirmektedir. Tesislerin kuruluş ve işletme fiyatlarının sınırlandırılması amacıyla, mevcut elektrik alan hacmi mümkün mertebe optimal olarak kullanılmalıdır. Gerekli denemelerin sayısını ve masrafını mümkün olduğu kadar düşük tutabilmek için optimal elektrot biçiminin ortaya çıkarılması, geniş ölçüde teorik yollardan gerçekleştirilmek istenmektedir.

Yenilenen hesaplamalarla ve elektrotların tekrar tekrar oluşturulan geometrik değişiklikleri yardımıyla elde edilen alan hesaplaması sonucunda, bir izolasyon donanımının arzu edilen dayanıklılık değerlerinin gerçekleştirilmesi hem uzun bir uğraş gerektiren hem de masraflı bir işlemdir. Bir elektrot sisteminin kötü dizayn edilmiş şekli, sürekli optimal formdan uzaklaşmasına sebebiyet vermektedir.

Bu yüzden en küçük maksimum alan şiddetinin elde edilmesiyle ilişkili olarak alan hacmini optimal olarak kullanabilmek için kritik konumdaki elektrot parçalarının optimal geometrisi üzerine önceden bilgi sahibi olmak zorunludur. Elektrot sistemlerinin tam simülasyonunun ve alan şiddeti dağılımlarının optimizasyonunun sağlanması güçlü elektrik alan hesaplama metotlarıyla yapılabilmektedir.

Potansiyel denklemin kapalı çözümü ancak basit elektrot formları için uygun olmaktadır. Şalt tesislerinde sık sık rastlandığı gibi, dönel simetrik olmayan birçok elektrot sistemi bu tarz hesaplanamamaktadır. Bu yüzden bu tür elektrot donanımlarının elektrostatik alanı ve biçimi sadece nümerik yaklaşım metotlarıyla optimal olarak belirlenebilmektedir. Bu amaçla diferansiyel (fark) metot, finit (sonlu) elemanlar metodu ve eşdeğer yük metodu gibi nümerik hesaplama yolları geliştirilmiştir.

1.2.Bilginin Bugünkü Durumu

1.2.1.Elektrik Alan Hesabı İçin Metotlar

Hacimsel yükleri içermeyen elektrostatik alan, çözülebilirliği problemin kenar (sınır) şartlarına bağlı olan Laplace'nin potansiyel denklemiyle ifade edilmektedir.

$$\Delta\Phi = \text{div grad } \Phi = 0 \quad (1.1)$$

(1.1)-Bağıntısının hesaplanması için bir takım analitik ve nümerik hesaplama metotları mevcuttur. Laplace denkleminin analitik ve özel (kapalı) olarak ifade edilebilen çözümleri sadece relatif basit elektrot donanımları için bilinmektedir. Yüksek gerilim tekniğindeki birçok elektrot sistemi ancak yaklaşık metotlar kullanılarak hesaplanabilmektedir. Bugün mevcut olan ve en çok kullanılan nümerik metotlar; fark metodu (Prinz,1969; Böcker, 1972; Reichert,1972; Andersen,1981), finit elemanlar metodu (Prinz,1969; Böcker,1972; Reichert,1972; Andersen,1981; Zienkiewicz,1971; Praxl,1978; Silvester, 1969; Okubo et al, 1979) ve eş değer yük metodudur (Abou-Seada et al, 1968; Steinbigler, 1969; Singer, 1974; Weiss,1969; Murashima et al,1980; Singer,1974; Utmischi, 1976; Utmischi, 1979; Sato et al, 1979; Veverka,1979).

Fark metodu ve finit elemanlar metodu; potansiyel denklemini, elektrik alan hacminin kısmi parçalara bölünmesi yardımıyla yaklaşık olarak çözerler. Fark metodunda; potansiyel değişimine, her elemanda bir fark düzenlemesi yapmak suretiyle yaklaşım yapılır. Finit elemanlar metodunda ise enerji minimizasyonu toplam elektrik alan hacmi üzerinden yapılır. Her iki durumda da lineer bir denklem sistemi direkt veya iteratif olarak ilk önce bilinmeyen kısmi potansiyellere göre çözülmektedir. Her iki metot tüm kenar potansiyellerin bilinmesi şartına dayandırıldıkları için sadece kapalı donanımların hesaplanması için uygundur. Gerektiğinde hesaplanması gereken elektrik alan hacmi sahasındaki kenar tesirleri ihmal edilebilecek şekilde ve kenar potansiyelleri buna göre hesaplanacak tarzda kısmi elemanlar geniş ölçüde dışarıya doğru da yönlendirilebilirler. Kısmi elemanların yoğunlaştırılmasıyla metotların doğruluğu ve buna paralel olarak yapılacak gerekli çalışma da o ölçüde artmaktadır. Bu yüzden hacim elemanlarının sonlu bir sayıyla ayrılması sonucu ortaya çıkan “ayrıklaşma” hatası istenildiği kadar küçük yapılamaz.

Eşdeğer yük metodu, potansiyel denklemin kısmi çözümlerinin üst üste bindirilmesine dayanmaktadır. Bu kısmi çözümler potansiyel sınır şartlarını ve sınır yüzeylerdeki potansiyel ve alan şiddeti için geçiş şartlarını yerine getirmektedirler.

Potansiyel denklemin kısmi çözümleri örneğin noktasal, çizgisel, dairesel ve yüzeysel yükler gibi ayırık yüklerin potansiyel fonksiyonlarıdır. Potansiyel sınır şartları çevre noktalarının eşit büyüklükteki sayısı içinde yerine getirilebilecek tarzda lineer bir denklem sistemi eşdeğer yüklerin ilavelerinden sonra çözülebilir. Daha sonra bu yük sistemi kendi eşpotansiyel yüzeyleriyle elektrik alan hacmini ifade eder. Eşdeğer yük metodu bir çok problem için bilgisayarda daha az veri depolama ihtiyacıyla birlikte aynı doğrulukta çalışmaktadır (Okubo et al,1978; Beasley et al,1979) .

Bu metot açık ve kapalı donanımları hesaplayabilir, ayrıca farklı tipteki elektrot donanımlarının bir çoğu hesaplanabilecek şekilde geniş bir sahada verilerin çeşidine bağlı olarak düzenlenebilir. Bununla birlikte çevre ve yük noktalarının düzenlenmesinde bir zorluk bulunmaktadır. Şimdiye kadar kullanılan metotlar karmaşık çevre şekillerinin simülasyonu için yeterli olmamaktadır (Beasley et al,1979) .

Eşdeğer yük metoduyla elektrot sistemlerinin tam simüle edilmesi veya düzenlenmesi amacıyla bugüne kadar oldukça az çalışma yapılmıştır. Geçmişte yapılan araştırmalar (Chow et al,1979), eşdeğer yüklerin düzenlenmesinin elektrik alansız bölgelere münhasır kalmasını dikkate almazlar ve yüklerin elektrot yüzeyine olan düzeninin hesaplanması için sınırlamasız bir optimizasyon algoritmasından hareket ederler. O halde eşdeğer yüklerin düzenlenmesi sırasında lüzumlu olduğu gibi belirli sınırlamalara bağlı olmayan bir algoritmadan hareket ederler. Bu yüzden hesaplamanın yakınsaklığı sadece belirli, probleme adapte edilmiş yük tipleriyle birlikte basit yansıma problemleri için garanti edilebilmektedir. Aynı şey Yializis'in (1978) düzenlemesi için de geçerlidir.Bu düzenlemede sınırlamalar optimizasyon algoritması dışında gözönüne alınmaktadır.

Sınırlamaların bu tarz incelenmesi, ifade edilen optimizasyon algoritmasının yapısını bozabilir veya yakınsaklığı azaltabilir. H.Anis (1977), aksiyal koordinatla ilgili yüklerin optimal durumunu Lagrange teoreminin yardımıyla ortaya çıkartabilmek amacıyla dönel simetrik donanımlar için radyal doğrultudaki yüklerin koordinasyonunun tesbit edilmesini teklif etmiştir .

Bu çözüm belirli dönel simetrik donanımlarla sınırlı kalmaktadır. Eşdeğer yük metoduyla herhangi bir elektrod sisteminin kritik kısımlarının tam simülasyonu için

gerekli olan stratejideki bir eksiklik, sonlu elemanlar ve eşdeğer yük metodundan oluşan bir kombinasyonu teklif eden çalışmalara yol açmıştır (Steinbigler,1979; Okubo et al,1979; Okubo et al,1982). Ayrıca bu çözüm tarzı bilgisayarda büyük miktarda veri depolama problemlerini de beraberinde getirmiştir.

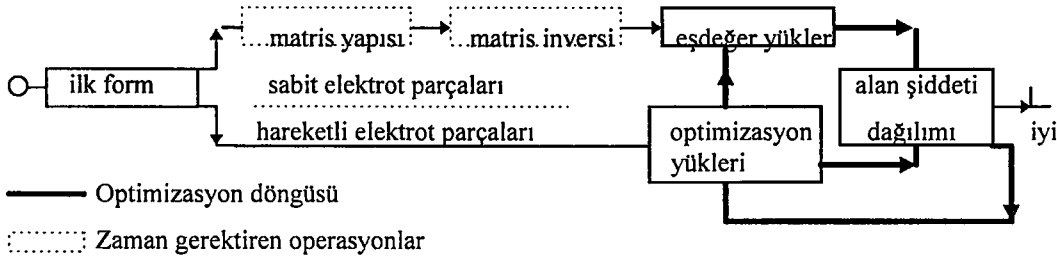
1.2.2.Alan Optimizasyonu İçin Metotlar

Mümkün olan en küçük maksimum alan şiddetinin elde edilmesiyle ilgili olarak elektrik alan hacminin iyi kullanılması, elektrot ve izolatör çevrelerinin optimal bir teşkilini gerektirmektedir. Bu problem üzerinde önceden de çalışılmıştır (Örneğin;Rogowski ve Borda-Profil). Ancak elektrik alan optimizasyonunun genel kullanılabilir bir hesaplama metodu bugüne kadar henüz geliştirilmedi.

Bu doğrultuda ilk teklifi Singer (1975) ve Grafoner (1975) yaptılar (Singer,1979 ; Klement et al,1980). Bu metot elektrot sistemi içinde sabit bir alan şiddeti elde edilmesine imkan vermektedir. Ve metot eşdeğer yük metoduyla çalışmaktadır. Çevre noktalarının kaldırılmasıyla elektrot biçimleri iteratif bir işlev üzerinden değiştirilmektedir. Bu strateji her iterasyonda “alan hesaplama” operasyonunun hemen hemen komple bir tekrarını gerektirmektedir. Metod, optimizasyon sahasındaki yüklerle koordine edilmiş çevre noktalarındaki arzu edilen elektrik alan şiddeti değerlerinin elde edilmesini garanti etmektedir.

Bununla birlikte arzu edilen elektrik alan şiddetinin, çevre noktalarını birleştiren eş potansiyel yüzeylerin bütün ara noktalarında bulunup bulunmadığı kesin değildir.Bu yüzden Metz (1979), kendi alan optimizasyon metodunda; hem elektrik alan hesabı dahilinde çok zaman alan operasyonların kısaltılması hem de optimizasyon hesabının doğruluğunun yükseltilmesi üzerine çalışmıştır.

Bu metodun yapısal bir anlatımı Şekil:1’de verilmektedir. Bu metotta bir elektrot sistemi için iki yük sistemi kullanılacak şekilde kısmi çözümlerin üst üste getirilmesi suretiyle uygulanan çözüm yolu kullanılmaktadır. Bu iki yük sistemi, üst üste getirilme sırasında elektrotlar üstündeki ve elektrot ara hacmindeki potansiyel ve elektrik alan dağılımını belirler.



Şekil:1 Metz'e göre eşdeğer yüklerle optimizasyon

Ayrıca bir elektrot sisteminin optimizasyonu yapılacak yüksek gerilim zorlanmalı parçaları “değiştirilebilir (hareketli) parçalar ” olarak isimlendirilir.

Bu parçalar özel bir eşdeğer yük sistemi teşkil ederler. Yüklerin konumu ve miktarı önceden verilir sonradan değiştirilir. Başka bir yük sistemi sabit, optimizasyonu gerekmeyen elektrot parçalarına koordine edilmektedir. Bu yüklerin miktarları duruma göre, koordine edilen elektrot parçalarının potansiyel şartlarından çıkarılmaktadır. Bu suretle sabit elektrot parçalarına ait sistem matrisinin oluşturulması ve inversiyonu için zaman alan işlemler sadece bir kez yapılmaktadır. Böylece iterasyonların akışı içinde “elektrik alan hesabı” işlemi hemen hemen optimizasyonu gereken saha üzerine indirgenmiş olur. Bu metotta hesaplamanın akışı içinde gerçekten ortaya çıkan eş potansiyel yüzeyden hareket edildiği için hesaplamanın yüksek derecedeki doğruluğu metodun önemli bir faydasıdır. Optimizasyon yüklerinin küçük bir miktarı yardımıyla bu metodun interaktif bir değişimiyle hızlı bir optimizasyonu elde etmek mümkün olmaktadır.

Bu değişim sırasında uygulayıcının bizzat kendisi optimizasyon sahası içindeki eşdeğer yüklerin durumu ve büyüklüğüyle ilgili olarak gerekli değişiklikler üzerine karar verebilir. Böyle bir optimizasyon hesabında yapılan çalışma önemli ölçüde uygulayıcının tecrübesine bağlıdır. Diğer taraftan bu metodun ikinci tipi olan otomatik optimizasyon ise, yakınsaklık problemlerini ihtiva etmektedir. Sabit ve değişken elektrot parçaları arasındaki kenar alan problemi açısından ve ayrıca optimizasyon için uygun bir

yaklaşımın bulunması açısından metodun zayıflığı, eşdeğer yüklerin eşdeğer potansiyel yüzeylerle tertip edilmesindeki zorluğa dayandırılmaktadır.

Eşpotansiyel yüzeyin hesaplama içine dahil olan noktalarının sayısı, kullanılan optimizasyon yüklerinin sayısına sınırlandırılırsa o zaman hesaplamada doğruluk beklenebilir. Hesaplamanın doğruluğunun iyileştirilmesi amacıyla optimizasyon yüklerinin sayısının yükseltilmesi, optimizasyon sahasına ait elektrik alan veya potansiyel katsayı matrisinin kötü yapılandırılmasına sebebiyet verebilmektedir. Hesaplama ortaya çıkan yakınsaklık ve doğruluk problemlerinin çözümü için ampirik katkıların araştırılması, sadece probleme adapte edilmiş yük dağılımına sebebiyet verebilir. Singer (1975) ve Metz'in (1979) her iki optimizasyon metodu, optimizasyonu yapılacak bir elektrodun tüm çevre noktalarının simultan bir değişiminin hesaplanması için geliştirilen katkıları ifade etmektedir. Her iki metot farklı bir optimizasyon yolunu kullanırlar.

Bir elektrot yüzeyinin alan şiddeti dağılımından hareket ederek yapılan değerlendirme sonucu daha uygun bir elektrot biçimine ulaşmak için bu elektrik alan dağılımı elektrotteki değişikliklere adapte edilmelidir. Singer'in (1975) çalışması, elektrot yüzeyinin bir noktasındaki alan şiddetinin arzu edilen her değişimini, bu yüzeyin incelenen noktasındaki kıvrımının bir değişmesi olarak ifade etmektedir. Bu basit ve direkt optimizasyon yolu hesaplama sırasında yakınsaklık problemlerine yol açabilmektedir. Bir yüzeyin ortalama kıvrımı, birbirine dik normal iki kesitin kıvrımlarının cebirsel toplamını ifade ettiği için yeni elektrot çevresini dizayn edebilmek amacıyla bu her iki normal kesitin yeni kıvrım yarıçaplarını, hesaplanarak bulunan yüzey kıvrım değişiminden tesbit etmek gereklidir. Bu da sadece yaklaşık ifadeler üzerinden mümkündür. Bu ifadeler ya ortaya çıkarılması gereken her iki kıvrılma yarıçapı değişikliklerinden birinin diğer değişimlere nisbetle ihmal edilmesini gerektirir yada ortaya çıkan alan çizgisi kıvrımı ile elektrot yüzeyi kıvrımı arasındaki bağıntıları incelenen noktaya çekmektedir.

Bu nümerik yaklaşımlar çevre üzerinde uç tesirlerin ortaya çıkmasına sebebiyet verebilmektedir. Uç tesirler bilindiği gibi çok yüksek alan şiddetine sahiptir veya hesaplamanın akışını yanlış olarak etkileyebilmektedir. Birbirine dik normal kesitlerin

kıvrımlarının hesaplanması sırasında işaret değişikliğiyle sebebiyet verilen çevrenin mikroskopik salınımları genel olarak yüzeyin kıvrımının yanlış hesaplanmasına da yol açabilirler.

Bu sebepten dolayı, Singer'in (1975) bu alan optimizasyon çalışması büyük nümerik problemlerin çözümünü gerektirmektedir.

Çevre noktalarının direkt kaydırılması stratejisiyle ortaya çıkan yakınsaklık problemlerinin önlenmesi amacıyla optimizasyonu gereken elektrot, bu elektroda koordine edilmiş eşdeğer yüklerin değiştirilmesi üzerinden indirekt olarak biçimi değiştirilebilecek şekilde Metz (1979) kendi optimizasyon problemini geliştirmiştir. Ayrıca Metz (1979) basit bir optimizasyon tertibinden hareket etmiştir. Bu yüzden arzu edilen elektrik alan şiddetinin, optimizasyonu yapılacak elektrot çevresi boyunca gerçek elektrik alan şiddeti değerlerinden sapmasının önlenmesi amacıyla optimizasyon sahasındaki yüklerin miktarlarının değiştirilmesi öngörülmüştür. Lineer bir denklem sistemini elde etmek için elektrik alan şiddeti sapmaları, optimizasyon sahasındaki yük sayısı ile aynı büyüklükteki çevre noktalarından ortaya çıkarılmaktadır.

Bu metodun incelenmesi, optimizasyonu yapılacak başlangıç elektrot yüzeyindeki alan şiddeti değerlerinin kıyaslanmasının söz konusu olduğunu göstermektedir. Yeni ortaya çıkan eş potansiyel yüzey eski elektrot yüzeyine paralel olması halinde sabit değerli elektrik alan şiddetine sahip olabilmektedir. Ancak bu durum pratik olarak bir optimizasyon işlevinde söz konusu olamaz. Başlangıç elektrodu üstündeki sabit bir alan dağılımı sadece çevre elektrotların biçiminin değiştirilmesi suretiyle elde edilebilir. Fakat böyle bir durum istenmediği için elektrik alan hacmindeki lineersizlikten dolayı önceden tahmin edilemeyen muhtemelen kıvrımlı (dalgalı) ve hiçbir suretle sabit elektrik alan şiddetine sahip olamayan bir eş potansiyel yüzey ortaya çıkacaktır. Buna göre Metz'in (1979) optimizasyon metodu kolaylıkla elektrik alan optimizasyonunun doğru bir düzenlemesini sağlamaz ve bu da hesaplamada ortaya çıkan kararsızlık için bir sebep oluşturmaktadır.

Burada Plaka-Düzlem elektrot sisteminde Metz (1979) tarafından tam olarak ortaya çıkarılan optimal biçimin hesaplanmasında optimizasyon sahasındaki yüklerin, ortaya çıkarılan durum değişiklikleriyle sebebiyet verdikleri etki göz önüne alınmaksızın hem

ampirik olarak ispat edildiğine hem de yeniden dağıtıldığına dikkat edilmelidir. İfade edilen düzenlemede gerçek bir yansıma probleminin söz konusu olduğu göze çarpmaktadır. Bu durum optimizasyon düzeninin hatalarının zayıflamasını etkileyebilir. Karşı konumdaki elektrot ise sabit biçimli bir elektrot olarak incelenemez, bilakis aynı tarzda ve aynı ölçüde orjinal plakaya zıt doğrultulmuş olarak biçim almış bir yansıtan plaka şeklinde ele alınır. Metz'in (1979) optimizasyon metodunun otomasyonlaştırılması amacıyla Okubo (1979) tarafından bir yol teklif edilmiştir. Bu çözüm yolu başlangıç elektrodunun referans noktalarının tedrici olarak kaydırılmasını öngörmektedir.

Düşük elektrik alan şiddetine sahip bir referans noktasına bir yük koordine edilir. Bu yükün miktarı ve durumu, destek noktası karşı elektrodun doğrultusunda hareket ettirilecek tarzda ampirik düzenlemeler yardımıyla hesaplanarak bulunur. Bu olay iteratif olarak, yüksek zorlanmalı elektrot destek noktalarından yük alınıncaya kadar devam eder. Optimizasyonu yapılacak elektrot parçasının sadece büyültülmesine tesirli olabilen optimizasyon stratejisi istenilen her başlangıç biçimi üzerine tatbik edilemez. Bunun yanında bu hesaplama çok büyük sayıdaki yüklere dayanmaktadır.

1.2.3. Hata Minimizasyonu İçin Metotlar

Bir eşdeğer yük sisteminin optimal durumlarının ve miktarlarının elde edilmesi problemi (bu işlev elektrot sistemlerinin tam bir simülasyonu için lüzumludur) genellikle en geçerli biçimin lineer olmayan, çok boyutlu ve sınırlı bir minimizasyon problemidir. Genel optimizasyon probleminin özelleştirilmesi çoğunlukla bir taraftan optimizasyonun durumu ve çeşidi üzerine daha doğru ifadeler imkanı verir, diğer taraftan problemin çözümü ve nümerik incelenmesinde önemli kolaylıklar da getirmektedir. Küçültülmesi gereken hedef fonksiyon için veya sınırlama fonksiyonları için ekseriya belirli fonksiyon sınıflarının seçimiyle özelleştirme elde edilir (Künzi, 1967; Elster, 1978; Beightler et al, 1979).

Minimizasyon probleminin çözümünde efektif iyileştirmeler getirdiği için sınırlama denklemlerinin elimine edilmesi amacıyla her imkandan yararlanılması

gerekmektedir. Bu suretle hesaba dahil olan bağımsız değişkenlerin sayısının azaltılması sağlanır ve böylelikle elde edilen denklemlerin sayısı azalır (Beightler et al, 1979). Lineer olmayan sınırlama problemi genellikle bir takım zorluklar gerektirmektedir (Haarhoff et al, 1970). Bu sahadaki gelişmeler ancak sınırlamasız, lineer olmayan optimizasyon alanında çok kuvvetli ve iyi yakınsayan algoritmalara yol açmıştır. (Beightler et al, 1979; Haarhoff et al, 1970; Box, 1965; Box, 1966). Belirli sınırlama problemlerinin incelenmesi için sınırlamasız algoritmaların gücünü kullanabilmek amacıyla, problemin bir seri sınırlamasız problemlere dönüştürüldüğü metotlar geliştirilmiştir, örneğin, “Penalty Function Metods” gibi (Beightler et al, 1979).

Box (1965), kendisi tarafından geliştirilen sınırlamalı optimizasyon metodu üzerinden “Complex Metod” u gösterdi. Ve diğer metotlarla bir kıyaslama yaparak sınırlamalı optimizasyon metotlarının diğer sınırlamasız metotlara nasıl tabi olduğunu da ifade etti. Bu yüzden Box (1966) daha sonraki bir çalışmasında farklı optimizasyon metotlarının kıyaslanması üzerinden bir kaç sınırlama probleminin çözümü için dönüşümlerin kullanılması fikrini teklif etmiştir.

Box (1966), sınırlamalı sahalardan sınırlamasız sahalara transformasyon için teklifler yapmıştır. Bu suretle sınırlama problemlerinin incelenmesinde, sınırlamasız optimizasyon algoritmalarının kullanımına imkan verilebilmektedir. Buna göre eşdeğer bir yük sisteminin optimal durumlarının ve miktarlarının ortaya çıkarılması probleminin çözümü amacıyla, özelleştirilmiş algoritmalarla çözüme gidilebilecek şekilde matematiksel problemi formülize etmek gereklidir. Ayrıca yakınsaklık güvenilirliği uygulayıcıya uyumlu olarak kullanılabilirlik ve mümkün mertebe az hesaplama gerektirmesi gibi kriterlerde gerçekleştirilmek istenmektedir.

1.3. Çalışmanın Hedefleri

Bu çalışmanın hedefi eşdeğer yük metoduna dayanarak elektrik alan optimizasyonu ve elektrot sistemlerinin tam simülasyonu için yeni bir metodun geliştirilmesidir.

Elektrot sistemlerinin tam simülasyonu için geliştirilen yeni düzenleme kovansiyonel eşdeğer yük metodunda verilen hesaplama yolları üzerinden aşağıdaki talepleri yerine getirmelidir :

- Sadece çevre noktalarının, yük sayısına eşit miktarı yanında toplam gerçek elektrot çevresinin hesaplama dahil edilmesi gerekir,
- Simülasyonun doğruluğunu yükseltmek ve buna rağmen yüklerin sayısını düşük tutmak için eşdeğer yüklerin optimal durumunu ve büyüklüğünü otomatik olarak hesaplayabilen bir algoritma elde etmeye çalışılmalıdır,
- Metot, yüksek bir hesaplama stabilitesine sahip olmalıdır.

Elektrik alan optimizasyonu ile ilgili olarak ilave hesaplama stabilitesi ve hesaplama çalışması için aşağıdaki hedefler yerine getirilmelidir :

- Metot, hesaplama sırasında optimizasyon sahasındaki yük sistemini otomatik olarak elektrot çevrelerinin değişen biçimine adapte etmek durumunda olmalıdır,
- Simülasyonun doğruluğu hesaplama akışı içinde ortaya çıkan eş potansiyel yüzeyler dikkate alınmak suretiyle garanti edilmelidir.

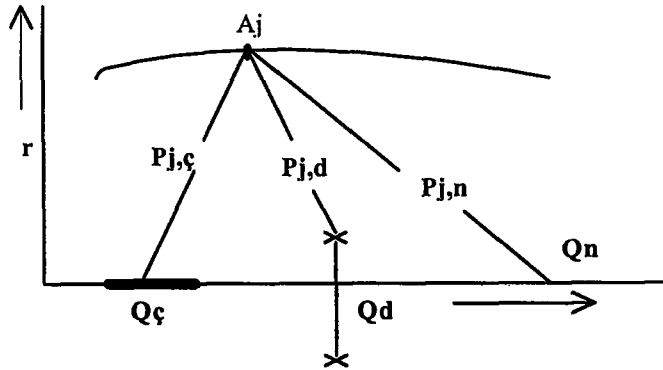
Son olarak alan kontrollü hesaplama dayanarak elektrot biçimlerinin optimizasyonu ilave bir çalışma gerektirmeden mümkün olacak şekilde her iki metot birbirine adapte edilmelidir.

2.EŞDEĞER VE YÜZEYSEL DAĞITILMIŞ YÜKLERLE ELEKTRİK ALAN HESABI

2.1.Eşdeğer Yük Metodunun Prensibi

Laplace-potansiyel denkleminin (Denklem:1.1) lineerliğinden hareketle yaklaşık çözümlerin elde edilmesi amacıyla çok genel kullanılabilir bir yol çıkmaktadır. Bu suretle sonlu sayıdaki noktalarda kenar şartları doğru veya yaklaşık olarak yerine getirilecek şekilde (1.1) denkleminin kısmi çözümleri üst üste getirilebilir. Eşdeğer yük metodu Laplace denkleminin kısmi çözümleri olarak noktasal, çizgisel ve dairesel yüklerin potansiyel alanlarını kullanır. Bu alanlar bir elektrot sisteminin fiziksel yüzey yükünü simüle ederler. Ancak fiziksel yüzey yüklerine geniş ölçüde tekabül eden yüzeysel dağılımlı yükleri yüzeyler üzerinde kullanmak da mümkündür (Singer,1974).

Bir A_j hacim noktasında bir eşdeğer yükün (Q_j) Φ potansiyel kısmı, potansiyel katsayıları üzerinden hacimsel noktanın ve yükün geometrik tertibinin bir fonksiyonu olan potansiyel parçasıyla bağlantılıdır. Şekil:(2.1)'deki gibi dönel simetrik bir tertip için A_j üst noktası $P_{j,\phi}$ potansiyel katsayıları üzerinden Q_ϕ çizgisel yüküyle, $P_{j,d}$ katsayıları üzerinden Q_d dairesel yüküyle ve $P_{j,n}$ katsayıları üzerinden Q_n noktasal yüküyle bağlantılıdır.



Şekil:2.1 Eşdeğer Yüklerin Prensibi

Bu üst noktanın gerçek potansiyeli (Φ_A), tüm potansiyel parçaların süper pozisyonuyla ortaya çıkar. Böylelikle bu üst nokta için n yüklü bir sistem (2.1) bağıntısını oluşturur.

$$P_{J,1} \cdot Q_1 + P_{J,2} \cdot Q_2 + \dots + P_{J,n} \cdot Q_n = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_n = \Phi_A \quad (2.1)$$

Elektrotlar haricindeki yüklerin elektrik alanı, gerçekte mevcut yüzey yüklerinin alanıyla aynı olacak tarzda somut bir elektrot sistemi için yerel olarak tesbit edilen yükleri ifade etme problemi mevcuttur. Bu durum, ancak eşdeğer yüklerin elektrik alanlarının üst üste gelmesinden ortaya çıkan eşpotansiyel yüzeylerin elektrot yüzeyleriyle aynı olması halinde söz konusu olmaktadır. Bu uygunluk, elektrot üst yüzeylerinde çevre noktalarının yük sayısına eşit bir sayı önceden verilmek suretiyle sağlanır. Böylece bu çevre noktalarının her birinde eşdeğer yüklerin kısmi potansiyellerinin toplamının Denklem:(2.1)'e göre elektrot potansiyeline eşit olması gerekir. Bu gereklilik aşağıdaki lineer denklem sistemiyle bağlantılıdır (Denklem:2.2).

$$(P) \cdot (Q) = (\Phi) \quad (2.2)$$

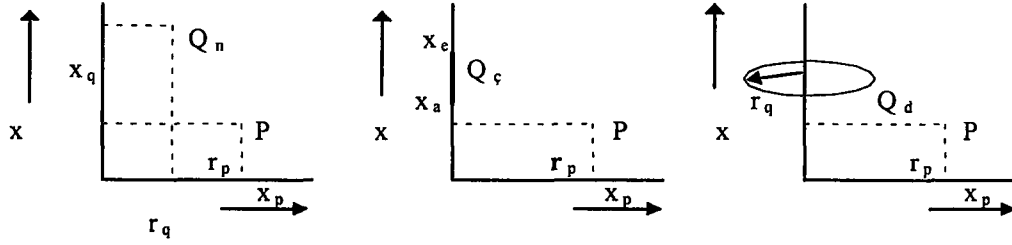
P ile, çevre noktalarının ve eşdeğer yüklerin bilinen konumları yardımıyla hesaplanabilen potansiyel katsayılarının karesel matrisi gösterilmektedir. Bu denklem sisteminin çözümü, bilinen potansiyellerin (Φ) sütun matrisi yardımıyla bilinmeyen eşdeğer yüklerin sütun matrisini ortaya çıkarmaktadır. Yük sistemi ise kendi eşpotansiyel yüzeyleriyle alan hacmini ifade etmektedir. Elektrik alan şiddeti potansiyelin ortalama eğiminin oluşumuyla ortaya çıkar (Denklem:2.3).

$$\vec{E} = - \text{grad } \Phi \quad (2.3)$$

2.2.Ayrık Eşdeğer Yükler

Bu çalışmada, esas olarak incelenecek olan herhangi bir formdaki dönele simetrik elektrodların elektrostatik alanları ayrık yüklerin uygun koordine edilmiş kombinasyonlarıyla hesaplanabilmektedir.

Bu yükler, metalik elektrotların simülasyonu için onların potansiyel alanlarının biçimine dayandırılan noktasal, çizgisel ve dairesel yüklerdir. İfade edilen ayrık eşdeğer yükler, herhangi bir p üst noktasında aşağıdaki potansiyel değerlerini Φ_p gösterirler (Şekil:2.2) :



Şekil: 2.2 Ayrık Eşdeğer Yükler (Noktasal,Çizgisel ve Dairesel Yükler)

Noktasal Yük :

$$\Phi_p = \frac{1}{4\pi\epsilon\sqrt{(r_q - r_p)^2 + (x_q - x_p)^2}} \cdot Q_n \quad (2.4)$$

Çizgisel Yük :

$$\Phi_p = \frac{1}{4\pi\epsilon(x_e - x_a)} \cdot \ln \frac{x_e - x_a + \sqrt{r_p^2 + (x_e - x_p)^2}}{x_a - x_p + \sqrt{r_p^2 + (x_a - x_p)^2}} \cdot Q_\varphi \quad (2.5)$$

Dairesel Yük :

$$\Phi_p = \frac{1}{2\pi^2\epsilon} \frac{k'}{\sqrt{4r_p \cdot r_q}} \cdot K(k') \cdot Q_d \quad (2.6)$$

$$K(k') = \int_0^{\pi/2} \frac{d\Psi}{\sqrt{1 - k'^2 \sin^2 \Psi}} \quad (2.7)$$

$$k' = \sqrt{\frac{4r_q \cdot r_p}{(r_p + r_q)^2 + (x_p - x_q)^2}} \quad (2.8)$$

Farklı yük yoğunluklu çizgisel eşdeğer yükler, çubuk şeklindeki dairesel silindirik elektrotlar için uygundur. Dairesel yükler, çeşitli elektrot biçimlerinin geçiş sahalarının adapte edilmesi için uygundur. Küreye benzer donanımlar ise en iyi olarak noktasal ve dairesel yüklerle simüle edilirler. Üç boyutlu elektrik alan problemleri için bu ayrık yüklerin kullanımı dikkat çekmektedir (Utmischi,1976; Utmischi,1979). Elektrot dizaynlarındaki ayrık yüklerin sıralanması bakımından bir yük üzerinde bulunan üst noktalar için sözkonusu yükün potansiyel katsayısı sonsuza gittiği için yüklerin tariflenmesi gereken elektrik alan hacminde yerleştirilememesinin sınırlı kalacak şekilde geçerli olması gereklidir. Bu yüzden ince elektrotların veya dielektrikli sınır katların simülasyonu için ayrık yüklerin kullanımında elektrik alan bölgelerinin kısmi hesaplanması üzerine bir sınırlama lüzumludur. Örneğin iki dielektrik malzemeyle yapılan hesaplamada (Weiss,1969) , 2' nolu dielektrik dahilindeki elektrik alan hesabı için 1' nolu dielektrik dahilindeki yükler kullanılır ve tersi alınır.

2.3.Yüzey Yükleri

Eşdeğer yük metodu, geniş ölçüde fiziksel yüzey yüklere tekabül eden yüzey yüklerin kullanımına dahi imkan vermektedir. Bu durum elektrot geçişlerinin kontrol plakalarında veya huni şeklindeki mesnetlerinde mevcut olan yüzeyli ve ince elektrot biçimlerinin hesaplanması için uygundur. Yüzey yükleri sayesinde dielektrik sınır katları dahi simüle edilebilir. Eğer potansiyelin devamlılığında alan şiddetinin normal bileşenlerinin oranı relatif dielektrik sabitleriyle zıt olarak davranıyorsa sınır şartı yerine getirilmiş olur. Yüzey yüklerinin kullanılması sırasında genellikle yük yoğunluğu

değişiminin karmaşık geometrik bir bağıntıya sahip olmasıyla birlikte hesaplama yapılmaktadır. Yüksek dereceli polinomlarla bu bağıntının simülasyonu çok çalışma gerektirmektedir. Yüzey yüklerinin yardımıyla elektrik alan hesabının ayrıntılı bir ifadesi (Singer,1974)'de bulunmaktadır.

2.4. Konvansiyonel Eşdeğer Yük Metodunun Simülasyon Problemleri

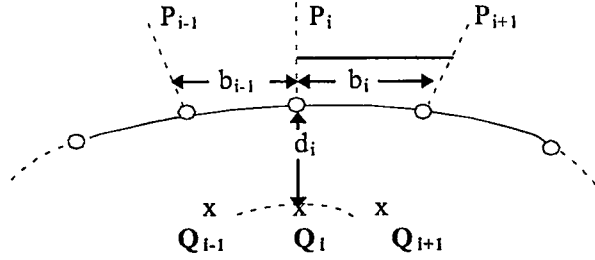
Eşdeğer yük miktarlarını (Q) Denklem:(2.9)'a göre tesbit edebilmek için eşdeğer yük metodunun esas hesaplama stratejisi, karesel potansiyel katsayı matrisini teşkil etmek ve bunun tersini almakta bulunmaktadır.

$$(Q) = (P)^{-1} \cdot (\Phi) \quad (2.9)$$

Böylelikle çözümün doğruluğu sadece potansiyel katsayılara bağlıdır. Bu katsayılar yük tipine bağlı olan hacimsel noktaların ve yüklerin geometrik tertibinin fonksiyonudurlar. Simülasyonu yapılacak kenarların biçimi, hesaplamada göz önüne alınan yüklerin tiplerine göre belirlendiği için uygulayıcının asıl problemi iyi bir simülasyon elde etmek hedefiyle birlikte kenar noktalarının ve yüklerin ayrılmasında ve düzenlenmesinde bulunmaktadır. Hata minimizasyonu açısından tertibin nasıl yapılması gerektiğine ait hiçbir kural olmadığı için çözümün doğruluğu uygulayıcının tecrübesine bağlıdır.

Elektrotlar dahilinde ayrıık eşdeğer yüklerin tesbiti amacıyla sadece doğrusal hatlar mevcuttur. Bunlar genellikle eşpotansiyel yüzey üstündeki kenar noktada dik şekilde bulunan bir doğru üstünde bir yük konumuna tekabül ederler. Ayrıca eşdeğer yük ve ona koordine edilmiş kenar nokta arasındaki d_i uzaklığı bu kenar noktanın komşu kenar noktalara olan uzaklıklarıyla tespit edilmekte (Şekil:2.3) ve Denklem:(2.10)'a göre hesaplanmaktadır. Elektrot kenarlarının ayrılması amacıyla sabit doğrusal hatlar yoktur. Çevre noktalarının sadece tam simülasyonu yapılacak elektrot sahalarında yoğunlaştırılması tavsiye edilmektedir. Elektrot kenarlarının ayrılması amacıyla çevre noktalarının ve yüklerin tertibi için ifade edilen doğrusal hatların çerçevesinde, sonuçların doğruluğunun önceden verilen matrisin genişliğine bağlı olduğu ve bu

doğruluğun hesaplanan genişliği bakımından verilen çalışmanın ölçüsünde yükselebildiği beklenebilmektedir (Andersen,1981).



Şekil:2.3 Eşdeğer Yüklerin Durumu ; o Kenar nokta , x Eşdeğer yük

$$d_i = \frac{b_i + b_{i-1}}{2} \cdot c, \quad c = 1, \dots, 2 \quad (2.10)$$

Kenar noktalarının yoğunlaştırılması suretiyle yüklerin ve kenar noktalarının arasındaki tertibin anlaşılabilirliği kaybolabildiği için bu durum söz konusu olmaz. Bu tarz bir olay kötü yapılandırılmış veya kullanışlı olmayan bir çözüme yol açabilir. Pratikte matrisin yapılanmasına ait zaman alan araştırma göz önüne alınmamaktadır. Çünkü bu yapılanma, kenar noktasının yüke daha iyi tertiblenmesi üzerine hiçbir tesire imkan vermemektedir. Dairesel ve yüzeysel yüklerin potansiyel katsayıları esas itibarıyla bir yaklaşım üzerinden hesaplandıkları için çözümün iteratif iyileştirmeleri dahi göz önüne alınmamaktadır (Jordan et al,1973).

Yükler ve onlara koordine edilen kenar noktalar arasındaki mantıklı düzenlemelerin muhtemel bir eksikliğini belirlemek için potansiyel katsayıların daha basit incelenmesi yarar sağlamaktadır. Uygulayıcı, kenar noktalarına yükleri koordine eder veya ters çevirir, potansiyel katsayılarını hesaplatır ve mantıklı bir tertip mevcut oluncaya kadar incelemesine devam eder, daha sonra da matris invers işlemi başlar. Diğer taraftan yüksek zorlanmalı sahalardaki kenar noktalarının azaltılması, kenar noktaları arasında önceden görülemeyen simülasyon hatalarına sebebiyet verebilir. Bu suretle hatta iyi yapılandırılmış bir matriste dahi elektrik alan şiddetine ait büyük hatalar ortaya çıkabilir.

Özet olarak uygulayıcı, basit potansiyel alanlara kenarların mantıklı bir bölümlemesini gerçekleştirebildiği sürece konvansiyonel formdaki eşdeğer yük metodunun elektrot sistemlerinin simülasyonu için uygun olduğu söylenebilir. Birçok donanımlar; küreler, silindirler ve düzlemler gibi basit geometrilere ayrılabilirler için yukarıda anlatılan durum ekseriya yüksek gerilim tekniğinde söz konusu olmaktadır. Keskin kıvrımlı veya köşeli elektrot parçalarında ayrıca çok farklı elektrot bölümleri arasındaki geçiş sahalarında olduğu gibi bu tarzda basitçe ayrılamayan geometriler konvansiyonel eşdeğer yük metotlu simülasyonda zorluklar çıkarabilmektedirler.



3.EŞDEĞER YÜK METODUYLA TAM ELEKTROT SİMÜLASYONU

3.1.Simülasyondaki Problemin ve Gereksinimlerin Formülasyonu

Elektrot sistemlerinin tam simülasyonu uygulayıcı tarafından yapılmış küçük bir simülasyon hatasına bağlı olarak doğru anlatımdan uzaklaşır. Ayrıca potansiyel-alan simülasyonları söz konusu olduğu için elektrot sistemlerinin tam simülasyonu aşağıdaki (F)-hata fonksiyonunun minimumlaştırılması problemi olarak göze çarpar.

$$\text{Min } F, F = \frac{1}{L} \int_L (F_{\text{gerçek}} - F_{\text{istenen}})^2 dL \quad (3.1)$$

F-fonksiyonu, simülasyonu yapılacak elektrot kenarlarındaki gerçek ($\Phi_{\text{gerçek}}$) ve olması istenen (Φ_{istenen}) potansiyeller arasındaki ortalama hata için bir ölçüdür. N tane yüklü bir sistem söz konusu olursa o zaman hata fonksiyonunun minimumlaştırılması sadece bu n adet yükün konumlarının ($\vec{r}_i$) ve miktarlarının (Q_i) uygun bir değişimiyle mümkündür. Bu yüzden hata fonksiyonu Denklem:(3.2) olarak da ifade edilebilir.

$$F = F[(x)]; (x) = (\vec{r}_1, \dots, \vec{r}_n, Q_1, \dots, Q_n)^T \quad (3.2)$$

Buna göre hedef fonksiyonu; bağımsız değişkenlere ait (x), transfer edilmiş formda ifade edilen sütun vektörüne bağlıdır. Bunun yanında Bölüm:(2.2)'de ifade edilen yük tiplerinin potansiyel katsayılarına ait denklemlerden görülebildiği gibi kullanılan eşdeğer yüklerin tipine bağlı olan ve genellikle lineer olmayan bir fonksiyon söz konusu olur.

Eşdeğer yüklerin elektrik alan hacmi dışında bulunması gerektiği dikkate alınırsa, (F)-hedef fonksiyonunun minimizasyonu sadece elektrotların geometrik kenar şartlarının dikkate alınmasıyla mümkündür. Bu kenar şartlar genellikle lineer olmayan sınırlamalarla hesaplanabilecek şekilde herhangi bir forma sahip olabilirler. Eşdeğer yüklerin yardımıyla elektrot sistemlerinin tam simülasyon problemi en genel formda çok boyutlu lineer olmayan optimizasyon problemiyle bağlantılı olmaktadır. Bu sahadaki

çözüm arayışlarının; yakınsaklık emniyetini, uygulayıcıya uygun gerçekleştirilebilirliğini ve mümkün mertebe az bir hesaplama operasyonunu göz önüne alması gereklidir.

3.2.Hata Minimizasyon Algoritmaları

Sınırlamalı simülasyon probleminin incelenmesinde sınırlamasız bir optimizasyon algoritmasının kullanımına imkan vermek için sınırlamalı sahalardan sınırlamasız sahalara transformasyon şeklindeki Box'un (1966) teklifi bu çalışmada benimsenmiştir.

Bu yüzden aşağıda elektrik alan hesabı problemine göre basitçe düzenlenmiş transformasyonlar geliştirilmiştir. Bu transformasyonların hesaplama gücünün yüksek olması, sınırlamasız optimizasyon algoritmalarının kullanımına sahip olmak yanında (bu durum özellikle çok boyutlu optimizasyon problemi için büyük öneme sahiptir) hesaplama sırasında kullanıma uygunluğu da getirmektedir.

Sistemdeki transformasyon denklemlerinin bir kere kullanımı istenen her elektrot sisteminin incelenmesi için yeterlidir. Ayrıca kullanıcının sisteme sadece basit verileri, yüklerin yerleşimi için izin verilen geometrik saha üzerinden iletmesi gerekli olmakla beraber, özel olarak her problem için yeni sınırlama denklemlerini tekrar elde etmesi bu sınırlamalı optimizasyon algoritmalarına ulaşmaya kadar gerekmemektedir.F-simülasyon hata fonksiyonunun minimizasyonu için Fletcher algoritması (Bir sınırlamasız optimizasyon metodu) tercih edilebilir (Fletcher,1970). Daha sonra açıklanacak bu algoritma, değişken sayısı ne kadar büyük olursa diğer algoritmalarından o kadar üstün olduğu ve kuvvetli yakınsadığı için tercih edilmektedir.

Minimize edilmesi gereken hata, yük konumlarının eşdeğer yüzeyle iyi derecede koordine edildiği kabul edilebilecek kadar yeterli küçüklükte ise eşdeğer yüklerin koordinasyonu değiştirilmez. Geride kalan “ artık ” hata, daha sonra yüklerin miktarlarının varyasyonu ile azaltılır. Ayrıca bu hata fonksiyonu yük miktarlarına bağlı olarak lineer bir fonksiyon olduğu için lineer, ters analitik bir düzenleme kullanılabilir. Böylece Denklem:(3.2) aşağıdaki forma indirgenmiş olur. Başka bir hata minimizasyon algoritması olan Lineer regresyon metodu, Fletcher algoritmasına kıyasla çok hızlı bir

yöntemi ifade ettiği için bu metot minimizasyon için gerekli hesaplama zamanını azaltmaktadır. Regresyonun, elektrot yüzeyinde bir hata dengelemesine sebebiyet verdiği ortaya çıkmaktadır. Bu durum potansiyel simülasyonundan ortaya çıkan elektrik alan şiddetinin doğruluğunu kuvvetlendirir.

$$F = F[(x)] ; (x) = (Q_1, \dots, Q_n)^T \quad (3.3)$$

3.2.1.Fletcher Algoritması

Fletcher algoritması sınırlamasız lineer olmayan optimizasyon sahasında çok bilinen bir minimizasyon metodudur. Bu algoritma Fletcher ve Powell (1963) metodunun bir düzenlemesini ifade etmektedir. Bu metot Davidon (1959) tarafından çıkarılmış bir algoritmaya dayanır ve bunu basitleştirir. Algoritma “değişken metrik (variable metric)” olarak ifade edilen metotlara aittir. Bu metotlar Davidon metoduna dayanarak bir iterasyon adımından en yakın iterasyon adımına değiştirilmiş bir ters matrisle çalışılması suretiyle oluşturulur (Greenstadt,1970; Goldfarb,1970).

Fletcher metodu, minimize edilmesi gereken fonksiyonun yaklaşık olarak karesel olmasından hareket eder. Bu durum, Denklem:(3.4) biçimindeki bağımsız değişkenlerin (x) n-boyutundaki karesel standard formunda ifade edilebilir.

$$F \approx F_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n G_{ij} x_i x_j \quad (3.4)$$

Ve matris formunda Denklem:(3.5) olarak ifade etmek mümkündür.

$$F \approx F_0 + (a)^T \cdot (X) + \frac{1}{2} (X)^T (G) \cdot (X) \quad (3.5)$$

Burada $(a)^T$ bir $(1 \times n)$ ve (G) bir $(n \times n)$ matrisidir ve her iki matris bilinmemektedir. Bağımsız değişkenlere göre F-fonksiyonunun eğim oluşumu sütun vektörünü (g) oluşturur:

$$(g) = (a) + (G) (X) \quad (3.6)$$

Bilindiği üzere fonksiyonun ilk kısmi çıkarımlarının salınması gerektiği X_0 noktasında, (X) noktası ve (X_0) minimumu arasındaki kayma Denklem:(3.7)'e göre hesaplanabilir.

$$(X_0) - (X) = - (G)^{-1} (g) \quad (3.7)$$

F-fonksiyonunun ikinci kısmi çıkarımlarına ait "Hessesche" matrisi olarak bilinen ve elemanları Denklem:(3.8)'de ifade edilen matris (G) ise, Denklem:(3.7)'e göre kayma hiçbir suretle Newton-Rapson iteratif minimizasyon metodunun klasik formu olarak ifade edilmez (Beightler et al,1979).

$$G_{ij} = \frac{\delta^2 F}{\delta X_i \cdot \delta X_j}, \quad i = 1, \dots, n \quad ; \quad j = 1, \dots, n \quad (3.8)$$

Fletcher ve Powell (1963) kendi metotlarında $(G)^{-1}$ 'i direkt hesaplamamaktadırlar. Bunun yerine herhangi bir pozitif tanımlı simetrik bir matrizen (H) hareket ederler ve bu H -matrisini, ikinci kısmi çıkarımlara ait invers edilen $(G)^{-1}$ matrisine nisbetle minimumda yakınsayacak şekilde iteratif olarak F-fonksiyonunun eğim oluşumu yardımıyla düzenlerler. Metot böylelikle Newton metodunu andırmaktadır (Broyden,1967). Ancak bu Newton metodu, Hesseschen matrisinin hesaplanmasından ve inversinden kaçınılması amacıyla ve buna bağlı olarak Newton-Rapson metodunda ortaya çıkan kararsızlıklar sebebiyle kullanılmamaktadır (Beightler et al,1979; Broyden,1967).

Hesaplamanın başlangıcında pozitif tanımlı simetrik H -matrisi olarak (I) birim matrisi kullanılmaktadır. i . iterasyondan sonra bu matrisin değiştirilmesi Denklem:(3.7)'e uygun olarak düzenlenmiş Denklem:(3.9)'a göre hareketin doğrultusu üzerine elde edilen bilgi yardımıyla yapılır.

$$(S^i) = -(H^i) (g^i) \quad (3.9)$$

Minimum doğrultudaki değişme, Denklem:(3.10)'a göre $((H^{i+1}) (G))$ matrisinin özel vektörünü 1'lik bir hususi değerle ifade eden bir adım yardımıyla gerçekleştirilir.

$$(\delta^i) = (X^{i+1} - X^i) = \lambda_i (S^i) \quad (3.10)$$

Bu durum eğer metot yakınsıyorsa (H) 'ın (G^{-1}) 'e nisbetle yakınsamasını garanti etmektedir. Ayrıca eğer λ_i 'nin kullanılması F-hatasını 1'e eşit olacak şekilde azaltmaya yetmezse λ_i skaler büyüklüğü, F'in mümkün olduğu kadar çok azalması amacıyla 0,1 ve 1 arasındaki λ_i için en iyi sonuç alınacak şekilde seçilir. $F(X^{i+1})$ 'in hesaplanmasına göre ve (δ^i) adımına ortogonal olmak zorunda olan ;

$$(\delta^i)^T (g^{i+1}) = 0 \quad (3.11)$$

(g^{i+1}) gradyanlarına göre karesel bir hedef fonksiyon durumu için (H^i) 'nin geliştirilmesi n-adımlarına göre $(G)^{-1}$ 'i ortaya çıkaracak şekilde (H^{i+1}) oluşturulur. Fletcher (1970)'e göre

$$(H^{i+1}) = (H^i) + \frac{(\delta^i)(\delta^i)^T}{(\delta^i)^T(\gamma^i)} - \frac{(H^i)(\gamma^i)(\gamma^i)^T(H^i)}{(\gamma^i)^T(H^i)(\gamma^i)} \quad (3.12)$$

ifadesi yazılır, eğer ;

$$(\delta^i)^T (\gamma^i) < (\gamma^i)^T (H^i) (\gamma^i) \quad (3.13)$$

ise, aksi takdirde ;

$$(H^{i+1}) = (H^i) - \frac{(\delta^i)(\gamma^i)^T(H^i)}{(\delta^i)^T(\gamma^i)} - \frac{(H^i)(\gamma^i)(\delta^i)^T}{(\delta^i)^T(\gamma^i)} + \left\{ 1 + \frac{(\gamma^i)^T(H^i)(\gamma^i)}{(\delta^i)^T(\gamma^i)} \right\} \frac{(\delta^i)(\delta^i)^T}{(\delta^i)^T(\gamma^i)} \quad (3.14)$$

ifadesi geçerli olur, burada ;

$$(\gamma^i) = (g^{i+1}) - (g^i) \quad (3.15)$$

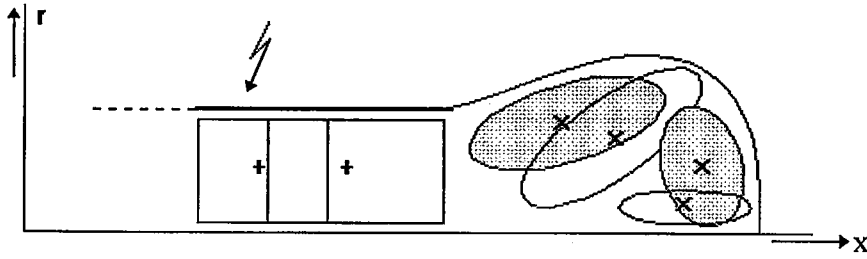
değerindedir. Denklem:3.13'deki şart için (δ^i) ; (G^{-1}) (γ^i) ile yer değiştirirse (H^{i+1}) 'in yapısını her iki (3.12) ve (3.14) formülleriyle kontrol eden bir kıyaslamanın (G^{-1}) ve (H^{-1}) arasında ortaya çıktığı açıkça görülmektedir. Bu durum eğer (H^i) pozitif olarak tanımlı ise ve tekil değilse bu özelliklerin H^{i+1} için dahi elde edilmiş olarak kalmasına yol açar (Fletcher,1970), bu suretle metodun yakınsaklığı garanti edilmiş olur. Denklem:(3.9)'a göre λ_i ve δ^i değerleri, bundan sonra Denklem:(3.10) için yeni (X^{i+1}) değişkenleri hesaplanır ve böylece yeni bir iterasyona başlanılır. Ayrıntılı bir anlatım amacıyla yakınsaklık ve kararlılık araştırmaları için ayrıca (H^{i+1}) 'in teşkili amacıyla matris manipulasyonlarına ait metotlar mevcuttur (Fletcher,1970; Fletcher et al,1963). Basit bir anlatım, (Beightler et al,1979)'da "saptırılmış gradyanlar" ismi altında bulunmaktadır.

Fletcher algoritması kesin bir karesel yakınsaklığa sahiptir. Bu durum, minimumu bulmak veya (H^n) 'i (G^{-1}) 'e eşit tutmak için n tane bağımsız değişkene bağlı olan karesel bir fonksiyon için sadece n-iterasyonun gerekli olduğu anlamına gelmektedir. Karesel olmayan fonksiyonlar için yakınsaklığın bir ispatı mevcut değildir. Değişkenlerin sayısı ile ilgili olarak örneğin spiral şeklindeki fonksiyonlar için 50 değişkene kadar bu algoritma başarı ile uygulanmıştır. Fletcher algoritmasının üstünlüğü yeni algoritmalar tarafından da kabul edilmiştir (Nazareth,1977; Dennis et al,1979; Brayton et al,1979).

3.2.1.1.Sınırlamaların Dikkate Alınması

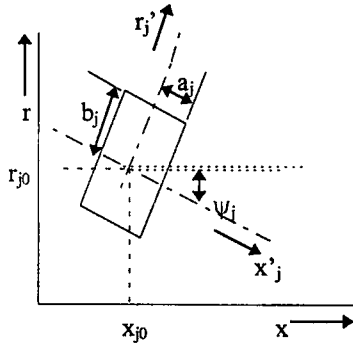
Yüklerin, ifade edilecek elektrik alan hacminde bulunmadığı, sınırlamasız Fletcher algoritması tarafından kolaylıkla bilinmemektedir. Bundan dolayı bu çalışmada transformasyonlar Box'un (1966) düşüncesine göre yapılmaktadır. Bu durum sınırlamalı sahalardan sınırlamasız sahalara bir dönüşümü ve ayrıca bunun zıddını da

ifade etmektedir. Transformasyon fikri ilk önce matematiksel olarak basitçe ifade edilebilir sınırlamalardaki gerçek kenar şartlarının basitleştirilmesine dayanmaktadır. Elektrot sistemlerinin simülasyonu için dörtgen ve elips sınırlamalar geliştirilmiştir. Burada dörtgen simgesi, büyük kıvrım yarıçaplı elektrot sahalarındaki bir yükün hareketinin sınırlandırılması için ve elips simgesi, kıvrılmış elektrot sahalarındaki bir yükün hareketinin sınırlandırılması için kullanılabilir.

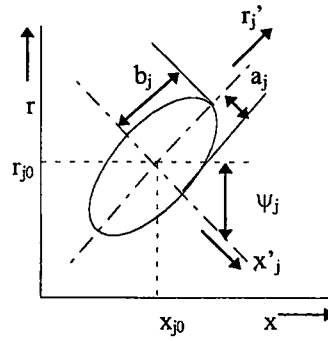


Şekil:3.1 Dairesel Yüklerle Uygulamada Dörtgen ve Elips Kenar Şartları Yardımıyla Sınırlamaların Tanımı İçin Şematik Anlatım.

Şekil:(3.1) dönel simetrik bir elektrot parçası için yük sınırlamalarının tanımlanması ayrıca dörtgen ve elips kenar şartlarının kullanılması amacıyla şematik bir anlatımı göstermektedir. Şekil:(3.1)'de 6-dairesel yük için sınırlamalar sözkonusu olmaktadır. Bu sınırlamaların 4'ü eliptik bir formda her elektrot için adaptasyon amacıyla verilmektedir. Diğer ikisi silindirik parçaya daha iyi bir adaptasyona sahip dörtgen formundadır. Bir elips veya bir dörtgen tarafından kaplanmış her yüzey bir yükün uygun ve geçilemeyen bir sahasını ifade etmektedir. Farklı sahaların üst üste gelmesi düşünülebilir. Şekil:(3.2) ve Şekil:(3.3) iki boyutlu anlatımda her iki sınırlama formunu (dörtgen ve elips) göstermektedirler.



Şekil:3.2 Dörtgen Sınırlamaların
Anlatımı



Şekil:3.3 Elips Sınırlamaların
Anlatımı

x'_j ve r'_j , j . yükün sınırlama formunun simetri eksenlerini ifade ediyorlar. Bu eksenlerin kesim noktası kartezyen koordinat sisteminin sıfır noktasından x_{j0} veya r_{j0} civarında kaydırılmıştır ve bunların eksenleri başlangıç koordinat eksenine $\psi_j = \angle(x, x_j)$ açısıyla döndürülmektedir. Problem sadece x'_j ve r'_j parametrelerinin karakteristik değerlerini “Fletcher” algoritmasına dahil eden uygun sınırlamasız değişkenleri bulmaktır. j . yükün elde edilmeye çalışılan bu sınırlamasız değişkenleri α_j ve β_j olarak adlandırılırsa i . iterasyonun transformasyon denklemleri Şekil:(3.2) ve Şekil:(3.3) de ifade edilen sınırlama formları için trigonometrik fonksiyonların yardımıyla aşağıdaki tarzda ifade edilebilmektedir:

Dörtgen Sınırlamalar :

$$x'^i_j = a_j \sin \alpha^i_j \quad (3.16)$$

$$r'^i_j = b_j \sin \beta^i_j \quad (3.17)$$

Buradan başlangıç kartezyen koordinat sistemi ortaya çıkar:

$$x^i_j = x_{j0} + a_j \sin \alpha^i_j \cos \psi_j - b_j \sin \beta^i_j \sin \psi_j \quad (3.18)$$

$$r_j^i = r_{j0} + a_j \sin \alpha_j^i \sin \psi_j + b_j \sin \beta_j^i \cos \psi_j \quad (3.19)$$

Eliptik Sınırlamalar :

$$x_j^i = a_j \cos \alpha_j^i \sin \beta_j^i \quad (3.20)$$

$$r_j^i = b_j \sin \alpha_j^i \cos \beta_j^i \quad (3.21)$$

Buradan başlangıç kartezyen koordinat sistemi ortaya çıkar:

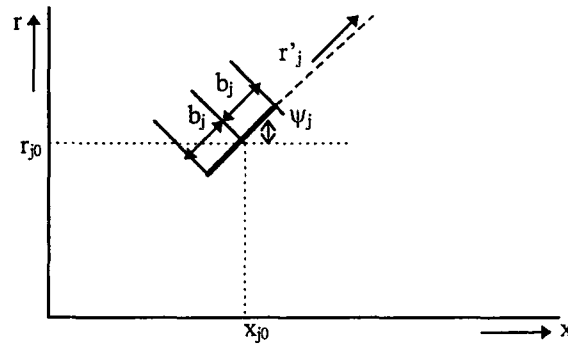
$$x_j^i = x_{j0} + a_j \cos \alpha_j^i \sin \beta_j^i \cos \psi_j - b_j \sin \alpha_j^i \sin \beta_j^i \sin \psi_j \quad (3.22)$$

$$r_j^i = r_{j0} + a_j \cos \alpha_j^i \sin \beta_j^i \sin \psi_j + b_j \sin \alpha_j^i \sin \beta_j^i \cos \psi_j \quad (3.23)$$

Transformasyon denklemlerinin sisteme dahil olmasından sonra yüklerin başlangıç pozisyonu dışında sadece her yükün kendi başlangıcından maksimum mücade edilen uzaklıklarının (a_j ve b_j) ayrıca arzu edilen sınırlama formunun başlangıç kartezyen koordinat sistemine döndürülmesinin (ψ_j) tesbit edilmesi gerekir.

3.2.1.2. Sınırlamaların Tesbitinde Tecrübenin Gözönüne Alınması

Önceki bölüme göre sınırlamaların gözönüne alınması, sınırlı sayıdaki başlangıç değişkenlerine eşit olan transforme edilmiş bir miktar bağımsız değişkene sebebiyet verir. Yüklerin düzenlenmesi için gerekli sahalar ekseriya elektrot biçimleriyle bilindiği için bu tarz bir olay artık lüzumlu olmamaktadır. Bu yüzden sadece elektrotların dahilinde yükün en iyi şekilde tertip edilebildiği derinlik üzerine bilgi gerekmektedir. Minimizasyon işlevi içindeki yüklerin hareketinin serbestliği sadece kesin olarak ifade edilen doğrultulara sınırlandırılması gerektiği için tecrübelerin de dahil edilmesi lüzumludur. Şekil:(3.4) bu sınırlama incelemesinin bir örneğini göstermektedir.



Şekil:3.4 Sınırlamanın Basitleştirilmiş Anlatımı.

Buna göre j . yük, (x_{j0}, r_{j0}) başlangıç durumuyla sadece kendi konumundaki r'_j doğrultusunda değiştirilebilir. Bunu yaparken başlangıç durumunun mutlak maksimum uzaklığı b_j değerini aşamaz. Bundan dolayı Fletcher algoritmasıyla yük koordinatlarının dikkate alınması amacıyla her yük için sadece birkaç bağımsız değişken yeterlidir. J . yükün bu bağımsız sınırlamasız değişkeni α_j ile karakterize edilirse bu durumda i . iterasyonda aşağıdaki transformasyon denklemleri ortaya çıkar :

$$x_j^i = x_{j0} + b_j \sin \alpha_j^i \cos \psi_j \quad (3.24)$$

$$r_j^i = r_{j0} + b_j \sin \alpha_j^i \sin \psi_j \quad (3.25)$$

Sınırlamaların tecrübeye göre dikkate alınması, minimizasyon işlevindeki bağımsız değişkenlerin azaltılmasına sebebiyet verir. Bu azalma da hesaplama operasyonunun indirgenmesiyle bağlantılıdır. Pratikte sadece yükün hareketi ve doğrultusu için bir sınır belirlenmesi gerektiği için bu suretle ön çalışma dahi kolaylaştırılmış olur. Fletcher algoritmasıyla yapılan çalışmayı gerekli olmayacak kadar büyütülmüş değişken sayısı ile yükseltmeksizin, tam simülasyonu yapılacak saha genişletilebilecek şekilde veya yüklerin daha büyük bir kısmının kullanımıyla daha doğru simülasyon yapılabilecek şekilde bağımsız değişkenlerin sayısının azaltılmasından yararlanmak mümkündür.

3.2.2. Lineer Çoklu Regresyon Analizi

Lineer çoklu regresyon (Efroymson,1960;Slater,1961;Healy,1963) en küçük karesel hata metodunu (Bronstein,1975) hesaplama yoludur. Bu metod Denklem:(3.26)'daki bağımsız ve bağımlı değişkenlerin gözönüne alınan miktarının mümkün olduğu kadar iyi adaptasyonunu elde etmek için veri analizinde kullanılmaktadır.

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n \quad (3.26)$$

Burada Y bağımlı değişkendir; $x_1, \dots, x_n$ bağımsız değişkenler ve $b_0, b_1, \dots, b_n$ belirlenmesi gereken katsayıları ifade etmektedir. Çoklu regresyon çözümü, en küçük karesel hatanın elde edilmesinde gerekli olan katsayıların değerlerini ortaya çıkarmaktadır.

Bir yük sistemine ait n-tane yükün konumları sabit olarak kabul ediliyorsa bu metod, n-tane yük tarafından oluşturulan potansiyel çözümün; $n_0 \geq n$ ile n_0 noktalarında arzu edilen potansiyellere mümkün olan en iyi adaptasyonu, simülasyonu yapılacak elektrot yüzeylerinde elde etmek için kullanılabilmektedir (Anis et al,1977). Denklem:(2.1)'de ifade edildiği gibi bu durumda Denklem:(3.26)'nın formu bir referans noktasının potansiyel denklemiyle uyum sağlar. Ayrıca referans noktasının gerçek potansiyeli bağımlı değişken, $Q_1, \dots, Q_n$ yük miktarları ise bağımsız değişkendir. Böylelikle hata fonksiyonuyla ilgili olarak Denklem:(3.3)'de ifade edilen fonksiyon söz konusu olmaktadır. Bu fonksiyon ise Denklem:(3.1)'de belirtilen integral biçimi yerine elektrot yüzeylerinin n_0 -referans noktaları üzerinden ortaya çıkarılan bir toplam ile yer değiştirebilir:

$$F_q = \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n_0} \left(\Phi_{\text{gerçek}_i} - \Phi_{\text{istenen}_i} \right)^2 = \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n_0} \left(\left(\sum_{j=1}^n P_{ij} Q_j \right) - \Phi_{\text{istenen}_i} \right)^2 \quad (3.27)$$

Regresyon analizi Denklem:(3.27)'deki F için en küçük değeri veya bu denklemin karesel toplamının bir minimumunu belirler. Eğer $Q_1 \dots Q_n$ bağımsız değişkenlerine göre F -fonksiyonunun ilk kısmi çıkarımları kayboluyorsa , yani ;

$$\frac{\delta F_q}{\delta Q_j} = 0, \quad j = 1, \dots, n \quad (3.28)$$

veya

$$\sum_{i=1}^{n_0} \left(\left(\sum_{j=1}^n P_{ij} Q_j \right) - \Phi_{istenen_i} \right) \cdot P_{ij} = 0 \quad (3.29)$$

ise , (3.28) veya (3.29) denklemlerinden elde edilen ilk kısmi ifadelerle göre ortaya çıkan bu n -tane denklem regresyon denklemleri olarak ifade edilir ve aşağıdaki gibi matris formunda yazılabilir :

$$(D) (Q) = (f) \quad (3.30)$$

n_0 -referans noktalarının istenen potansiyellerinin $n_0 \times 1$ matrisi olarak $(\Phi_{istenen})$ ile ve $n_0 \times n$ potansiyel katsayı matrisi olarak (P) ile birlikte, potansiyel katsayıların bilgi matrisi olarak ifade edilen $n \times n$ -simetrik matrisi (D) , Denklem:(3.31)'in yardımıyla elde edilebilir :

$$(D) = (P)^T (P) \quad (3.31)$$

$n \times 1$ sütun vektörü (f) ; Denklem:(3.32)'e göre hesaplanır :

$$(f) = (P)^T (\Phi_{istenen}) \quad (3.32)$$

Bundan sonra aşağıdaki gibi bağımsız değişkenlere (Q) göre çözüm ortaya çıkar :

$$(Q) = (D)^{-1} (f) \quad (3.33)$$

Böylelikle regresyon analizindeki esas hesaplama operasyonu , potansiyel katsayılara ait bilgi matrisinin (D) hesaplanmasından ve tersinin alınmasından ibarettir. Bu matrisin tersinin alınması aynı büyüklükte ancak simetrik olmayan matrislerin (Selder,1973) tersinin alınmasından, simetrililikten dolayı yaklaşık olarak yarısı kadar az bir çalışmayı gerektirmektedir. Örneğin konvansiyonel eşdeğer yük metodunun potansiyel katsayı matrisi gibi. Regresyon çözümünün kararlılığı ve doğruluğu potansiyel katsayılara ait bilgi matrisine (D) bağlıdır. Bu çözüm eşdeğer yüklerin konumundan referans noktalarına kadar, konvansiyonel eşdeğer yük metodundaki gibi benzer tarzda tesbit edilmektedir. Burada her yükün belirli bir kenar noktaya tertibinin çözülmesiyle ilgili olarak ve konvansiyonel eşdeğer yük metodu için karakteristik olan kuvvetli bir bağıntı sözkonusu değildir.

n_0 -referans noktalarıyla birlikte eşpotansiyel yüzeylerle iyi koordine edilmiş bir yük sistemi iyi ve kararlı bir çözüm için şarttır. Bundan dolayı bu çalışmada regresyon analizi Fletcher algoritmasıyla bir minimizasyona bağlı olarak simülasyon hatalarının dengelenmesi için ve genişletilmiş bir minimizasyon için düşünülmüştür. Bunu yaparken yüklerin elektrot yüzeylerine iyi tertiblenmesi sağlanmalıdır.

Regresyonun kullanılması iteratif bir işlevde söz konusudur. Burada istenen potansiyel vektör yerine ($\Phi_{istenen}$) Denklem:(3.32)'deki potansiyel fark vektörü kullanılmaktadır $[(d\Phi) = (\Phi_{istenen}) - (\Phi_{gercek})]$.

Sonra Denklem:(3.33) için (Q) -yük vektörü yerine bir yük değişim vektörü ortaya çıkar ki bu vektör önceki yük vektörüne ilave edilir ve bu suretle gerçek potansiyelin yeniden hesaplanması için yükler, yeni hesaplama akışı için referans noktalarda elde edilir. Eğer hususi gözlemlerin, regresyon hesabında aynı ehemmiyetle dikkate alınmaları istenmezse her gözlem için W_i ehemmiyet faktörünün dağıtılması mümkün olur. Bu durum simülasyon problemine tatbik edildiğinde (3.34) bağıntısıyla Denklem:(3.27)'de ki F_q - hata fonksiyonunun yer değiştirmesiyle aynı anlama gelir.

$$F_q = \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n_0} \left(\sum_{j=1}^n P_{ij} Q_j - \Phi_{istenen_i} \right)^2 W_i \quad (3.34)$$

Buna göre n_0 tane ehemmiyet faktörünü ihtiva eden diagonal (W) matrisiyle birlikte (D) matrisinin hesaplanması için (3.35) bağıntısı

$$(D) = (P)^T (W) (P) \quad (3.35)$$

Denklem:(3.31) yerine ve sütun vektörü için (f) , (3.36) bağıntısı

$$(f) = (P)^T (W) (\Phi_{istenen}) \quad (3.36)$$

Denklem:(3.32) yerine ortaya çıkmaktadır. Elektrik alan şiddeti açısından simülasyonu yapılan potansiyel yüzeylerde sivri uçların ortaya çıkmasından mümkün mertebe kaçınılması gerektiği düşünülürse o zaman elektrot yüzeylerindeki potansiyel simülasyon hatalarında bir dengenin arzu edilen değerde olması gerekmektedir. Bu hedef, regresyon hesabı yardımıyla daha kolay elde edilebilir. Buna göre regresyon hesabı potansiyel simülasyon hatalarının (F_q) dengelenmesi için ve geniş bir minimizasyon için kullanılmaktadır. Öyleyse elektrik alan optimizasyon probleminin incelenmesi sırasında da regresyondan yararlanılmaktadır.

3.3.Elektrot Sistemlerinin Tam Simülasyonu Amacıyla Minimizasyon

Problemlerinin Kullanımı:

3.3.1.Optimal Eşdeğer Yük Sistemlerinin Ortaya Çıkarılması İçin Algoritmaların

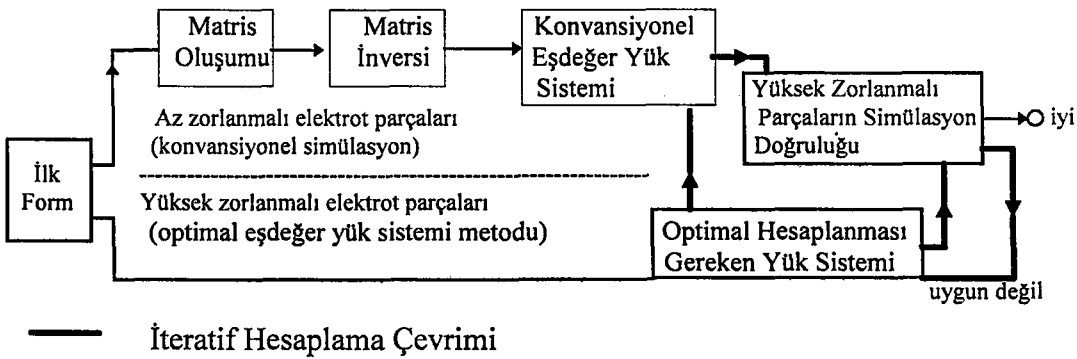
Pratik Kullanım İmkanları:

Elektrot kenarlarının tam bir simülasyonunda gerekli olduğu gibi optimal eşdeğer yük sistemlerinin ortaya çıkarılması amacıyla Fletcher algoritmasının kullanımının en büyük faydası bu metodun güvenilir bir şekilde yakınsamasıdır. Bu ise ancak yüksek bir hesaplama zamanıyla elde edilir. Eşdeğer yüklerin optimal yerleşiminin bilinmemesine

dayanarak şimdiye kadar az sayıda yüklerle simülasyonu yapılan potansiyel alanların küçük bir kısmına bölünebilen elektrot konfigürasyonlarını daha doğru ve daha az bir çalışmayla ifade edebilmek bu metotla mümkün olabilmektedir.

Elektrotların formuna veya sistemin büyüklüğüne dayanarak simülasyonu yapılacak elektrot tertibleri sadece büyük sayıdaki potansiyel alanlar yardımıyla ifade edilebilirse o zaman bu metot büyük bir hesaplama zamanını gerektirecektir. Artan bağımsız değişken sayısı, Fletcher algoritması için gerekli iterasyon adımlarının da sayısı orantılı artmaktadır (Beightler et al,1979). Ayrıca her adım için gerekli hesaplama operasyonlarının sayısı da yükselmektedir. Bu yüzden ortaya çıkarılması gerekli olan yüklerin sayısı ne kadar çoksa hesaplama zamanı da bu oranda artmaktadır. Çünkü bu yükler bağımsız değişkenlerin sayısı için bir ölçü olmaktadır.

Buna göre optimal eşdeğer yük sistemlerinin kullanımının, yüksek zorlanmalı elektrot sahalarının simülasyonu üzerine sınırlandırılması pratik bir çözüm imkanını ifade etmektedir. Böyle bir işlev kısmi çözümlerin üst üste gelmesine dayanarak uygulanan çözüm metodu yardımıyla mümkün olmaktadır ve Şekil:(3.5)'de verilen yapısal olarak uygun bir ifadeyi ortaya çıkarmaktadır. Bu ifade Metz'e (1979) göre Şekil:(1)'de verilen yapıya benzerdir.



Şekil:3.5 Optimal Eşdeğer Yük Sistemi Yardımıyla Yüksek Zorlanmalı Elektrotlarla İlgili Sınırlı Simülasyon.

Elektrot sisteminin az zorlanmalı parçaları, kenar noktaları ve katsayı matrisi; düzenlenen ve inversi alınan eşdeğer yüklerle konvansiyonel olarak simülasyonu yapılır. Daha sonra simülasyonu yapılacak yüksek zorlanmalı sahalara hesaplama akışı içinde miktar ve konuma uygun olarak optimizasyonu yapılacak bir yük sistemi tertiblenir. Her iki yük sistemi üst üste gelerek elektrot hacmindeki potansiyel ve alan şiddetini ortaya çıkarır. Bu yapı hem konvansiyonel hem de optimal eşdeğer yük sistemlerinin avantajlarından istifade etmek suretiyle bir elektrot sisteminde tam simülasyonun pratik kullanımı amacıyla bir yol açmaktadır.

Az zorlanmalı elektrot parçalarında simülasyonun doğruluğuna yüksek bir gereksinim olmadığı için buralarda problemsiz konvansiyonel bir simülasyon yapılabilir. Buna göre bu tür sahalarda yük sayısının artırılması gerekli değildir. Bu durum yükler ve kenar noktalar arasında mantıklı tertibler ortaya çıkarmaktadır. Böylece konvansiyonel eşdeğer yük metodunun az zaman alan hesaplama operasyonunun getirdiği avantajdan mümkün olduğu kadar geniş ölçüde yararlanılabilir. Konvansiyonel olarak simülasyonu yapılacak sahadaki kenar noktalarının ve eşdeğer yüklerin sayısı, eşdeğer yük metotlu normal elektrik alan hesaplamasına nisbetle azaltılmış ve simülasyonu daha doğru yapılması gereken kritik sahalara yerleştirilmiş olmaktadır.

Katsayı matrisindeki elemanların sayısı kenar nokta sayısına karesel olarak bağlı olduğu için bilgisayardaki veri kaydetme hacminden de önemli ölçüde tasarruf sağlanmış olmaktadır. Keza kritik sahaların simülasyonu için yüklerin düzenlenmesi amacıyla öngörülmesi gereken bölgeler, yük sistemlerinin ayrı incelenmesi suretiyle kritik olmayan sahaların simülasyonu amacıyla yüklerin düzenlenmesi için kullanılabilir. Bu durum Fletcher algoritmasını hatta uygun olmayan şartlar altında hata fonksiyonunun minimizasyonunu yerine getirdiği için imkan dahilinde olmaktadır.

Böylece konvansiyonel olarak simülasyonu yapılacak sahalalar için yük sistemlerinin ayrı incelenmesiyle simülasyon doğruluğunu yükseltmek mümkün olmaktadır. Özellikle kritik bir alanda sınır teşkil eden kenarlar kritik sahaların simülasyonunun doğruluğu üzerine iyi bir etkiye sahip olma avantajından yararlanabilirler. Öyleyse iki ayrı yük sisteminin yardımıyla bir sistemin bu tarz simülasyonun; kendisiyle birlikte denklem

sistemlerinin oluşumu sırasında, problemde göz önüne alınması gereken değişiklikleri meydana getirdiğine dikkat edilmesi gerekir. Bu değişiklikler Metz'in (1979) alan optimizasyon metodunda ifade edilen denklem değişikliklerine benzerler ve bu yüzden burada sadece kısa olarak incelenecektir :

- Konvansiyonel eşdeğer yük sistemlerinin hesaplanmasında her kenar noktanın potansiyel şartının optimal hesaplanacak yük sistemi sayesinde kenar noktada ortaya çıkan potansiyel için azaltılması gerektiği gözönüne alınmalıdır,
- Hesaplanacak optimal yük sisteminin muhtemelen mevcut olan dielektrik sınır katlarının sınır katı şartına olan etkisi aynı şekilde denklem sisteminin yapılandırılması sırasında da gözönüne alınmalıdır,
- Kritik sahaların tam simülasyonu amacıyla minimize edilmesi gereken hata fonksiyonunun yapılandırılmasında her referans noktasının hesaplamaya girmiş arzu edilen potansiyeli, konvansiyonel eşdeğer yük sistemiyle incelenen referans noktasında ortaya çıkan potansiyel kısma indirgenmelidir.

3.3.2.Optimal Eşdeğer Yüklerin Ortaya Çıkarılması Amacıyla Fletcher Algoritmasının Kullanımındaki Stratejiler

Fletcher algoritması yardımıyla hem konum hemde miktar bakımından uygun optimal eşdeğer yüklerin ortaya çıkarılması gerçekleştirilir. Optimal ortaya çıkarılması gereken parametrelerin Fletcher algoritmasına uyarlanış tarzı ve çeşidi sayesinde birbirinden ayrılan farklı stratejiler kullanılmaktadır.

n-tane sabit yük sayısından hareket edilirse o zaman yüklerin optimal miktarının ve optimal konumunun ortaya çıkarılması için ilk önce tüm parametrelere göre eş zamanlı iterasyon uygun olmaktadır. Ayrıca herhangi bir değerliğe sahip olmayan bir yükün optimal durumunu bulmak ne fiziksel nede matematiksel olarak uygun olduğu için hesaplamanın başlangıcında yük miktarlarının başlangıç değerleri sıfıra eşit olmaksızın verilmesi gerektiğine dikkat edilmelidir.Bu işlev için büyük başlangıç yük değerleri yeterli olmaktadır.

Bölüm:(3.2.1.1)'de belirtilen dörtgen veya eliptik sınırlamaların kullanılmasıyla yapılan elektrik alan hesaplaması için bu strateji; Fletcher algoritmasının, eşdeğer yüklerin üç katı büyüklüğündeki bir miktar bağımsız değişkenle hesaplama yaptığını ifade etmektedir. Sabit değerli yüklerin optimal konumlarını ortaya çıkarmak için başlangıç değeri olarak sıfırla hesaplama yapılacak şekilde ilk önce Fletcher algoritması yardımıyla sabit koordinatlara yük miktarlarını yerleştirmek de mümkündür. Sonra bu hesaplama birçok kere tekrarlanabilir. Bu durumda maksimum olarak yüklerin sayısının iki katı olan bir miktar bağımsız değişkenle Fletcher algoritması içinde alan hesaplaması yapılır.

Şekil:(3.4)'de ifade edilen bir boyuta indirgenmiş sınırlama formu kullanılırsa bağımsız değişkenlerin sayısı bu yüklerin miktarlarının ve konumlarının ayrı incelenmesi durumunda yüklerin sayısına azaltılabilmektedir. Fletcher algoritmasında bulunan bağımsız değişkenlerin sayısının indirgenmesi, hesaplama için gerekli çalışmanın azaltılmasına sebebiyet verebilir. Diğer taraftan bağımsız değişkenlerin sayısının azaltılmasını savunan stratejiler yüklerin optimal konumlarına ve miktarlarına göre araştırılmasında serbest hacmin sınırlandırılmasını ifade etmektedir.

Optimal olarak ortaya çıkarılması istenen yüklerin tesbit edilen miktarından hareket etme stratejisi simülasyonun istenen doğruluğu için bu miktarın yeterli olmasını şart koşturmaktadır. Bu problem hesaplama stratejisi içinde yeni yüklerin ilave edilme ihtimalinin göz önüne alınmasıyla çözülebilir. Bu suretle hem hesaplamanın başlangıcında dahil olan yüklerin sayısının yükselmesinden hemde yeni yükleri eklemek için hesaplama akışının kesilmesinden kaçınılabılır. Hesaplama akışı içinde yeni yüklerin ilave edilmesi çeşitli tarzlarda yapılabilmektedir. Yeni ilave edilmesi gereken yükler örneğin mevcut sınırlama hacimlerinin orta noktalarına yerleştirilebilmektedir. Çünkü bu hacimler önceki hesaplama akışı içinde başlangıç yüklerinin konumunun değiştirilmesiyle yüksüz olabilirler. Hususi koordinatlara ve sınırlamalara sahip olan ve yardımcı sistem olarak başlangıçta öngörülen tamamen yeni bir yük sistemi dahi kullanılabilmektedir.

Fletcher algoritmasında diğer bütün hesaplama büyüklükleriyle bağıntılı olan mevcut hata fonksiyonu değerinin değişmesine sebebiyet vermemek için bütün durumlarda,

hesaplama akışı içinde yeni ilave edilmesi gereken yüklerin sıfıra eşit olan başlangıç miktarlarına sahip olması gerektiğine dikkat edilmelidir. Yeni ilave edilen yüklerin toplamının büyük bir yapılanmasından sonra bu yüklerin koordinatları bağımsız değişken olarak hesaba dahil olabilirler.



4.ELEKTROT KENARLARININ BİÇİMİNİN DEĞİŞTİRİLMESİ ÜZERİNDEN ELEKTRİK ALAN OPTİMİZASYONU

4.1.Elektrik Alan Optimizasyonu İçin Düşünceler

Bilindiği gibi elektrotların üzerindeki alan şiddeti değerlerinin azaltılması elektrotlar arasındaki aralıkların büyütülmesiyle elde edilebilir. Ancak bu çözüm yolu hem teknik olarak hemde fiyat açısından amaca uygun olmamaktadır. Çünkü genellikle delinme gerilimi elektrot açıklıklarıyla az orantılı olarak artar, ayrıca enerji besleme yoğunluğunun devamlı artışı ve bununla bağlantılı hacimsel sıkışıklık açısından bu tarz bir çözüm uygun değildir. Bu sebepten dolayı mevcut elektrik alan hacminden optimal faydalanma genel kabul görmüş bir çözüm imkanını ifade etmektedir. Ancak bu çözüm yolu elektrot kenarları, üzerlerinde arzu edilen elektrik alan şiddeti dağılımı meydana getirilebilecek şekilde biçimlendirildikleri takdirde elde edilebilir. Elektrot formlarının bu tarz hesaplanması amacıyla kullanılan metotlar elektrik alan optimizasyon metotları olarak ifade edilmektedir.

Bu çalışmadaki diğer incelemeler için hacimsel yüksüz elektrik alan hacmi, alan optimizasyonuna dayanmaktadır. Elektrik alan hacminde hacimsel yüklerin bulunmayışı geniş ölçüde, SF₆ tesislerinin normal işletme şartlarına tekabül eder ve bu tesislerde ön deşarjlardan kaçınma şeklindeki genel taleple uyum halindedir. Ön deşarjlar bu yarı homojen donanımlarda hem izolasyon gazını ayrıştırırlar hemde iyonizasyon katsayılarının dik karakteristiğinden dolayı direkt olarak bir delinmeye sebebiyet verirler.

Buna göre alan optimizasyonunun hedefi, kenarların biçiminin değiştirilmesi üzerinden kendi yüzeyleri üstünde sabit bir elektrik alan şiddeti dağılımına izin veren elektrot biçimlerini meydana getirmektir. Bu durumda hacimsel yüksüz alan hacminin kullanımı optimal olduğu için mümkün olan sabit alan şiddeti dağılımlarının minimumu talep edilebilmektedir. Optimizasyon hesabının hedefi, imalat tekniği açısından elektrotların fiyat bakımından uygun olarak imal edilmesine imkan vermektir (Metz,1979). Bu görüş yüksek alan şiddeti zorlanmalı ve mümkün mertebe küçük bir saha için geçerlidir.Çünkü

Eğer optimizasyon, kritik alan şiddeti değerine sahip elektrotların bu kısmi sahaları üzerine sınırlandırılırsa, bir taraftan alan hacmini optimal kullanan ve diğer taraftan basit olarak imal edilebilen elektrot formlarının bulunması kolaylaşır. Böylelikle kritik olmayan elektrot bölümlerinde geniş ölçüde basit geometriler kullanılabilir. Elektrot sistemlerinin optimizasyonu için elektrotlardaki ve elektrot hacmindeki potansiyel ve alan şiddeti dağılımının bilinmesi esastır. Bölüm:(1.2.1)'de ifade edilen nümerik elektrik alan hesaplama metotlarından eşdeğer yük metodu, diğer nümerik metotlara kıyasen relatif az bir hesaplama zamanı ve düşük veri depolama ihtiyacı ile aynı doğrulukta çalıştığı için elektrik alan optimizasyonu için en iyi metottur.

Hem fark metodunun hemde sonlu elemanlar metodunun gerekli hesaplama stabilitesi açısından elektrot tertiplerinin optimizasyonu için elverişli olmayan özelliklere sahip oldukları da ayrı bir önem taşımaktadır. Sonlu elemanlar ve fark metodunda, potansiyel ve gradyan değerlerinin doğruluğunun alan sahasının sınırlandırılmasına bağlı olması nedeniyle önceden verilen sınır değerler için elektrot tertiplerinin optimizasyonunda zorluklar söz konusu olmaktadır. Elektriki sınır değerlerin dikkate alınmasıyla hedef büyüklük olarak bir elektrot kenarının incelendiği bir optimizasyon problemi, sınırlandırmanın devamlı bir değişimini gerektirmektedir. Bu suretle iteratif bir optimizasyon algoritması için mantıklı hiçbir yakınsaklık kriteri verilmemektedir (Andersen,1981). Bu yüzden elektrot sistemlerinin optimizasyonu amacıyla elektrot ara hacminde ve elektrotlar üzerinde potansiyel ve alan şiddeti dağılımını hesaplamak için eşdeğer yük metodu kullanılır. Ayrıca optimal eşdeğer yük sistemlerine ait yeni geliştirilen metot, kullanımı optimizasyon akışı içinde mümkünse ve yakınsaklık güvenilirliği için uygunsa kullanılabilir.

Burada gözönüne alınan elektrik alan problemindeki hedef büyüklük, mümkün mertebe minimum sabit alan şiddeti dağılımına sahip olan bir elektrot kenarıdır. Bu hedef, adım adım elektrot konfigürasyonunun değişimini öngören bir strateji yardımıyla elde edilebilir. Bundan dolayı ilk önce, söz konusu olan elektrik alanın geometrik özellikleri incelenmelidir.

4.2.Elektrostatik, Hacimsel Yük İçermeyen Elektrik Alanın Geometrik Özellikleri

Alan optimizasyonu hacimsel yüksüz elektrostatik bir alana dayanmaktadır. Böylelikle homojen isotrop ortamlarda aşağıdaki bilinen denklemler geçerli olmaktadır (Kupfmüller,1968; Wollf,1968):

$$\vec{\Theta} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (4.1)$$

$$\text{div } \vec{\Theta} = 0 \quad (4.2)$$

$$\text{Rot } \vec{E} = 0 \quad (4.3)$$

Ayrıca sınır şartları da şu şekildedir:

$$\text{Rot } \vec{E} = 0 \quad (4.4)$$

$$\text{Div } \vec{\Theta} = \rho_F \quad (4.5)$$

Elektrik alanın rotasyonsuzluğundan (Denklem:4.3) elektrik alan şiddetinin potansiyele ait gradyan alan olduğu ortaya çıkmaktadır:

$$\vec{E} = - \text{grad } \Phi \quad (4.6)$$

Böylece homojen isotrop maddeler için Denklem:(4.2)'e göre hacimsel yük bulunmayışından dolayı Laplace diferansiyel denkleminin ifade ettiği elektrik alan Denklem:(4.7) olmaktadır :

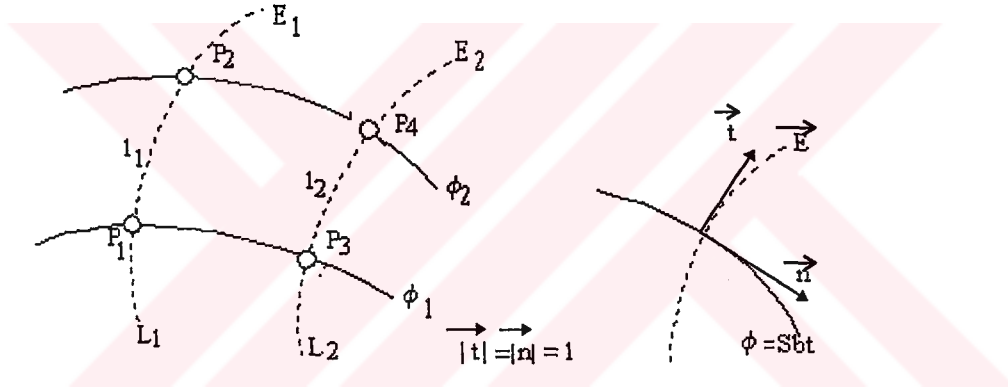
$$\Delta \Phi = \text{div grad } \Phi = 0 \quad (4.7)$$

Geometrik ve elektrik büyüklükler arasındaki önemli bağıntılar Spielrein tarafından

çıkarılmıştır (Spielrein,1915; Spielrein,1917). Bu bağıntılar Singer'in (Singer et al,1975; Singer,1979; Klement et al,1980) optimizasyon metodunun esasını ifade etmektedir ve Metz (1979) tarafından bir araya getirilmiş ve araştırılmıştır. Aşağıda kısaca alan optimizasyonu için önemli bağıntılara değinilmektedir.

4.2.1.Eşpotansiyel Bir Hat Boyunca Elektrik Alan Şiddetinin Relatif Değişiminin, Ayrılan Alan Çizgisinin Kıvrımıyla Olan İlişkisi

Elektrik alan rotasyonsuzluğuna dayanarak (Denklem:4.3) komşu iki alan çizgisinin (l_1, l_2) ve alan çizgisine ortogonal Φ_1 veya Φ_2 potansiyelli iki eşpotansiyel çizginin (Şekil:4.1) incelenmesinde,



Şekil:4.1 Salınımsız Elektrik Alan.

aşağıdaki çizgisel integral geçerlidir :

$$\int_{P_1}^{P_2} \vec{E}_1 \cdot d\vec{l}_1 = \int_{P_3}^{P_4} \vec{E}_2 \cdot d\vec{l}_2 \quad (4.8)$$

$[P_1, P_2]$ ve $[P_3, P_4]$ aralığındaki E_1 veya E_2 yaklaşık olarak sabit kabul edilebilecek şekilde l_1 ve l_2 uzunlukları küçükse Denklem:(4.9) ve (4.10) geçerli olur :

$$E_1 l_1 = E_2 l_2 \quad (4.9)$$

ve

$$\frac{E_2 - E_1}{E_1 + E_2} = \frac{l_1 - l_2}{l_1 + l_2} \quad (4.10)$$

Her iki alan çizgisinin $\frac{1}{2} \overline{P_1 P_3} = \frac{1}{2} \delta_n$ yarı aralığıyla, Denklem:(4.10)'daki her iki payda çarpılırsa o zaman (4.11) bağıntısı ortaya çıkar :

$$\frac{E_2 - E_1}{\frac{1}{2}(E_1 + E_2)\delta_n} = \frac{l_1 - l_2}{\frac{1}{2}(l_1 + l_2)\delta_n} \quad (4.11)$$

δ_n kafi derecede küçükse, E_1 ve E_2 sadece az ölçüde birbirinden ve ortalama alan şiddetinden farklı olur $[E = \frac{1}{2} (E_1 + E_2)]$. (4.11)-Bağıntısının sol tarafı, eşpotansiyel hattın doğrultusunda yaklaşık bir uzunluk birimi kadar kaymadaki relatif artışa eşit olur [O halde $\frac{1}{E} \frac{\delta E}{\delta n}$ 'e eşit] .

(4.11)-Bağıntısının sağ tarafı, yayılmış P_1, P_2, P_3, P_4 yüzeylerine l_1 ve l_2 kıvrım uzunluklarının farkının oranına yaklaşık olarak eşit olur. Bu oran her iki dairesel kıvrımların $(\overline{P_1 P_2}$ ve $\overline{P_3 P_4})$ ortalama yarıçapına karşılık gelir (Spielrein,1915).

Bu ortalama yarıçap yaklaşık olarak alan çizgisinin kıvrılma dairesinin yarıçapına eşit yapılırsa (ki bu dairenin karşılıklı değeri “k “ , alan çizgisinin kıvrımını ifade eder) o zaman Denklem:(4.12) elde edilir :

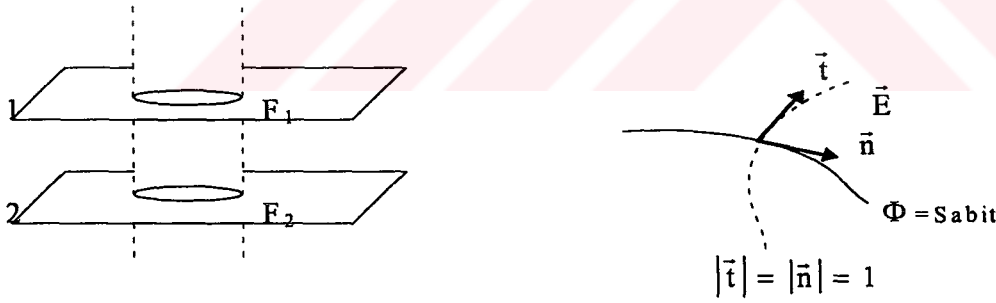
$$\frac{1}{2} \frac{\delta E}{\delta n} = k \quad (4.12)$$

Bir eşpotansiyel alandaki elektrik alan şiddetinin relatif değişimi rotasyonsuz alanın her noktasında bu noktadan geçen alan çizgisinin kıvrımıyla tam olarak tesbit edilir. Ancak bütün alan çizgilerinin yüzeyle kendi kesim noktalarında sıfır kıvrıma sahip olması halinde alan şiddeti eşpotansiyel yüzeyde sabit kalabilir. Eşpotansiyel çizgi boyunca sabit alan şiddetiyle ilgili olan bir optimizasyon için Denklem:4.13 gereklidir :

$$\frac{\delta E}{\delta n} = 0 \quad (4.13)$$

4.2.2.Elektrik Alan Hattı Boyunca Alan Şiddeti Miktarının Değişimiyle Eşpotansiyel Yüzeylerin Ortalama Kıvrımının İlişkisi

Şekil:(4.2) komşu iki ortogonal yüzeyle (1 ve 2) sınırlanan ve alan çizgileri tarafından oluşturulan kuvvet kanalını göstermektedir.



Şekil:4.2 Ortogonal Yüzeyli Alan Çizgilerinden Oluşan Kuvvet Kanalları

Eşpotansiyel yüzey şartına göre ortogonal yüzeylerin düzlemlerindeki kesitler F_1 ve F_2 yüzeylerine ve bu kesitler üstündeki alan şiddetleri E_1 ve E_2 değerlerine sahiptir. Kuvvet kanallarındaki akış elektrik alanının kaynaksızlığına dayanarak sabit olmakta ve böylelikle (4.14) veya (4.15) bağıntıları geçerlilik kazanmaktadır.

$$E_1 F_1 = E_2 F_2 \quad (4.14)$$

veya

$$\left(\frac{E_1 - E_2}{E_1 + E_2} \right) = \left(\frac{F_2 - F_1}{F_1 + F_2} \right) \quad (4.15)$$

Ortogonal yüzeylerin yarı aralığıyla $\left(\frac{1}{2} \delta_t \right)$ çarpımından sonra (4.16) bağıntısı elde edilir:

$$\frac{E_2 - E_1}{\frac{1}{2}(E_1 + E_2)\delta_t} = \frac{F_2 - F_1}{\frac{1}{2}(F_1 + F_2)\delta_t} \quad (4.16)$$

(4.16) bağıntısının sol tarafı alan çizgisinin eğimi doğrultusunda birim uzunluk kadar kaydırılmasıyla alan şiddetinin relatif azalmasına, yani $-\frac{1}{E} \frac{\delta E}{\delta t}$ 'e eşit olmaktadır.

(4.16) bağıntısının sağ tarafı yaklaşık $(F_2 - F_1)$ farkının, alan kanallarının ortogonal yüzeyleri tarafından çevrilmiş hacimlere oranını ifade etmektedir. Bu da ortogonal yüzeyin ortalama kıvrımına (h) karşılık gelmektedir (Spielrein, 1915).

$$\frac{1}{E} \frac{\delta E}{\delta t} = -h \quad (4.17)$$

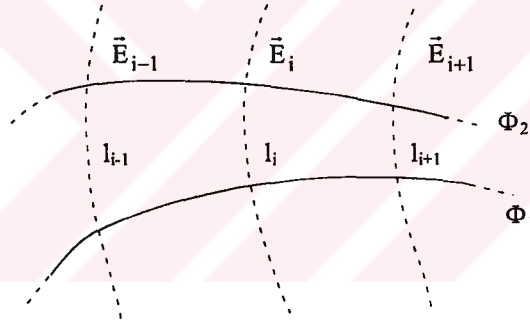
Bilindiği gibi, bir yüzeyin ortalama kıvrımı birbirine dik iki normal kesitin kıvrımının cebirsel toplamını ifade etmektedir.

$$h = \frac{1}{r_1} \pm \frac{1}{r_2} \quad (4.18)$$

Bir eğrinin kıvrımı daima pozitiftir, diğer taraftan bir yüzeyin ortalama kıvrımı pozitif veya negatif olabilir. Denklem:(4.17)'den normal yüzeyli ve kaynaksız bir alan içindeki alan çizgisi boyunca alan şiddetinin relatif değişiminin tamamiyle ortogonal yüzeylerin ortalama kıvrımıyla tesbit edildiği açıkça bilinebilmektedir. Ortogonal yüzeyler sıfır ortalama kıvrıma sahip oldukça, alan çizgileri boyunca alan şiddeti sabit olur. Zincir yüzeyi gibi dönel yüzeyler dahi ortalama sıfır kıvrıma sahip olabilirler.

4.3.Alan Optimizasyonu Amacıyla Bir Potansiyel Tertip

Alan optimizasyonunda, normal tarzda alan hacminde biçimlendirilmesi gereken elektrot konumunun arzu edilen optimal biçime yakın bulunması kabulünden hareket edilmektedir. Öyleki, elektrodun direkt komşu çevredeki alan şekli, optimizasyon tarafından pratik olarak etkilenmemelidir.



Şekil:4.3 Salınımsız Alanın Yanyana Bulunan Eşpotansiyel İki Çizgisi

Φ_1 ve Φ_2 potansiyelli birbirine yakın bulunan iki eşpotansiyel çizgi Şekil:(4.3)'e göre önce metalle kaplanmış eşpotansiyel yüzeyler olarak incelenir. n_0 referans noktalarıyla ayrılmış her iki eşpotansiyel yüzeyler arasındaki aralıkların küçük kalması kabulüyle (her iki yüzey arasındaki her alan çizgisi boyunca elektrik alan şiddeti sabit olarak kabul edilebilecek şekilde) Denklem:(4.19) geçerli olmaktadır.

$$|E_i \cdot l_i| = |E_{ref} \cdot l_{ref}| = |\Phi_1 - \Phi_2| = K, \quad i = 1, \dots, n_0 \quad (4.19)$$

Burada E_{ref} , herhangi bir referans noktasının ilgili alan şiddeti miktarıdır ve l_{ref} ise bu alan çizgisinin, incelenen her iki eşpotansiyel yüzey arasındaki uzunluğudur. Halbuki alan optimizasyonu için eşpotansiyel çizgiler arasındaki bu dar sahada ilgili alan şiddeti miktarının sabit değerde bulunması arzu edilir. Ayrıca (Φ_1) - eşpotansiyel yüzeyi, biçimlendirilmesi gereken elektrodu ifade eder, buna karşılık (Φ_2)- eşpotansiyel yüzeyin kendi formunu koruması istenir. Eşpotansiyel yüzey (Φ_1), bütün çizgileri l_{ref} uzunluklarına sahip olacak şekilde biçimlendirilmesi halinde bu alan optimizasyonunun hedefi elde edilmiş olur. Bu durum yeniden oluşturulması gereken yüzeyin (Φ_1) ve (Φ_2)-eşpotansiyel yüzeyin bir paralelliğini ifade etmektedir. O halde optimizasyonu gereken kenarların bütün referans noktaları, bu kenarlardan başlayan alan çizgisi doğrultusunda (4.20)-bağıntısındaki mesafe kadar kaydırılması gereklidir ki ,

$$\Delta l_i = l_i - l_{ref} , i = 1, \dots, n_0 \quad (4.20)$$

bu durum incelenen alan çizgisi üzerinde (4.21) bağıntısındaki potansiyel farkı gerektirir.

$$\Delta \Phi_i = E_i (l_i - l_{ref}) , i = 1, \dots, n_0 \quad (4.21)$$

Bu fark (4.19) denklemiyle ilişkili olarak (4.22) bağıntısındaki gibi ifade edilebilir.

$$\Delta \Phi_i = K \cdot \frac{E_{ref} - E_i}{E_{ref}} , i = 1, \dots, n_0 \quad (4.22)$$

Denklem:(4.22)'deki yaklaşık formül, alan optimizasyonu sırasında gerçek oranlara adapte edilirse, elektrot formlarının değiştirilmesi suretiyle yapılan alan optimizasyonu sonuç elektrodunun referans noktalarındaki potansiyel değişimler ile gerçekleştirilebilir. Somut bir alan optimizasyon probleminde, bilinen gerilim dağılımlarıyla çalışılmaktadır. Elektrotlar arasındaki elektrik alan değişimleri ise Denklem:(4.19)'a

göre basitleştirilmiş bir bağıntıya dayanmamaktadır. Ayrıca, optimizasyonu yapılacak elektrot ile onun çevresi arasında genellikle U-gerilimi olarak karakterize edilen en yüksek potansiyel farkı, optimizasyonu gereken elektrot yüzeyindeki maksimum alan şiddeti değerlerinin ortaya çıkması için ölçüdür. Denklem:(4.22)'deki K - sabitinin U-gerilimiyle yer değiştirmesi donanımın, somut alan optimizasyon problemleri üzerine genelleştirilmesi için uygun olmaktadır. Bununla birlikte elektrotların yeni formlara göre araştırılmasında merkez doğrultuyu ifade eden bir yaklaşım formülü elde edilir. Yeni bir iterasyonun başlangıç elektrot formu olan interpolasyonlu en yeni çözümü elde etmek için, ilk önce bu formül yardımıyla tam bir değişim adımı başarılı olacak şekilde bu düzenlemenin kullanılması uygun olabilir.

Interpolasyonla ilgili büyük hesaplama operasyonlarından kaçınmak için, bağıntının düzenlenmesinde bir gevşeme faktörü (ξ) öngörülebilir. Bu durumda (4.23)- formülü ortaya çıkar :

$$\Delta\Phi_i = \xi \cdot U \cdot \frac{E_{ref} - E_i}{E_{ref}}, \quad i = 1, \dots, n_0 \quad (4.23)$$

ξ için aşağıdaki ampirik olarak elde edilmiş düzenleme uygun olmaktadır.

$$\xi = \frac{\frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n_0} |E_{ref} - E_i|}{E_{max} - E_{min}}, \quad i = 1, \dots, n_0 \quad (4.24)$$

Buradaki E_{max} ve E_{min} , optimizasyonu gereken elektrot yüzeyindeki maksimum veya minimum alan şiddeti değerleridir. Böylece alan dağılım kontrollü bir gevşeme faktörü sözkonusu olur. Bir optimizasyon hesabının başlangıcında sözkonusu olduğu gibi alan şiddeti değerleri arasında büyük sapmalar oluyorsa bu gevşeme faktörü optimizasyon düzenlemesinin zayıflığını ifade etmektedir. Optimizasyonu gereken elektrot üstündeki alan dağılımı ne kadar düzenli ise, optimizasyon düzenindeki gevşeme faktörüyle sebebiyet verilen zayıflama da o kadar az olur. Denklem:(4.23)'e göre optimizasyon -

potansiyel düzenlemesi, optimizasyonu gereken eşpotansiyel yüzeylerin referans noktalarının arzu edilen potansiyeline tekabül eden potansiyel değişimleri ifade eder.

Bu suretle arzu edilen potansiyelin yeni bir eşpotansiyel yüzeyi ortaya çıkar ki, bu yüzeyin alan şiddeti değerleri üst yüzeydeki sabit bir dağılıma daha yakın olmaktadır. Eşdeğer yüklerle alan hesabındaki bu tarz potansiyel değişimleri sadece optimizasyonu gereken elektrodun yük sisteminin değişimleri üzerinden mümkün olur. Böylece potansiyel düzenleme yardımıyla alan optimizasyonu elektrot kenarlarının simülasyonunun özel bir durumunu ifade etmektedir.



5.ELEKTRİK ALANIN OPTİMİZASYON STRATEJİSİ

Alan optimizasyonu ile ilgili strateji potansiyel simülasyon stratejisinden başka bir şey değildir. Bir optimizasyon hesabının başlangıç noktası, uygun olarak ortaya çıkan bir elektrot kenarının elektrik alan hesabıdır. Alan dağılımından potansiyel tertibin yardımıyla potansiyel değişimler hesaplanır. Bu değişimlerin, sonuç olarak ortaya çıkan kenara ait destek noktalarının arzu edilen potansiyeline tekabül etmesi istenir. Bu, cebirsel olarak; sabit olmayan potansiyelli bir hat içine, başlangıç elektrodundaki esas eşpotansiyel hattın dönüştürülmesidir.

Bu suretle arzu edilen potansiyelle ilgili olarak sabit bir alan şiddeti dağılımına daha yakın olması gereken yeni bir kenar oluşturulur. Eğer alan dağılımıyla ilgili olarak istenen sapma kriterleri elde edilmezse, yeni ortaya çıkan bu kenar, sonraki yeni bir hesaplama akışının başlangıç noktası olarak vazife görür. Buna göre gözönüne alınan alan optimizasyon işlevinin her iterasyon adımı, eşdeğer yükler yardımıyla çözülebilen bir potansiyel simülasyon problemini ifade etmektedir. Lineer bir denklem sistemi elde etmek için biçimi değiştirilmesi gereken kenarda bulunan ve hesaba dahil olan noktaların sayısının, optimizasyon sahasında kullanılan yüklerin sayısına indirgenmesi suretiyle yukarıda ifade edilen problem için bir çözüm yolu eşdeğer yük metodunun konvansiyonel hesaplama tarzı yardımıyla bulunabilir.

Yüzey kıvrımlarına ait hesaplamalar sözkonusu olmadığı için, bu tarz bir çözüm daha az bir hesaplama operasyonunu gerektirmektedir. Böylece burada kullanılan potansiyel katsayı matrisine zıt olarak, bir alan katsayı matrisi gerektiren Metz'e (1979) ait metottan daha az hesaplama zamanı ortaya çıkmış olmaktadır. Buna rağmen konvansiyonel çalışma tarzına dayanarak eşdeğer yüklerle yapılandırılmış bir strateji optimal hiçbir çözüm yolunu ifade etmemektedir. İlk olarak, her iterasyon adımında ortaya çıkan eşpotansiyel yüzeyin bütün referans noktaları, hesaplamada gözönüne alınabilmektedir ki, bu durum yüksek bir hesaplama doğruluğu için gereklidir.

İkinci olarak, optimizasyon sahasındaki yük sisteminin, elektrot kenarının hesaplama sırasında değişen formuna doğru olarak adapte edilmesi garanti edilememektedir, bu da hesaplamanın yakınsaklık güvenilirliği için büyük önem taşımaktadır.

Yük sayısını yükseltmeksizin hesaplamaların doğruluğuna ve eşpotansiyel yüzeylere yüklerin güvenilir adaptasyonuna olan talep birbiriyle bağlantılıdır ve sadece minimizasyon algoritmaları yardımıyla optimal olarak ortaya çıkarılmış eşdeğer yük sistemleriyle gerçekleştirilebilir (Bölüm:3'de belirtildiği gibi). Alan optimizasyonu sırasında optimal eşdeğer yük sistemlerinin kullanılma gereksinimi potansiyel düzenlemenin girmesiyle mümkün olmaktadır. Bu amaçla Denklem:(3.1)'e göre elektrot kenarı üzerinden integral alınır. Bu yapılırken $(\Phi_{\text{gerçek}} - \Phi_{\text{istenen}})$ - değeri yerine, potansiyel düzenlemenin yardımıyla hesaplanan $\Delta\Phi$ -potansiyel değişimi kullanılır. Böylelikle optimizasyon algoritmaları vasıtasıyla minimumlaştırılabilen simülasyon hata fonksiyonu (F) elde edilir. Eğer bu F-fonksiyonu yeterli derecede minimize edilmişse, arzu edilen potansiyelle birlikte ortaya çıkan eşpotansiyel yüzey alan hacminde incelenir.

Bu yüzeyin alan dağılımından eşpotansiyel düzenlemenin yardımıyla, yeniden minimize edilmesi gereken bir potansiyel-hata fonksiyonu hesaplanır ve iteratif optimizasyon işlevinin yeni bir hesaplama akışı başlayabilir. Bu işlev, arzu edilen alan dağılımları elde edilinceye kadar tekrarlanır. Buna göre alan optimizasyonu elektrot sistemlerinin tam simülasyonu ile ilgili bir problem olup Fletcher algoritması ve regresyon analizi yardımıyla incelenebilir.

Bir taraftan alan optimizasyonunun özel ifadelerini gözönüne almak ve diğer taraftan optimizasyon hesabını mümkün mertebe az hesaplama operasyonu ile gerçekleştirebilmek için her iki algoritmanın uygulanması alan optimizasyon stratejisi için yeniden düşünülmelidir. Belirli eşpotansiyel yüzeylerden hareket eden potansiyel simülasyon problemlerine zıt olarak, optimizasyonu yapılacak bir elektrodun biçimi, optimizasyonun her adımından sonra tekrar değiştirilmektedir. Bu biçim değiştirme esnasında Bölüm:(3.2.1.1)'de ifade edilen sınırlamalar da gözönüne alınmalıdır. Bu işlev optimizasyon hesabının akışı içinde metalik elektrot bölgelerinde sınırlamaların yerleştirilmesiyle gerçekleştirilir.

Optimizasyonu yapılan elektrot formu konstrüktör tarafından verilen başlangıç elektroduna benzer bulunduğu için birçok optimizasyon probleminde sınırlamaların konumu tahmin edilebilir.

Böylelikle uygun bir sonuç elektrot seçimiyle sınırlama sahalarının eş zamanlı durumu ve biçimi, öngörülen optimizasyon akışı için tesbit edilebilir. Optimizasyonu yapılmış elektrot formunun, başlangıçtaki elektrot formundan uzaklaşma ihtimali mevcutsa sınırlama sahalarının büyüklüğünün, değişen eşpotansiyel yüzeye dinamik adaptasyonu gerçekleştirilebilir.

Sınırlamaların gerekli geometrik değişiklikleri için bilgiler (örneğin; biçimi değiştirilmiş elektrodun arzu edilen potansiyeli) sınırlama sahalarının biçimlerine ait eksenler boyunca potansiyelin kıyaslanmasıyla elde edilebilir. Alan optimizasyon problemi hem minimizasyon algoritmalarının kullanımında hemde en küçük maksimum alan şiddetli bir eşpotansiyel yüzey anlamında optimal elektrot formuna göre incelemede gözönüne alınması gereken özelliklere sahiptir.

5.1.Elektrik Alan Optimizasyon Stratejisi İçinde Minimizasyon Algoritmalarının Kullanımı

Hem alan optimizasyon hesabında hem de Fletcher minimizasyon algoritmasında iteratif metotlar söz konusudur. Alan optimizasyonunda Fletcher algoritmasının sınırlandırılmamış kullanımı, her alan optimizasyon hesabı adımının iteratif incelenmesiyle aynı anlamdadır. Ancak bu durum büyük bir hesaplama operasyonunu gerektirmektedir. Uygun bir hesaplama zamanı açısından alan optimizasyon stratejisinin yapılması sırasında aşağıdaki hususların dikkate alınması uygun olacaktır:

- Yüklerin, optimizasyonu gereken eşpotansiyel yüzeye yerel bir adaptasyonu gerekli oldukça Fletcher algoritmasının kullanılması gerekmektedir. Bu tarz bir gereklilik, yeni ortaya çıkan elektrodun önceki başlangıç formundan uzaklaşması halinde söz konusu olmaktadır. Bu durum sadece ilk optimizasyon adımlarında ortaya çıkmaktadır. Bundan ayrı olarak basit regresyon analizi yardımıyla optimizasyonu gerçekleştirmek amaca daha uygundur.
- Alan optimizasyon akışında minimizasyonu gereken hedef fonksiyon bünyesinde iteratif uygulamadan dolayı teşkil edilmiş potansiyel simülasyon hata fonksiyonu

sözkonusu olmaktadır. Bu yüzden, Fletcher algoritmasının kullanımında minimizasyon sonucu o kadar gerekli değildir. Bu suretle, hesaplamanın yakınsaklık güvenilirliğini korumak için iterasyon adımları optimuma ne kadar yakın olursa bu tarz minimizasyon algoritmaları o kadar yavaş çalıştıkları için birçok iterasyon adımından tasarruf sağlanmış olur.

- Eğer bir alan optimizasyon probleminin başlangıç elektrodunun sadece alan optimizasyonuna katkıda bulunması isteniyorsa ve bu elektrodu tam simüle etmek gerekli değilse, o zaman bu elektrodun kaba bir simülasyonundan hareket edilebilir ve başlangıç elektrodunun tam bir simülasyonu için gerekli olandan daha az yük kullanılabilir. Bu suretle hesaplama operasyonu büyük ölçüde azaltılabilir.

Son olarak ortaya çıkan optimal elektrot formunun doğru olarak simülasyonu yapıldığı için bu hareket tarzı uygun olmaktadır. Bilindiği gibi bu form ancak yüzey sabit bir kıvrıma sahip olduğu sürece sabit alan şiddetine sahip olabilir. Bu tarz yüzey formlarının simülasyonunda hiçbir yük yoğunlaştırması gerekli değildir, yani simülasyon az miktardaki yüklerle de yeterli olabilmektedir (konvansiyonel eşdeğer yük metodundan da bilindiği gibi).

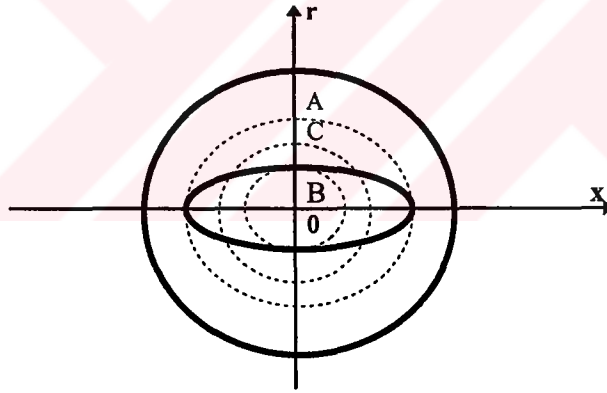
Bir alan optimizasyon stratejisinin yapılanmasında yukarıda açıklanan hususların dikkate alınması hem güvenilir yakınsamaya hemde az sayıda operasyon gerektiren bir optimizasyon hesabına imkan verir.

5.2.Sabit Ve Minimum Alan Şiddeti İçin Kriter

Bölüm:(4.3)'deki potansiyel düzenleme, bir elektrot üzerindeki sabit bir alan dağılımını optimizasyon hedefi olarak vermektedir. Uygun olarak ortaya çıkan başlangıç elektrodunun kenarından hareket edilerek, hesaplama akışı içinde potansiyel değişimlerin belirlenmesi amacıyla seçilen referans alan şiddeti değerine göre farklı olarak optimizasyonu yapılmış elektrot formlarını meydana getirmek mümkün olmaktadır.

Bir elektrot optimizasyonu sırasında, genellikle bir elektrot üstünde minimum sabit alan dağılımı aranır. Optimizasyon stratejisi içinde bu durum, referans alan şiddeti değerinin özel bir seçimini ifade etmektedir. Ayrıntılı bir anlatım için ilk önce, Şekil:(5)'de gösterilen küre içindeki bir elipsoidin optimizasyonu örneğindeki gibi toplam elektrot kenarlarının biçiminin değiştirilmesiyle gerçekleştirilen alan optimizasyonu incelenir.

İdeal hesaplama akışı içinde, optimizasyonu yapılacak elektrodun alan dağılımı dahilinde bulunması istenen referans alan şiddeti değerine göre yarıçapı OB ve OA arasında bulunan bir küre optimizasyon sonucu olarak elde edilir. Eğer maksimum ve minimum alan şiddeti referans alan şiddeti olarak kullanılırsa, OA veya OB yarıçaplı küre optimizasyonu yapılan elektrodu ifade etmektedir. İncelenen bu örnekte, dış küreye göre $1/2$ -yarıçap oranlı bir küre elektrotdaki mümkün olan minimum sabit alan dağılımının elde edilmesi amacıyla, optimizasyonu yapılacak kenar referans noktalarının bütün alan şiddeti değerlerinin aritmetik ortalama değeri, uygun referans alan şiddeti değeri olarak verilmektedir.



Şekil:5 Bir Küre Dahilindeki Elipsoid Örneği

----- Optime Edilmiş Elektrotlar

İlk önce miktar sabitliğine dayanarak optimizasyonu yapılan başka bir elektrot elde edilmesine rağmen toplam elektrot kenarının biçiminin değiştirilmesi yardımıyla gerçekleştirilen alan optimizasyonu, mümkün olan minimum alan şiddeti dağılımına göre yapılan incelemede birtakım zorluklar çıkarmaktadır. Örneğin küre dahilindeki

elipsoidin optimizasyonu sırasında (Şekil:5) OA-yarıçaplı küre optimizasyon sonucu olarak oluşturuluyorsa, o zaman büyütülmüş elektrodun daha yüksek alan şiddeti değerlerine sahip olduğu elde edilen bu elektrodun büyütülmesiyle tesbit edilebilir. OA-yarıçaplı küre küçültülürse, bu küre OC-yarıçapını aşmadıkça daha küçük alan şiddetli bir küre ortaya çıkar. Yani alan şiddetinin sabitliğine dayanarak optimizasyonu yapılmış bir elektrot, elektrot üstündeki mümkün olan minimum sabit alan dağılımının incelenmesinde başlangıç kenarı olarak kullanılabilir.

Gerçek alan optimizasyon problemleri örneğin imalat sebeplerinden dolayı alan optimizasyonunun, kritik alan şiddeti değerlerine sahip sahalara sınırlandırılabilmesi suretiyle karakterize edilirler. İlave sınır şartları (hesaplama akışı içinde sabit kenarların ihtiva edilmesiyle ilgili olarak) sabit bir alan şiddeti dağılımının elde edilmesinden sonra tüm elektrodun büyütülmesine veya küçültülmesine izin vermemektedir. Aynı zamanda sabit bir kenar ve potansiyel gözönüne alınırsa alan şiddeti şartı, biçimi değiştirilmiş elektrot kenarından sabit kenara geçişin devamlı olmayacağıyla ilgili olarak fiziksel bir çelişkiye yol açar. Bu yüzden, son sabit kenar noktası ve ilk optimizasyon noktası arasında bir geçiş bölgesi gereklidir. Bu bölge, sabit bir kenar ve sabit bir alan şiddeti şartıyla birleştirici bir görev yapar. Bu bölümün daha ilerisinde geçiş sahaları incelenecektir.

Hızlı bir yakınsaklık için elektrot kenarlarının kısmi sahaları üzerine sınırlı alan optimizasyonunda aşağıdaki hareket tarzının uygun olduğu ortaya çıkmaktadır :

- Önce minimum en yüksek alan şiddetine sahip, mümkün olan en büyük elektrot formu elde edilebilecek tarzda optimizasyon yapılır.

Bu amaçla, maksimum alan şiddeti değeri, potansiyel değişimlerin hesaplanmasında referans alan şiddeti olarak kullanılır. Bu da, Şekil:(5)'deki örnekte, OA-yarıçaplı kürenin meydana getirilmesini sağlar. Büyültme işlevi, muhtemelen mevcut uçların veya kenarların yuvarlatılmasını sağlar. Ayrıca maksimum alan şiddetinin bulunduğu noktanın kıvrılma yarıçapının büyütülmesi de sözkonusu olmaktadır. Bu işlev elektrot üstünde minimum en yüksek alan şiddeti elde edilinceye kadar devam ettirilir.

- Bundan sonra ortalama referans noktaları civarında biçim değiştirme anlamında alan optimizasyonu başlar. Böylelikle büyütülen formdan hareket ederek mümkün olan minimum sabit alan şiddetine sahip elektrot araştırılır.
- Son olarak elde edilen her iki çözümün interpolasyonu ile daha uygun bir formun bu aralıkta bulunup bulunmadığının araştırılması gerekmektedir.

Ortalama referans noktaları civarında elektrodun biçiminin değiştirilmesi sırasında optimizasyonu yapılacak kenar boyunca ortalama aritmetik alan şiddeti değerini, referans elektrik alan şiddeti olarak kabul etmek uygun olmaktadır. Bunu yaparken, sabit kenarlara komşu geçiş sahalarındaki küçük alan şiddeti değerleri, bu ortalama değer hesabına alınmamalıdır. Çünkü bu değerler, mümkün mertebe ekranlama tesirlerine dayanarak ortaya çıkarlar ve bu yüzden ortalama değer oluşumunun eksik olmasına sebebiyet verebilirler.

Buna göre ilk önce, optimizasyonu yapılacak tüm kenarın alan şiddeti ortalama değeri (E_{ort}) hesaplanmaktadır.

$$E_{ort} = \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n_0} E_i \quad (5.1)$$

Burada n_0 , elektrot kenarının referans noktalarının sayısını belirtmektedir.

Denklemler (5.2)'e göre,

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_0} (E_{ort} - E_i)^2}{n_0 - 1}} \quad (5.2)$$

burada ortaya çıkan standard sapmadan (s) referans alan şiddeti değerinin hesaplanmasında; sabit, optimizasyon bölgesine sınırı olan kenar noktadan, alan şiddeti değeri (E_g) Denklem (5.3)'de

$$E_g \geq E_{ort} - s \quad (5.3)$$

ifade edilen şarta uygun olan geçiş sahasındaki kenar noktaya kadarki tüm alan şiddeti değerleri kabul edilmemektedir. Sabit ve optimizasyon hesabında biçimi değiştirilmiş elektrot parçaları arasında devamlı bir geçişi elde etmek için kullanılan her iki minimizasyon algoritmasının her biri için ampirik düzenleme geliştirilmiştir.

- Fletcher algoritmasının düzenlenmesinde, optimizasyon sahasına sınırı bulunan kenar noktalar kendi potansiyeli içinde fiziksel durumlarına uygun olarak değiştirilmezler. Bu noktalara cebirsel anlamda sıfır potansiyel değişimler tertiplenir.

Optimizasyon sahasındaki sabit kenardan hareket ederek alan şiddeti değeri (5.3) şartına uygun olan kenar noktaya kadar lineer bir potansiyel değişimi kullanılır. Bu kenar nokta geçiş sahasının sonu olarak kabul edilir. Ve bu noktaya bir potansiyel değişimi ilave edilir (potansiyel tertibin yardımıyla ortaya çıktığı gibi). Alan optimizasyonunda geçiş sahalarına ait problemin basit olarak incelenmesi Fletcher algoritmasıyla ilişkili yeterli bir çözümü ifade etmektedir. Çünkü bu algoritma uygun olmayan şartlar altında dahi hata fonksiyonunun minimizasyonunu gerçekleştirebilme kabiliyetine sahiptir.

- Regresyon analizi yardımıyla yapılan alan optimizasyonunda optimizasyon hesabını, optimizasyon sahasına sınırı olan sabit kenar noktalar için gerçekleştirmek uygun olmaktadır.

Bu sabit kenar noktalar, hem kendi arzu edilen potansiyellerini hemde kendi konumunu korumak zorunda oldukları için regresyon hesabı sırasında ilk olarak sıfır potansiyel değişimi ilave edilir. İkinci olarak ise, bu durum hesaplama sırasında güvenilirliği daha kuvvetli gözönüne almaktadır. Eğer sadece bu basit kenar noktalara yeterli derecede önem verilirse, bunlara ait potansiyel değişim elde edilebilir ki, bunu yaparken aynı zamanda sabit kenar noktaları ve komşu optimizasyon sahaları arasında devamlı bir geçiş temin edilmiş olur. Böylece regresyon analizi sağlam adapte edilmiş bir çözüm vermiş olmaktadır (komşu kenar noktaların potansiyel şartlarla kıyaslanması).

Bundan dolayı bu çalışma tarzında alan optimizasyonu sırasındaki geçiş sahalarını tanımlama gerekliliği sözkonusu olmamaktadır. Optimizasyon sahasına sınırı olan bu

kenar noktaların ehemmiyeti için (W); referans noktalarının (n_0) sayısının, Denklem:(5.4)'e göre optimizasyon sahasındaki yüklerin sayısına (n) oranı güvenilir bir yakınsaklık için uygun olarak gözükmektedir.

$$W = \frac{n_0}{n} \cdot v \quad (5.4)$$

V değeri 1'den daha büyük veya 1'e eşit olan bir değişkendir. Bu değişken, referans alan şiddetinin (E_{ref}) sınırı olduğu sabit kenar noktadaki (E_f) alan şiddetine oranından Denklem:(5.5) veya Denklem:(5.6) 'ya göre hesaplanabilmektedir.

$$\text{Eğer } E_{ref} \geq E_f \text{ ise } v = \frac{E_{ref}}{E_f} \quad (5.5)$$

$$\text{Eğer } E_{ref} < E_f \text{ ise } v = \frac{E_f}{E_{ref}} \quad (5.6)$$

Böylelikle, Denklem:(5.4)'e göre n_0 - referans noktalarının sayısı yüklerin sayısına kıyasen ne kadar büyük olursa W -önem faktörünün o derece daha büyük olması sağlanmış olmaktadır. Potansiyel şartların yerine getirilmesine yönelik talebin kaybolmaması için bu durum gereklidir.

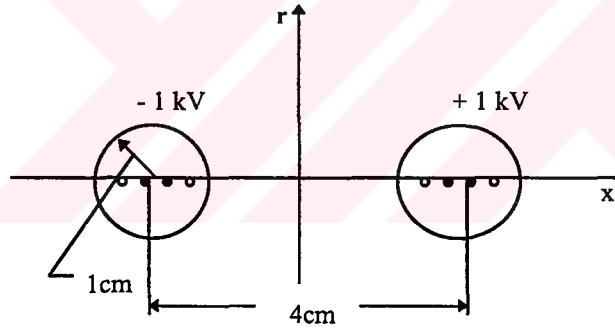
V -değişkeni kendi kendine W -önem faktörünün büyümesini de sağlamaktadır. Fiziksel çelişki ne kadar büyük olursa veya E_{ref} 'den E_f 'e kadar değerler ne kadar farklı olursa, v -değişkeni de o kadar büyük olur. Eğer optimizasyon problemi, lineer bir denklem sistemine taşınırsa ($n_0 = n$) ve aynı zamanda sınırı olan kenar noktalarda hiçbir fiziksel çelişki mevcut olmazsa ($E_{ref} = E_f$), önem faktörü 1 değerine sahip olur. Bu durum diğer tüm optimizasyon kenar noktalarının önem faktörüne tekabül etmektedir.

6.OPTİMAL EŞDEĞER YÜK SİSTEMLERİ YARDIMIYLA ELEKTROT SİSTEMLERİNİN SİMÜLASYONU VE ELEKTRİK ALAN OPTİMİZASYONU İÇİN ÖRNEKLER

Optimal eşdeğer yük sistemlerinin kullanımı, birkaç elektrot sisteminin simülasyonu ve alan optimizasyonu yardımıyla ispat edilebilmektedir. Ayrıca geniş ölçüde kendi simülasyonu ve optimal formuna dayanarak bilinebilen elektrot sistemleri söz konusu olmaktadır. Bu yüzden hem simülasyonda hemde alan optimizasyonunda ana problem, kıyaslama değerlerinin yardımıyla açıklanabilmektedir.

6.1.Simetrik Gerilim Dağılımlı Bir Küreye Ait Ark Yolunun Simülasyonu

Fletcher algoritmasının kullanılmasıyla Şekil:(6.1)'de ifade edilen bir küreye ait ark yolu probleminin simetrik gerilim dağılımıyla simülasyonu yapılmıştır.



Şekil:6.1 Simetrik Gerilim Dağılımlı Küre Atlama Hattı

- o Noktasal Yüklerin Başlangıç Konumu
- Yüklerin Fletcher Algoritması Yardımıyla Ortaya Çıkarılmış Son Konumu

Bu amaçla her küre için sadece 2 noktasal yük kullanıldı. İlk önce konvansiyonel eşdeğer yük metoduna göre hesaplanan düzenlemeler, bu noktalara ait başlangıç konumlarında tertiplendi. Sonra hem bu değerler hemde bunların konumları her küre

için 60 referans noktasından oluşan bir hesaplama içinde başlangıç parametresi olarak Fletcher algoritmasına dahil edildi. 6 iterasyondan sonra % 25'lik başlangıç değerine sahip en yüksek relatif potansiyel hata $F_{\max}$ % 0.5'e indirildi. Ayrıca ortalama karesel potansiyel hata % 0.3'e düşürüldü. Hesaplanarak bulunan optimal yükler (1,0) noktasında 1,76kV/cm'lik bir maksimum alan şiddetini ($E_{\max}$) oluşturmuştur. Bu değer, bilinen yansıma metodu yardımıyla hesaplanarak bulunan çözümden sadece % 0,6 oranında sapma göstermiştir. Bu sonuç ise yansıma metodu kullanılarak her küre için 6 noktasal yük ile elde edilebilirdi. Kullanılan yüklerle ilgili başlangıç ve son yükler Şekil:(6.1)'de ifade edilmiştir.

Bunlar kendi başlangıç ve son değerleriyle birlikte Şekil:(6.1)'de açıklanan sağ küre için Tablo.(6.1)'den elde edilebilir.

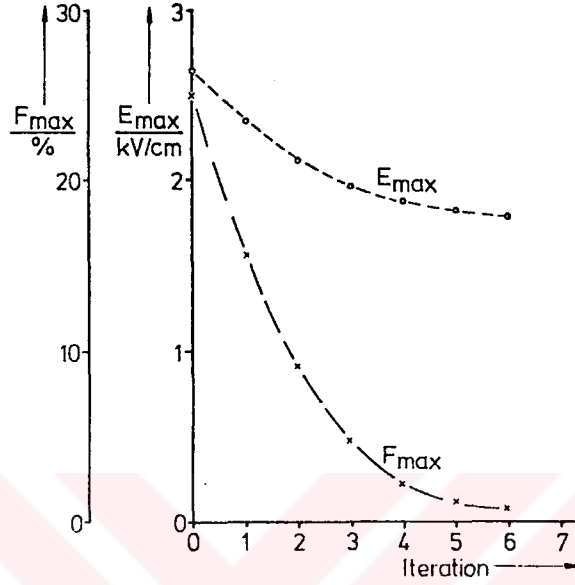
Tablo:6.1 Şekil:6.1'deki Sağ Küreye Ait Olan Yüklerin Başlangıç ve Son Konumu ile Başlangıç ve Son Değerleri.

Yük İndeksi i	Yüklerin Başlangıç Konumu ve Değerleri (konvansiyonel hesaplanmış olarak)		Yüklerin Son Konumu ve Değerleri (Fletcher algoritmasına göre)	
	X-Eksenindeki Konum (cm)	Yük Değeri (nC)	X Eksenindeki Konum (cm)	Yük Değeri (nC)
1	1 . 5	0 . 657717	1 . 832497	0 . 819189
2	2 . 5	0 . 599263	2 . 061369	0 . 668211

Bu değerlerin kıyaslanması; örnekteki hata fonksiyonunun minimumlaştırılması işlevinin, yüklerin değişimiyle yapılmasından ziyade yüklerin konumunun değiştirilmesiyle yapılmasının daha doğru olduğuna işaret etmektedir. Ayrıca bu durum, yüklerin konumuyla ilgili simülasyonun toplamsallığı üzerine kuvvetli etkisine dikkat çekmektedir.

Konvansiyonel eşdeğer yük metodu yardımıyla yapılan hesaplamada ise aynı doğruluğu elde etmek için her kürede yaklaşık olarak 15 dairesel yük kullanılmalıydı. Buna göre konvansiyonel çözüm, minimizasyona ait toplam hesaplama zamanından daha fazlasını gerektirmektedir. Şekil:(6.2) en yüksek potansiyel hatayı ($F_{\max}$) ve ayrıca hesaplama

akışı içinde özel iterasyon adımlarına bağlı olarak maksimum alan şiddetini ($E_{\max}$) göstermektedir.



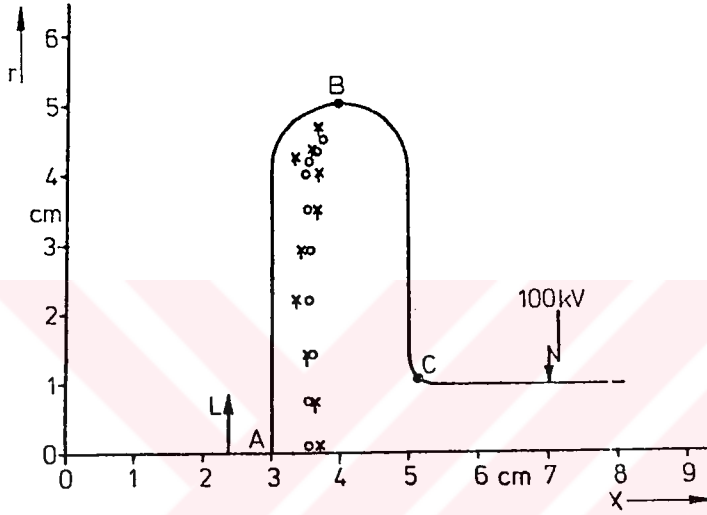
Şekil:6.2 Simülasyona ait en yüksek yüzdesel potansiyel hata ($F_{\max}$) ve Fletcher-Algoritmasıyla gerçekleştirilen iterasyon adımlarına bağlı maksimum alan şiddeti ($E_{\max}$).

Şekil:(6.2)'de ifade edilen en yüksek hatanın iterasyon adımları üstündeki davranışı iterasyon adımları üzerinden minimize edilen hata fonksiyonunun tipik davranışına benzemektedir. Yani hesaplamaların yakınsaklık güvenilirliğini garanti edebilmek için Fletcher algoritması, kendisi optimuma ne kadar yakın olursa veya minimize edilmesi gereken hata fonksiyonu ne kadar küçük olursa o kadar yavaş çalışmaktadır.

Şekil:(6.2) maksimum potansiyel hata ve maksimum alan şiddeti hatası arasında bir orantılılığı dahi kapsamaktadır.

6.2.Sonsuz Geniş Metalik Bir Düzlem Karşısında Plaka Şeklinde Bağlantılı Bir Çubuk Elektrodun Simülasyonu

Şekil:(6.3)'de ifade edilen plaka şeklinde bağlantılı dönel simetrik çubuk elektrodun simülasyonu, yükler optimal düzenlenmiş olsalar bile büyük miktarda eşdeğer yük gerektirmektedir.



Şekil:6.3 Metalik düzlem karşısında plaka şeklinde bağlantılı çubuk elektrot

- o Eşdeğer yüklerin başlangıç konumu
- * Yüklerin, Fletcher-Algoritması yardımıyla ortaya çıkarılmış son durumu

Bu duruma ABC bölgesinin biçimi sebep olmaktadır. Bu bölgede amacına uygun olarak kullanılması gereken dairesel yüklere az ölçüde uygun bir saha düşmektedir. Böylelikle palakanın biçimini yeterli ölçüde tam olarak simüle edebilmek için yüklerin yoğunlaştırılması sözkonusu olmaktadır. Düzlem karşısındaki plaka bağlantı sahasında kuvvetli kıvrılma değişimi simülasyon sırasında daha çok gözönüne alınmalıdır. Çünkü bu değişikliğin, alan şiddetiyle bağlantılı olarak hususi tarzda kritik olması beklenebilmektedir. Bu durum kullanılması gereken eşdeğer yüklerin sayısının

yükselmesi anlamına gelmektedir. Çok sayıdaki bağımsız değişkenlerden dolayı optimal eşdeğer yük sistemlerinin yardımıyla bu tarz bir alanın tam simülasyonu çok uğraş gerektirmektedir. Bu yüzden tam simülasyon sadece yüksek zorlanmalı (AB) bölgesine sınırlı kalır ki burada diğer elektrot kısımları konvansiyonel metot yardımıyla eşdeğer yüklerle simüle edilir.

Bu sistemin kritik olmayan parçalarının simülasyonu amacıyla Metz'in (1979) metoduna dayanarak BC-plaka sahasında 14 -dairesele yük, çubuk sahasında 9 - çizgisel yük ve metalik düzlemlerin simülasyonu amacıyla 8-yüzeysel yük tercih edilmiştir. Tablo:(6.2), hem konvansiyonel metotlu simülasyon için hemde aynı sayıdaki yüklerin kullanılmasıyla yeni tertipli simülasyon için AB-yolu boyunca en yüksek potansiyel hatalar arasındaki bir kıyaslamayı vermektedir.

Tablo:6.2 En Yüksek Relatif Potansiyel Hataların Kıyası

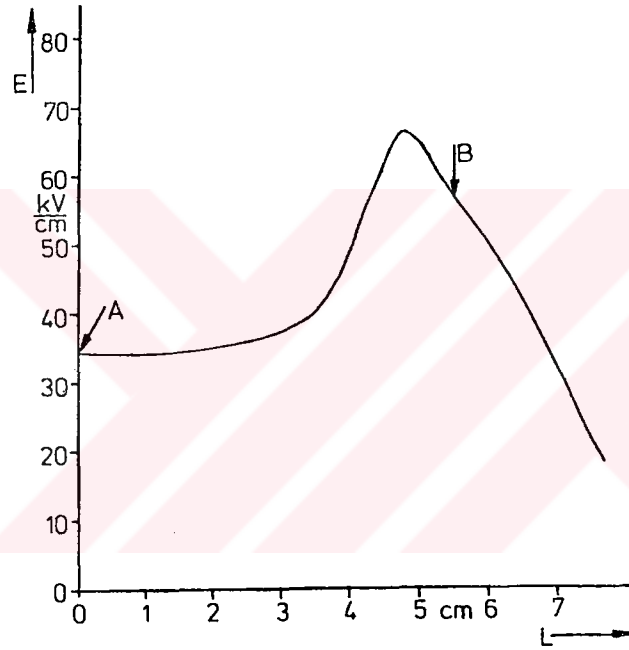
AB-Bölgesindeki Yüklerin Sayısı	AB-Kenarı Boyunca En Yüksek Relatif Potansiyel Hata (% Olarak)	
	Konvansiyonel Eşdeğer Yük Metodu	Optimal Eşdeğer Yük Sistemleri Metodu
7	11 . 6	4
8	5 . 15	1 . 15
10	2 . 4	0 . 14
17	0 . 18	

Optimal yük sistemleri metoduyla 10-Dairesel yük kullanılarak hedeflenen simülasyon doğruluğu konvansiyonel metotta yüklerin yoğunlaştırılmasıyla dahi elde edilememiştir. Bu dar metalik sahalar dahilinde (ABC) yüklerin yoğunlaştırılması, yüklerin kuvvetli ve karşılıklı bir etkileşimine sebebiyet vermektedir. Genellikle bu durum hesaplamada kararsızlığa yol açmaktadır. Bu kararsızlık ise örneğin; işaret değişikliği birçok büyük yük miktarları yardımıyla kötü yapılandırılmış çözümlerde görülebilmektedir.

Yüklerin konvansiyonel olarak koordine edilmiş başlangıç pozisyonları ve (AB)-bölgesindeki yük sisteminin son durumu (Fletcher algoritması ve 10-dairesel yüklerle

yapılan çözüm) Şekil:(6.3) 'de ifade edilmiştir. Bu şekil, yük konumlarının küçük bir değişimi sonucu simülasyonun doğruluğunun ne kadar etkilenebildiğini göstermektedir. Bu tarz hassasiyetleri tecrübeli bir uygulayıcı dahi önceden zor tahmin edebilmektedir. Plakanın bu çözümle ilgili alan şiddeti dağılımı Şekil:(6.4)'deki ayrıntılı bir ifadeyle tekrar verilmiştir.

Tablo:(6.3), incelenen elektrodun (AB)-bölgesindeki yük miktarlarının iki farklı çözümünü göstermektedir.



Şekil:6.4 Elektrodun alan şiddeti dağılımı.

Bu çözümler konvansiyonel eşdeğer yük metodu yardımıyla 17 yük kullanılarak hesaplanmıştır.

Her iki çözüme ait yüklerin konumları aynı olmakla beraber aralarındaki fark kenar noktalarının farklı tertiplenmesinden ileri gelmektedir.

Tablo:(6.3)'e göre ilk çözüm, büyük yük miktarlarından ve birçok işaret değişiminden görülebildiği gibi kötü yapılandırılmış bir çözümdür.

Bu tarz bir çözüm, potansiyel gradyanları bozan uçların ve çıkıntılarının oluşumundan dolayı elektrik alan hesabı açısından uygun olmamaktadır.

Tablo:6.3 Şekil:6.3'e Göre AB-Elektrot Sahasının Simülasyonu Amacıyla
17 Yükten Oluşan Bir Yük Sistemi İçin Konvansiyonel Hesaplanmış
Farklı İki Çözüm.

Yük İndeksi	Yüklerin Konumu (cm)		Yüklerin Değeri (nC)	
	x	r	İlk Çözüm	İkinci Çözüm
1	3 . 793	4 . 753	102 . 1523891	47 . 3534376
2	3 . 610	4 . 675	4 . 3537164	53 . 5475533
3	3 . 448	4 . 552	350 . 6051477	43 . 9769935
4	3 . 325	4 . 390	1517 . 2709916	42 . 0053323
5	3 . 247	4 . 202	-18906 . 2605534	123 . 950166
6	3 . 220	4 . 000	-55637 . 3350411	-294 . 9712567
7	3 . 220	3 . 800	94606 . 1008377	556 . 3129619
8	3 . 240	3 . 550	-86829 . 5707321	-477 . 5018094
9	3 . 240	3 . 300	45694 . 8105839	279 . 3400843
10	3 . 240	3 . 050	-12701 . 0553274	-57 . 4542200
11	3 . 240	2 . 600	1977 . 3501172	24 . 7865503
12	3 . 300	2 . 500	-88 . 7204967	17 . 7231031
13	3 . 400	2 . 150	57 . 8162337	20 . 1433481
14	3 . 500	1 . 750	28 . 5804501	26 . 1081578
15	3 . 500	1 . 250	19 . 4375506	17 . 2372346
16	3 . 500	0 . 750	11 . 0576006	10 . 5937173
17	3 . 500	0 . 250	3 . 0068421	2 . 8376977

Tablo:(6.3)'deki konvansiyonel olarak hesaplanmış ikinci çözüm iyi yapılandırılmış bir çözümü göstermektedir. İkinci çözümün en büyük hata miktarı Tablo:(6.2)'de belirtilmiştir. Bu ikinci çözümün yük miktarları büyüklük olarak birinci çözümün

değerlerinden çok farklıdır. Bu değerler yüklerin dar bir sahada yoğunlaşmasından dolayı karşılıklı etkileşime dayandırılabilen bir işaret değişimini göstermektedir.

Elektrotlara ait alan değişimini bozan simülasyon uçlarından kaçınmak için, ifade edilen (AB) sahasının simülasyonu amacıyla yük sisteminin ideal bir çözümü incelenen bu kenarın düzeltilmiş değişimine dayanarak hiçbir işaret değişikliğine sahip olmamalıdır. Şekil:(6.2)'de ifade edilen yük sisteminin Tablo:(6.4)'de tariflenen çözümünün gösterdiği gibi bu tarz bir çözüm optimal eşdeğer yük sistemleri yardımıyla mümkün olmaktadır.

Tablo:(6.4)'deki çözümün elde edilmesi için Fletcher algoritması yardımıyla yaklaşık 40 minimizasyon adımı (hesaplamaların başlangıcında sıfırlanan değerlere ait yük miktarı yapısında ilave olmak üzere) ve 5 regresyon iterasyonu gereklidir.

Bu problemde optimal eşdeğer yüklerin yardımıyla yapılan çözüm için gerekli hesaplama zamanı, (AB)-bölgesindeki 17 yük ile yapılan konvansiyonel çözüm için gerekli hesaplama zamanından 5 defa daha büyüktür. Bu büyük hesaplama zamanı hedeflenen doğruluğa nazaran kabul edilebilir düzeydedir.

**Tablo:6.4 AB-Kenarının Simülasyonu İçin Şekil:6.3'de ifade edilen
Yük Sisteminin Hesaplanan Optimal Değerleri.**

Yük İndeksi	Yükün Konumu (cm)		Yükün Değeri (nC)
	x	r	
1	3 . 746	4 . 612	92 . 3645426
2	3 . 615	4 . 385	91 . 5996404
3	3 . 405	4 . 248	88 . 5227623
4	3 . 804	4 . 000	74 . 5105201
5	3 . 704	3 . 500	57 . 6996251
6	3 . 461	2 . 900	42 . 3778663
7	3 . 432	2 . 200	36 . 5302648
8	3 . 619	1 . 400	38 . 1845518

9	3 . 695	0 . 700	13 . 8134014
10	3 . 786	0 . 050	3 . 1534111

Ancak iyi bir konvansiyonel çözümün elde edilmesi amacıyla normal tarzda birçok hesaplama akışı gerektiği düşünülürse (yükler ve kenar noktalar arasında iyi bir düzenlemeye ulaşmak için) o zaman optimal eşdeğer yük metodundaki hesaplama zamanı az düzeyde kalacaktır.

6.3. Bölüm:(6.2)'e Göre Elektrot Sisteminin Bağlantı Plakasının Farklı

Büyükölçekteki Alana Sahip Kritik Sahalarının Elektrik Alan Optimizasyonu

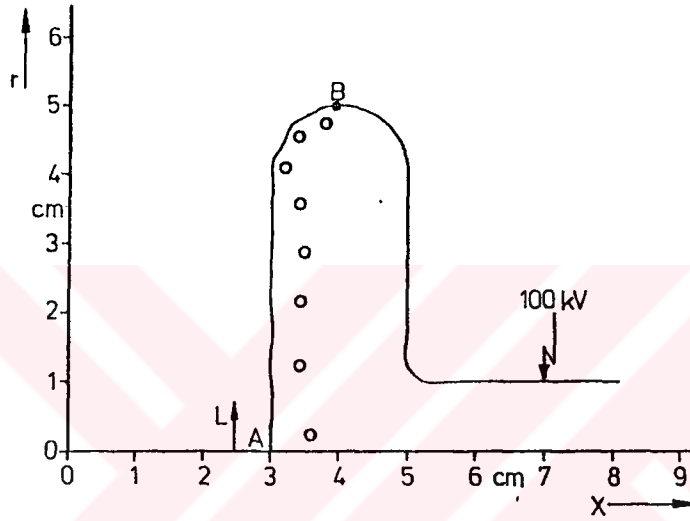
Optimal eşdeğer yük sistemlerinin yardımıyla yapılan elektrik alan optimizasyon metodu, Şekil:(6.3)'de Bölüm:(6.2)'e göre ifade edilen elektrot sisteminin bağlantı plakasının farklı büyüklükteki alanı bakımından kritik sahaların optimizasyonu amacıyla kullanılmaktadır. Elektrot plakasının alan şiddeti dağılımından (Şekil:6.4) görülebildiği gibi düzlem karşısındaki kıvrılmış plaka bağlantı sahasının özel olarak kritik olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden her iki optimizasyon sahası; plaka kenarının yüksek zorlanmalı, direkt düzlem karşısında bulunan (AB) sahasından elde edilmektedir. Öyleyse seçilen her iki sahanın optimizasyonu sırasında Bölüm:(6.2)'de gerçekleştirilen tam simülasyonun gerekli olmadığına dikkat edilmelidir. Mümkün mertebe az hesaplama yapmak için özel ifadelerin nasıl kullanılabildiğini ispatlamak amacıyla optimizasyon hesaplamaları basit ve büyük simülasyonlarla gerçekleştirilir.

6.3.1.Dönel Eksene Kadarki Optimizasyon Sahası

Alan optimizasyonu Bölüm:(6.2)'de simülasyonu yapılan tamamen kritik olan (AB) sahasında gerçekleştirilir. Ayrıca (B) noktası sabit bir kenar noktayı ifade etmektedir. Buna karşılık (A) noktası optimizasyonun akışı içinde serbest hareket ettirilir. Başlangıç elektrodunun yalnızca alan optimizasyonu için gerekli olmasından hareket ederek (AB) kenarına sadece 8 yük koordine edilmiştir. Bu yüklerin değerleri hesabın

başlangıcında sıfır yapılmıştır. Daha sonra (AB) bölgesinin kaba bir simülasyonu %2,5'luk en yüksek potansiyel hataya kadar ve yaklaşık %0,9'luk ortalama karesel hataya kadar Fletcher algoritması yardımıyla yapılmıştır.

Bu simülasyonun hatası hem Şekil:(6.5)'de ifade edilen optimizasyon başlangıç kenarından (AB), hemde bu kenara ait alan şiddeti dağılımının formundan görülebilmektedir. Bu form Şekil:(6.6)'da verilmiştir.

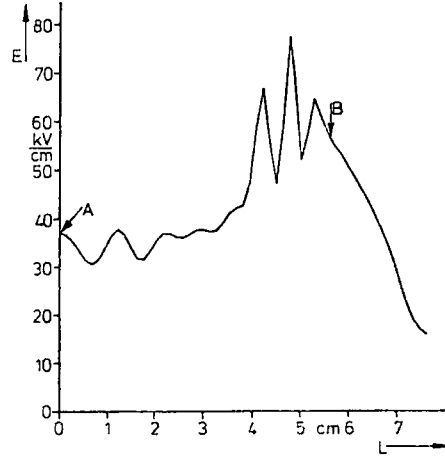


Şekil:6.5 Plaka-Düzlem tertibinin optimizasyon kenarı

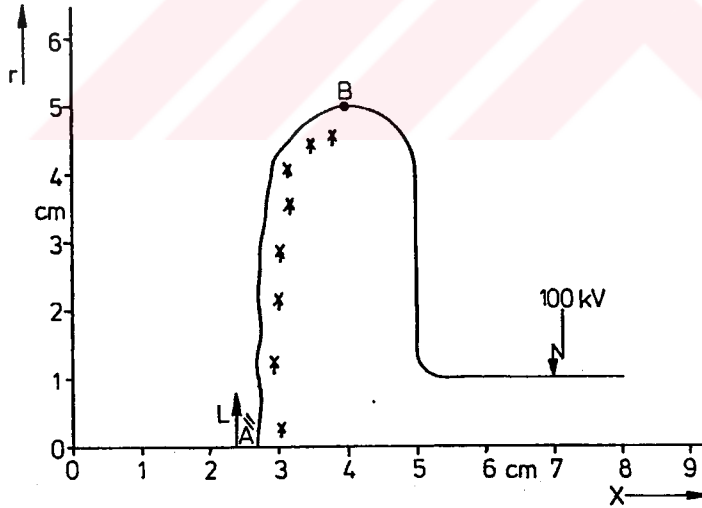
o Eşdeğer yüklerin elektrik alan optimizasyonuna ait başlangıç konumları (Fletcher-Algoritmasıyla yapılan simülasyonda ortaya çıkarıldığı gibi).

Başlangıç elektrodunun simülasyonuna bağlı olarak ilk optimizasyon adımı Fletcher algoritması yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sadece yüklerin koordinatları bağımsız değişkenler olarak dikkate alınmış olup buna karşılık bu yüklerin değerleri sabit kalmıştır. Şekil:(6.7) bu ilk optimizasyon adımına göre ortaya çıkan eşpotansiyel yüzeyi (A''B) ifade etmektedir.

Bu yüzeye ait elektrik alan şiddeti dağılımı ise Şekil:(6.8)'den görülebilmektedir. Şekil:(6.7)'e göre eşpotansiyel yüzey başlangıç elektrodu gibi kıvrılır. Bu durum Şekil:(6.8)'deki alan şiddeti dağılımının değişimi yardımıyla da görülebilmektedir.



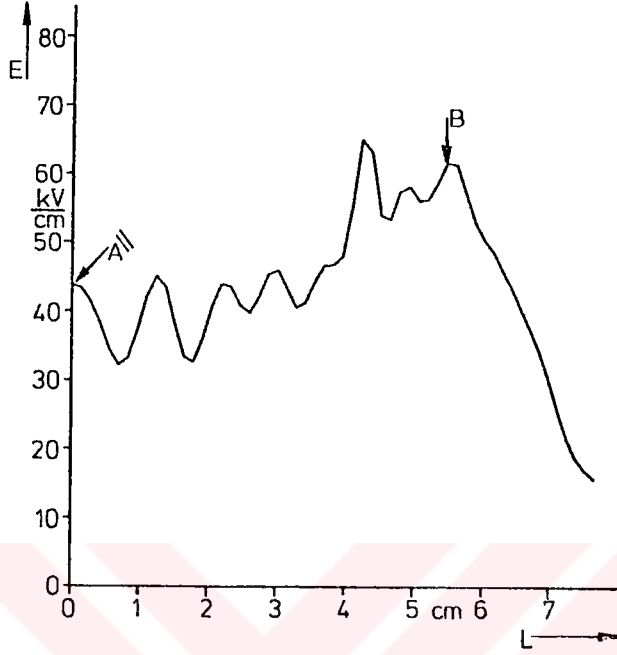
Şekil:6.6 Şekil:6.5'e göre plakanın elektrik alan şiddeti dağılımı.



Şekil:6.7 Alan optimizasyonunun ilk adımına göre elektrot formu
(Hesaplama sadece yüklerin koordinatlarına bağlıdır)

* Optimizasyonun ilk adımına göre yüklerin son durumu

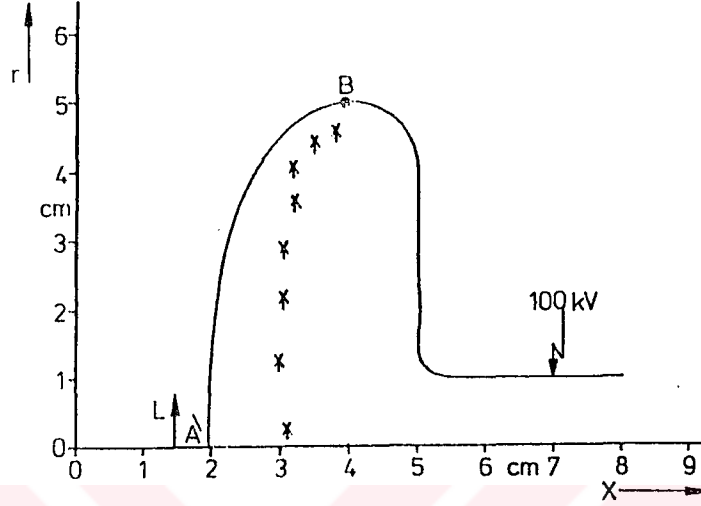
Böylelikle bu ilk alan optimizasyon adımına göre maksimum alan şiddeti başlangıç elektrodunun alan şiddetine nisbetle yaklaşık %20 civarında azalır.



Şekil:6.8 Şekil:6.7'e göre elektrodun elektrik alan şiddeti dağılımı

Alan şiddeti dağılımı, ilerleyen hesaplamayla birlikte kıyaslandığı için optimizasyon işlevinin akışı içindeki bir elektrodun en büyük form değişikliği birinci iterasyonda oluşmaktadır. Bu yüzden Fletcher algoritması yardımıyla ilk alan optimizasyon adımının gerçekleştirilmesi, alan optimizasyon stratejisinin dahilindeki yük sisteminin koordinatlarının fonksiyonu olarak çok uygun bir tarzda ortaya çıkmaktadır. Bir taraftan bağımsız değişkenlerin sayısı yüklerin değerlerine indirgendiği için Fletcher algoritmasının kullanımında hesaplama zamanı azaltılmakta, diğer taraftan hata fonksiyonunun minimizasyonu yük konumlarının fonksiyonu olarak, yüklerin beklenebilen optimal form doğrultusunda mümkün olan en büyük miktarda kaymasına sebebiyet vermektedir. Öyleki diğer optimizasyon adımları için yük sisteminin lokal herhangi bir değişikliği gerekli değildir.

Daha sonra alan optimizasyonu bu örnekteki gibi regresyon analizi yardımıyla devam ettirilebilir. Şekil:(6.9) ve Şekil:(6.10) optimizasyonu yapılan elektrot formunu ve ona ait elektrik alan şiddeti dağılımını ifade etmektedir.



Şekil:6.9 Optimizasyonu yapılmış elektrot formu

* Şekil:6.7 için yüklerin değişmemiş son konumu

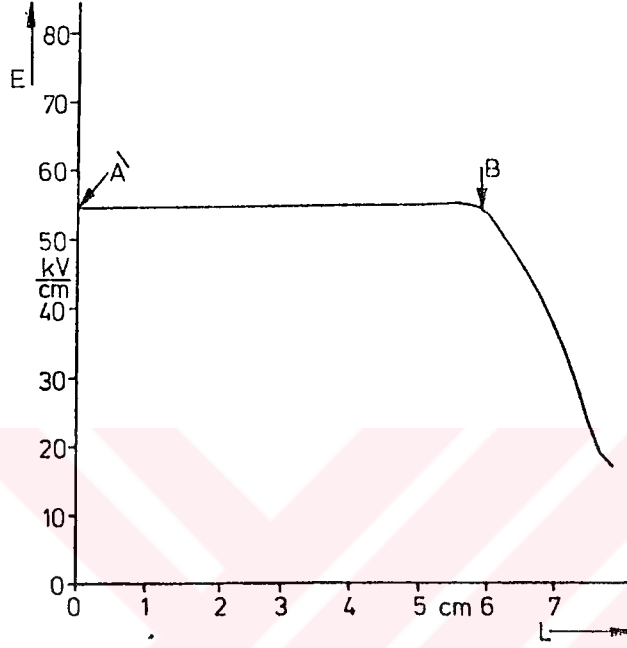
Optimizasyonu yapılan elektrot sistemi başlangıç elektrot sistemine nisbetle %31'lik bir alan şiddeti azalmasına sahiptir.

Şekil:(6.5)'göre (AB)-bölgesinin Fletcher algoritması yardımıyla gerçekleştirilen simülasyonu (yük miktarı oluşumu da dahil olarak) 40-iterasyonu gerektirmiştir. Elektrot sisteminin kritik olmayan kısımlarının konvansiyonel simülasyonu (39x39) boyutlu bir matris oluşumunu gerektirmektedir. Zaman bakımından kıyaslama amacıyla bu matris yapısının hesaplanma zamanı Metz'e (1979) göre yaklaşık olarak %25 civarında daha az olmaktadır. Kaba olarak simülasyonu yapılmış başlangıç elektrodunun dalgalı değişimine rağmen optimal formun elde edilmesi, potansiyel düzenlemenin güvenilir yakınsadığını göstermektedir.

6.3.2.İki Sabit Kenar Arasındaki Küçük Optimizasyon Sahası

Optimizasyon sahası, B ve A₁ kenar noktaları arasındaki (x=3,0 cm ; r=3,3 cm) az

zorlanmalı bölgeye sınırlandırılır. Bu saha sabit kenarlar arasında bulunduğu için bu tarz optimizasyon sahası özellikle kenar saha problemlerinin incelenmesi amacıyla deney objesi olarak uygundur.



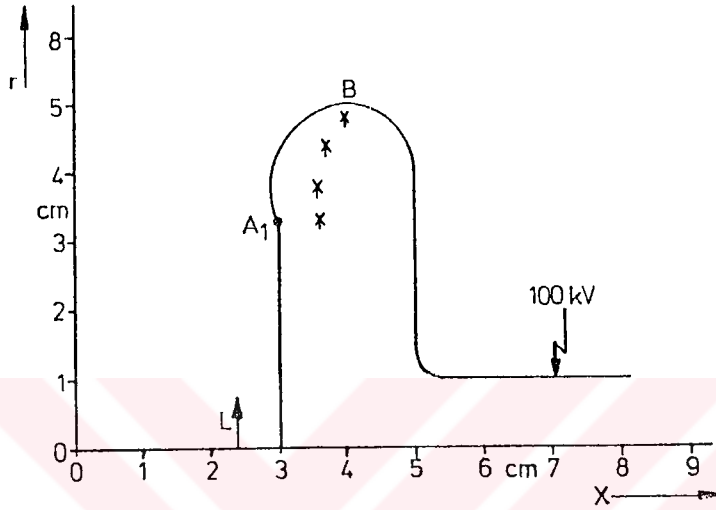
Şekil:6.10 Optimizasyonu yapılmış elektrot formunun alan şiddeti dağılımı

A_1 noktası ve dönel eksen arasındaki kenarı konvansiyonel olarak simüle etmek için ve elektrot sisteminin kritik olmayan kısımlarının simülasyonu amacıyla Bölüm:(6.2)'de verilen yük sistemi ilave 9-dairesel yük ile genişletilir.

Şekil:(6.11), ifade edilen küçük (A_1 B) optimizasyon sahası için ortaya çıkan formu göstermektedir. Ayrıca bu sahaya ait ilgili alan şiddeti dağılımı Şekil:(6.12)'de ifade edilmektedir.

Hesaplama açısından zaman gerektiren Fletcher algoritmasının kullanımından vazgeçebilmek için bu sahanın optimizasyonu amacıyla basit bir strateji uygulanmıştır. (A_1 B) bölgesinin simülasyonu amacıyla sadece 4-dairesel yük kullanılmıştır. Bu yükler hesaplama anında başlangıç elektrodu bakımından değil, hesaplama sonucunda optimal

olarak ortaya çıkması muhtemel elektrot formu bakımından koordine edilmiştir. Sabit kıvrımlı bir yüzeyi mümkün mertebe iyi şekilde simüle edebilmek için yükler yaklaşık olarak dengeli tertiblenmiştir. Sadece iki iterasyonda optimizasyonu yapılmış forma ulaşılması dikkat çekmektedir.



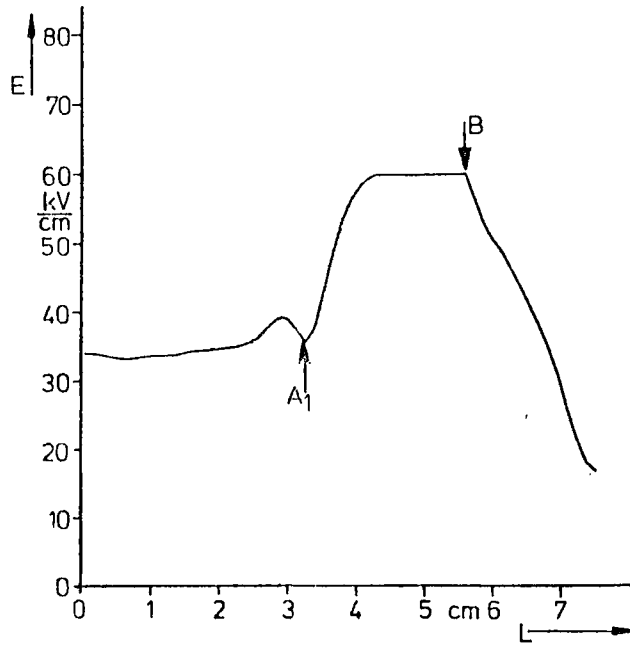
Şekil:6.11 Optimizasyonu yapılmış elektrot formu

* Kullanılan yüklerin konumu

Eğer (A_1) kenar noktasına geçiş sahası içinde az bir değişiklik gözönüne alınmazsa Metz'in (1979) metodunda hedeflenen optimal form söz konusu olmaktadır (Aynı bölgenin simülasyonu amacıyla 8-yükün yardımıyla). Bu çalışmada hedeflenen biçimdeki geçiş sahası arzu edildiği gibi daha kısadır. Ve elde edilen maksimum alan şiddetleri birbirinden ayırt edilememektedir.

6.4.Tek Taraftan Kapalı, Topraklanmış Silindirin Dahilindeki Bir Elektrodun Yüksek Zorlanmalı Ucunun Elektrik Alan Optimizasyonu

Alan optimizasyonu minimum sabit alan dağılımı bakımından Şekil:(6.13)'de ifade edilen elektrot sisteminin (AB) kritik parçasına tatbik edilmektedir.

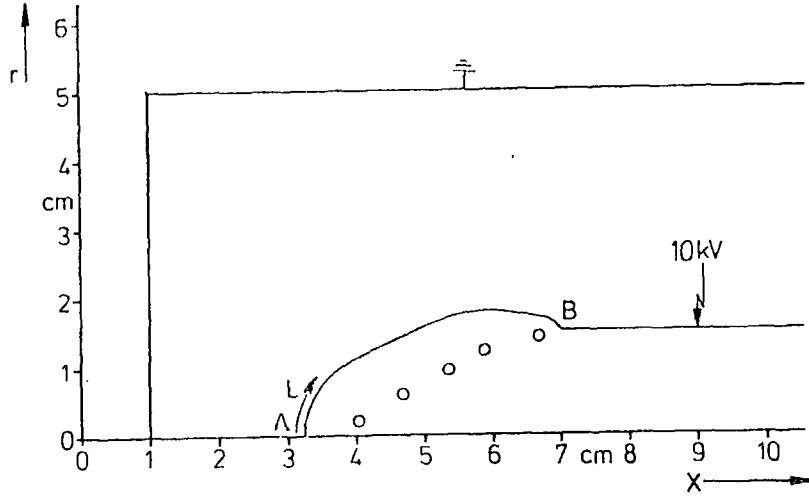


Şekil:6.12 Şekil:6.11'deki elektrot formunun elektrik alan şiddeti dağılımı

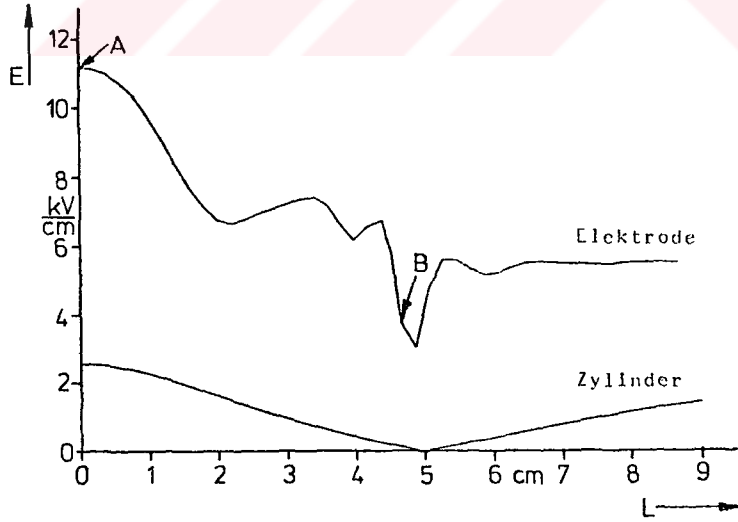
Bu sistemi şimdiye kadar incelenen sistemlere zıt olarak yansıma problemi tarzında ele almak pek uygun olmamaktadır. Bu elektrot sisteminin kritik olmayan kısımlarının konvansiyonel simülasyonu amacıyla 25-dairesel yük kullanılmıştır. Bundan 13 tanesi dahili çubukta yerleştirilmiştir. Kritik olan ve optimizasyonu yapılacak elektrot sahası (AB) herhangi bir tarzda önceden verilmiş olup, simülasyon ve alan optimizasyonu amacıyla bu sahaya sadece 5-dairesel yüklü bir sistem tertiplenmiştir.

Bölüm:(6.3.1)'deki gibi aynı optimizasyon stratejisi kullanılmaktadır. İlk önce başlangıç elektrodunun kaba bir simülasyonu Fletcher algoritması yardımıyla yaklaşık %2'lik potansiyel hataya kadar ve yaklaşık %0,87'lik ortalama karesel hataya kadar gerçekleştirildi. Bunun yanında simülasyon 39-iterasyon gerektirmiştir. Fletcher algoritması yardımıyla simülasyon akışı içinde ortaya çıkarıldığı gibi yüklerin son durumu Şekil:(6.13)'de ifade edilmiştir (optimizasyon için yüklerin başlangıç durumu olarak).

Şekil:(6.14), simülasyonu yapılan başlangıç elektroduna ait sistemin hedeflenen alan şiddeti dağılımlarını göstermektedir.



Şekil:6.13 Başlangıç elektrot sistemi
o Elektrik alan optimizasyonu için eşdeğer
yüklerin başlangıç konumları



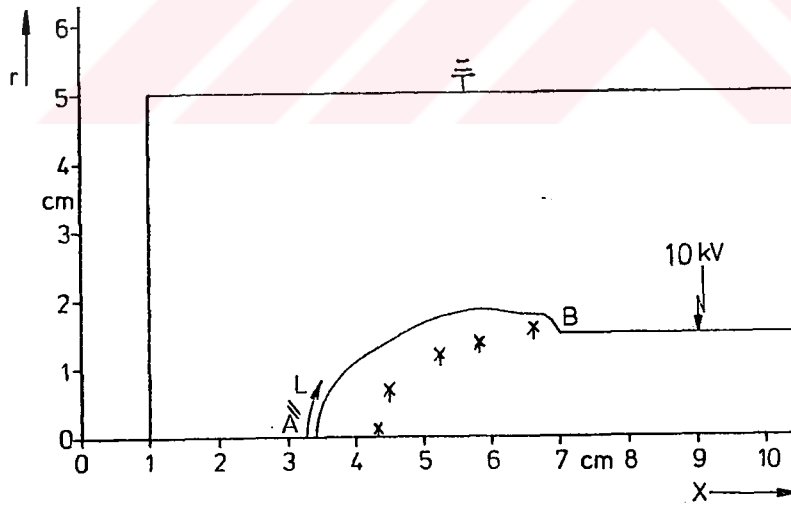
Şekil:6.14 Elektrodun ve topraklanmış silindirin (Şekil:6.13)
elektrik alan şiddeti dağılımı.

Birinci optimizasyon adımı Fletcher algoritması yardımıyla yük koordinasyonunun fonksiyonu olarak gerçekleştirildi. Yük miktarları ise hesaplama akışı içinde değiştirilmeksizin korundu. Şekil:(6.15) bu ilk optimizasyon adımından sonra elde edilen eşpotansiyel yüzeyi (A”B) ifade etmektedir. Yeni sisteme ait olan elektrik alan şiddeti dağılımları Şekil:(6.16)’den görülebilmektedir.

Optimizasyonun ilk adımı 25-iterasyon gerektirmektedir. Bu ilk adımdan sonra maksimum alan şiddeti başlangıç elektrodunun alan şiddetine nisbetle %7,5 civarında azaltıldı. Optimizasyon hesabının daha sonraki adımları regresyon analizi yardımıyla gerçekleştirilmiştir ve 13 iterasyon gerekli olmuştur.Şekil:(6.17) ve (6.18), optimizasyonu yapılan elektrot formunu ve ilgili alan şiddeti dağılımını ifade ediyorlar.

Bu optimizasyon sonucunda başlangıç elektrot sistemine nisbetle %30 civarında maksimum alan şiddeti azalması hedeflenmiştir.

Okubo (1979) tarafından yapılan alan optimizasyonuna ait benzer bir sonuç, aynı bölgenin simülasyonu için yaklaşık 16-yük yardımıyla elde edilmiştir.



Şekil:6.15 Optimizasyonun ilk adımına göre elektrot formu

* Elektrik alan optimizasyonunun ilk adımına göre yüklerin son konumu

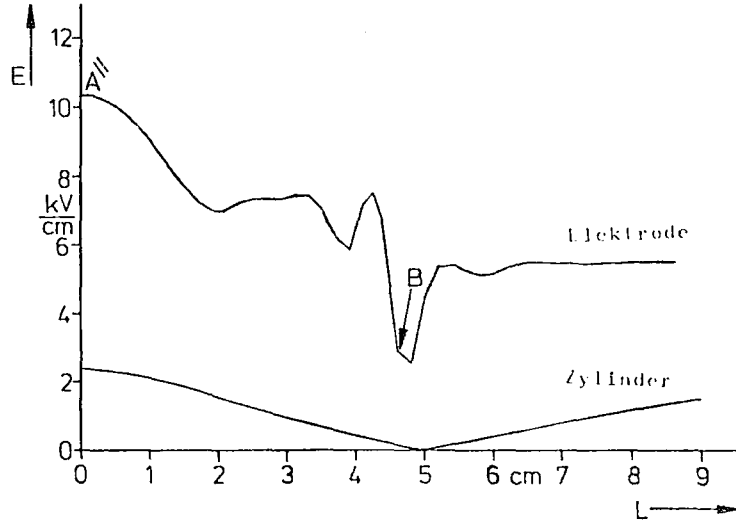
Bölüm:(6.3)'de optimizasyonu yapılan elektrot sistemlerinde ortaya çıkan durum gibi; optimizasyonu yapılan elektrodun, alan şiddetiyle ilgili hiçbir kararlılığa sahip olmadığı Şekil:(6.18)'den bilinebilmektedir. Bu davranış dış silindirin 90^0 'lik köşelerinin etkisine dayandırılmaktadır. Eğer optimizasyonu yapılan elektrot kenarlarının şeklinin ani olarak değiştirilmesine müsaade edilmezse (teknik açıdan uygun görüldüğü gibi), dış silindirin kenar biçiminin değişmesi (ki bu değişim silindirin alan şiddeti dağılımına da dikkati çekmektedir) optimizasyon sırasında alan şiddetinin kararlılığını azaltmaktadır .Bir taraftan ani kenar değişiklikleri hesaplama zamanını yükselten ilave simülasyon yüklerini gerektirmekte, diğer taraftan bu durumda alan şiddeti kararlılığının iyileştirilmesi en yüksek alan şiddeti değerinin azalmasıyla bağlantılı olmamaktadır.

Özel kenar noktalarının değişimi yardımıyla elde edilen optimizasyonda olduğu gibi (Okubo et al;1979) alan şiddeti kararlılığı, alan şiddetinin düşük değerlerinin yükseltilmesinde ortaya çıkabilmektedir. Bu çalışmada elde edilen optimizasyonu yapılmış formdaki farklılıklara rağmen her iki elektrot aynı maksimum alan şiddetine sahiptir. Elektrot optimizasyonunun örneklerine bağlı olarak temel alan şiddetinin (E_{ref}), Şekil:(6.13) 'de ifade edilen başlangıç elektrot sistemi yardımıyla Bölüm:(6.2)'deki alan optimizasyonunun değişimi üzerine etkisi ispat edilmek istenmektedir.

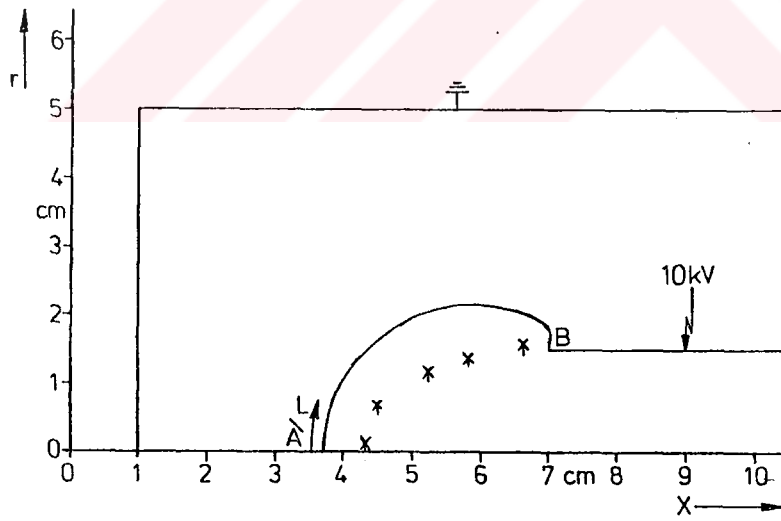
Sabit B-kenar noktasının alan şiddeti değeri bu sistemin optimizasyon hesabının temel alan şiddeti olarak seçildi. Bu seçim sayesinde sabit kenar noktası (B) aynı zamanda hesaplamaların referans noktası olduğu için sabit kenar sınırında hiçbir kenar sahası problemi ortaya çıkmamaktadır. Şekil:(6.20)'de görüldüğü gibi, Şekil:(6.19) bu stratejiyle optimizasyonu yapılmış (A''B') - elektrodunu ifade etmektedir.

Bu elektrot minimum alan şiddeti dağılımına sahiptir. Maksimum alan şiddeti başlangıç elektrot sistemine karşılık %20 civarında azalmaktadır. Bununla birlikte Şekil:(6.17)'e göre bu alan şiddeti, optimizasyonu yapılmış elektrodun mümkün olan minimum en yüksek alan şiddetinden %14 civarında daha yüksektir.

Şekil:(6.19)'daki elektrot, dış silindirin köşesinden Şekil:(6.17)'e göre optimizasyonu yapılmış elektrot olarak uzaklaşmıştır. Bu yüzden alan şiddeti dağılımı (Şekil:6.20) daha yüksek bir kararlılığa sahiptir.

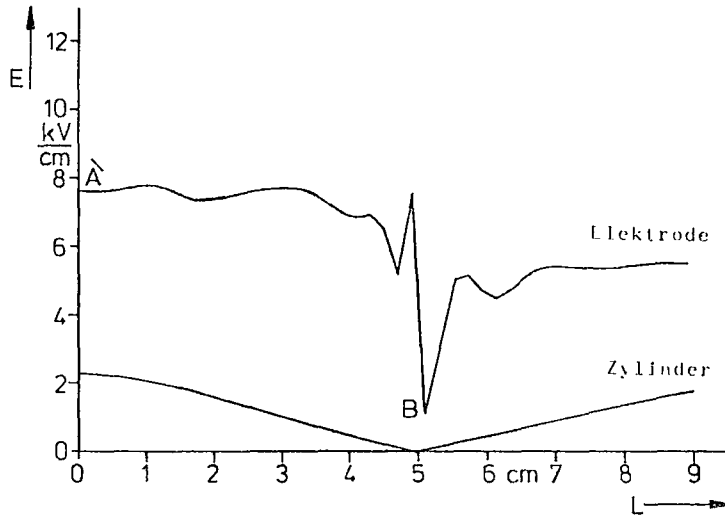


Şekil:6.16 Elektrodun ve topraklanmış silindirin (Şekil:6.15) elektrik alan şiddeti dağılımı.



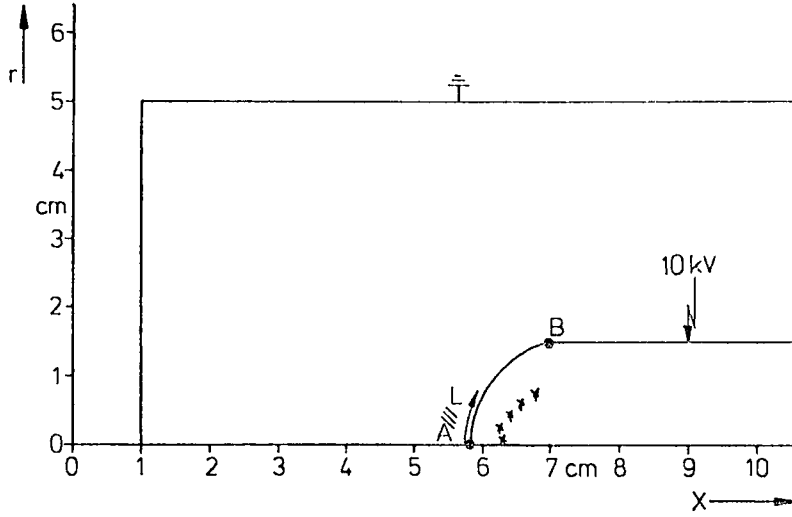
Şekil:6.17 Optimizasyonu yapılmış elektrot formu

* Şekil:6.15 için yüklerin değişmemiş son konumu



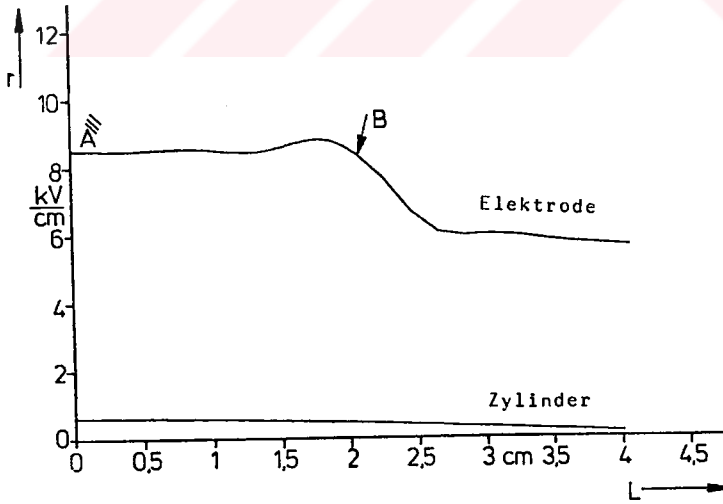
Şekil:6.18 Optimizasyonu yapılmış elektrot formunun ve topraklanmış silindirin elektrik alan şiddeti dağılımı.

Son olarak incelenen bu alan optimizasyon örneği temel alan şiddeti değerinde yapılan uygunsuz seçimin, alan optimizasyon hesabını nasıl yanlış istikamete sevk edebildiğini göstermektedir. Böylece hesaplama miktar olarak sabit fakat aynı zamanda minimum olarak mümkün olmayan alan şiddeti dağılımına yol açmaktadır. Ancak Şekil:(6.17) ve (6.19)'a göre her iki elektrot biçiminin hacim ve dış yüzeyleri incelendiğinde Şekil:(6.19)'a göre daha yüksek elektrik alan şiddeti değerlerine sahip elektrodun, alan bakımından kritik bölgelerdeki yüksek değerli dış yüzeylerin meydana getirilmesi amacıyla daha az hesaplama operasyonu gerektirdiği ortaya çıkmaktadır. Bu durum optimizasyonu yapılacak elektrot üzerinde referans noktanın seçilmesinin, muhtemelen elektriki kenar şartları olarak diğerlerini de dikkate alabilmek için kullanılabildiğini göstermektedir.



Şekil:6.19 Mümkün olan minimum en yüksek alan şiddetinden bağımsız olarak optimizasyonu yapılmış elektrot.
(Optimizasyon hesabının referans alan şiddeti, B-kenar noktasının alan şiddetidir.)

* Optimizasyon işlevindeki yüklerin son konumu.



Şekil:6.20 Şekil:6.19 göre topraklanmış silindirin ve elektrodun elektrik alan şiddeti dağılımı.

7.SONUÇLAR

Bu çalışmada elektrostatik alanların hesaplanması için iki yeni metot geliştirildi. Her iki metot konvansiyonel eşdeğer yük metodunun düzenlenmesine dayanmaktadır. İlk metot, elektrot potansiyeli için simülasyon hatası mümkün mertebe küçük olacak şekilde özel eşdeğer yüklerin konumu ve miktarı değiştirilmek suretiyle elektrot sistemlerinin tam bir simülasyonuna imkan vermektedir.

İkinci metot, yüksek gerilim alanlarının optimizasyonu amacıyla otomatik olarak çalışan bir metottur. Ve optimizasyonu yapılan elektrot formlarının değiştirilmesi veya meydana getirilmesi amacıyla kullanılır. Elektrot sistemlerinin tam simülasyonu için gerekli olduğu gibi eşdeğer yük sistemlerinin ortaya çıkarılmasındaki problem, genellikle en genel forma ait lineer olmayan çok boyutlu ve sınırlamalı bir minimizasyon problemidir.

Eşdeğer yüklerin koordine edilmesi amacıyla uygun olan geometrik bölgeler, kolay bir şekilde ilgili sahalara transformasyonu mümkün olacak tarzda seçilen basit geometrik formlarla yer değiştirilir. Bu suretle uygulayıcıya, uygun tarzdaki potansiyel simülasyon hatalarının minimizasyonu amacıyla eşdeğer yük sistemlerinin en iyi pozisyonlarının ve miktarlarının ortaya çıkarılması için sınırlamasız optimizasyon algoritmalarının kullanımına imkan verilmektedir. Transformasyon denklemlerinin bir kere kullanımı istenilen her elektrot sisteminin incelenmesi için yeterlidir. Kuvvetli yakınsadığı için ve değişkenlerin sayısı ne kadar büyükse diğer algoritmalarından o kadar üstün olduğu için Fletcher algoritması olarak adlandırılan Newton minimizasyon metodu kullanılmıştır.

Potansiyel simülasyon hatası, Fletcher algoritması yardımıyla yüklerin konumları eşpotansiyel yüzeylere iyi koordine edilecek kadar geniş sayıdaki özel eşdeğer yüklerin konumunun ve miktarının değiştirilmesi sayesinde minimize edilir. Diğer hatalar ise sadece yük miktarlarının değiştirilmesiyle azaltılır. Bununla birlikte kaydırma yöntemi kullanılmaz. Potansiyel simülasyon hata fonksiyonu yük miktarlarının tek bağıntısı olarak lineer bir fonksiyon olduğu için lineer-regresyonlu analitik bir algoritma kullanılır.

potansiyel hata dengelenmesine sebebiyet verir ki, bu suretle potansiyel simülasyondan elde edilen alan şiddeti hesabının doğruluğu iyileştirilmiş olur.

Elektrotların büyüklüğüne veya biçimine dayanarak sadece potansiyel parçaların büyük bir kısmının yardımıyla ifade edilebilen elektrot sistemlerinin incelenmesi amacıyla minimizasyon algoritmalarının kullanımı sırasındaki tam simülasyonun, yüksek zorlanmalı elektrot sahaları üzerine sınırlandırılması uygun ve pratik bir çözüm imkanı olarak ortaya çıkmaktadır. Bu arada kritik olmayan parçalar konvansiyonel eşdeğer yük metodu yardımıyla simüle edilirler. Simülasyon sırasında bir elektrot sisteminin bu tarz bölümlenmesi, kısmi çözümlerin üst üste getirilmesine dayanan metotla mümkündür ve yakınsaklığı stabil olarak hesaplama imkanı verir. Bu hesaplamada hem kritik parçaların simülasyon doğruluğunun avantajları hemde konvansiyonel eşdeğer yük metodunun küçük hesaplama operasyonlarına ait avantajları kullanılmaktadır. Mevcut elektrik alan hacminin optimal kullanımı ancak elektrot yüzeylerinde arzu edilen alan şiddeti dağılımları meydana getirilebilmesi halinde elde edilebilir.

Bu amaçla daha uygun bir elektrot formuna ulaşabilmek için bir potansiyel düzenleme geliştirildi ki bu düzenleme bir elektrot yüzeyinin alan şiddeti dağılımından hareket ederek elektrodun referans noktalarında hangi geometrik kaydırmaların yapılması gerektiği üzerine bir değerlendirme verebilmektedir.

Potansiyel düzenleme yardımıyla bu değişimler alan dağılımından hesaplanmaktadır. Bu potansiyel değişimler incelenen kenarın referans noktalarının arzu edilen potansiyeline bindirilir. Bu suretle arzu edilen potansiyelle ilgili yeni bir kenar meydana getirilir ki bu kenar istenen optimal elektrot formuna yakın bulunmaktadır. Alan dağılımı bakımından istenen kırılma (sapma) kriterleri elde edilinceye kadar yeni ortaya çıkan kenar, iteratif bir işlevde yeni bir hesaplama akışının başlangıç noktası olarak vazife görür. Buna göre gözönünde bulundurulmuş alan optimizasyon işlevinin her iterasyon adımı bir potansiyel simülasyon problemidir. Bu problem ise elektrot sistemlerinin simülasyonu bakımından optimal eşdeğer yük sistemleri yardımıyla çözülebilir.

Fletcher algoritmasının ve regresyon analizinin kombinasyonu amacıyla alan optimizasyonu sırasında özel ifadelerle adapte edilen bir strateji hem yakınsaklık bakımından güvenilir hemde az zaman gerektiren optimizasyon hesabına imkan

tanınmaktadır. Hesaplama akışı içinde ortaya çıkan eşpotansiyel yüzeyler dikkate alındığı için bu strateji bir doğruluğa sahiptir. Genellikle imalat tekniği sebeplerinden dolayı uygun olduğu gibi bu optimizasyon stratejisi, elektrik alan optimizasyonunun büyük zorlanmalı elektrot sahaları üzerine sınırlandırılmasına dahi imkan vermektedir. Bunun yanında biçimi değiştirilen elektrot parçaları otomatik olarak sabit kenarlara adapte edilmektedir.

Elektrot sistemlerinin hem simülasyonu hemde alan optimizasyonu için optimal eşdeğer yük sistemlerinin pozisyonlarının ve miktarlarının ortaya çıkarılması amacıyla minimizasyon algoritmalarının kullanılması örneklerle gösterilmiştir.

Konvansiyonel eşdeğer yük metoduna nisbetle bu metot aşağıdaki avantajlara sahiptir :

- Gerekli yüklerin sayısının azaltılmasının neticesi olarak bilgisayarda küçük veri depolama ihtiyacı,
- Eşpotansiyel yüzeylere, optimizasyonu yapılmış yüklerin adaptasyonu sayesinde yakınsaklık bakımından güvenilir hesaplama (alan optimizasyonu sırasında biçimi değişen yüzeyler de dahil),
- İncelenen elektrodun tüm referans noktalarının hesaplamaya alınması sonucu hesaplamaya ait yüksek doğruluğun elde edilmesi.

Yeni geliştirilen potansiyel düzenlemenin yardımıyla elektrik alan optimizasyonu elektrot sistemlerinin potansiyel simülasyonunun özel bir problemini ifade ettiği için alan optimizasyonu ve tam simülasyon metotları birbirine adapte edilmiştir. Böylece alan hesaplamasına bağlı olarak elektrot biçimlerinin optimizasyonu çok rasyonel bir tarzda mümkün olmaktadır.

KAYNAKLAR

Andersen,O.W.,1981. Two stage solution of three dimensional electrostatic fields by finite differences and finite elements,IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,Vol.PAS-100, No.8 August.

Anis,H., Zeitoun,A. , El-Ragheb,M. , and El-Desouki,M. 1977. Field calculation around non-standard electrodes using regression and their spherical equivalence, IEEE Transaction,Vol.PAS-96,No.6 , November-December: 1721-1730

Beasley,M.D.R. ,Pickles,I.H. , d'Amico,G., Beretta,L., Fanelli,M., Giuseppetti,G., di.Monaco,A., Gallet,G., Gregorie,J.P. , and Moring,M., 1979.Comparative study of three methods for computing electric fields, Proc. IEE,Vol. 126,No.1, January: 126-134

Beightler,Ch.S., Philipps,D.T., and Wilde,D.J. 1979.Foundations of Optimization, Verlag Prentic-Hall,Inc. ,Englewood Cliffs, N.J.07632

Box,M.J., 1965.A new method of constrained optimization and a comparison with other methods,The Computer Journal,Vol.8 ,No.1,April: 42-52

Box,M.J. ,1966:A comparison of several current optimization methods,and the use of transformations in constrained Problems,The Computer Journal,Vol.9 ,No.1:67-77

Broyden,C.G., 1967.Quasi-Newton Methods and their Application to Function Minimization,Mathematics of Computation,Vol.21,No.97,January: 368-381

Brayton,R.K. , and Cullum, J., 1979 :An Algorithm for Minimizing a Differentiable Function Subject to Box Constraints and Erros, Journal of Optimization Theory and Applications, Vol.29, No.4,December: 521-558

Chow,Y.L. ,and Charalambours ,C. , 1979. Static -field computations by the method of optimised simulated images ,Proc. IEEE ,Vol. 126,No.1 January: 123-125

Chow,Y.L. ,Srivastava, K.D. and Charalambous, C., 1979.Field Computation around a charged conducting sphere near a dielectric coated conducting plate and under a uniform external electric field, ISH MILAN ,No.11.15

Davidon,W.C. ,1959.Variable metric method for minimization ,A.E.C. Research and Development Report Anl-5990,December

Dennis,J.E., JR. ,H.H.W.MEI ,1979 . Two New Unconstrained Optimization Algorithms which use Function and Gradient Values ,Journal of Optimization Theory and Applications,Vol.28 ,No.4 , August :453-482

Efroymson,M.A. , 1960.Multiple regression analysis,Mathematical Methods for digital Computers,New York,Wiley

Fletcher,R. , and Powell ,M.J.D., 1963. A rapidly Convergent descent method for minimization ,The Computer Journal,Vol.6 :163-168

Fletcher,R., 1970. A new approach to variable metric algorithms ,The Computer Journal Vol.13 No.3,August: 317-322

Greenstadt,J., 1970.Variations on Variable-Metric Methods,Mathematical Journal, Vol.24 : 1-22

Haarhoff, P.C., and Buys , J.D., 1970. A new method for the optimization of a nonlinear function subject to nonlinear constraints ,The Computer Journal,Volume 13,Number 2,May : 178-184

Klement,H., Bachman,B., Grönewald,H., and Singer,H., 1980: Layout of HV Components by Computer Design ,Cigre,International Conference on Large High Voltage Electric Systems,August 27-September 4,Session

Kato,S., 1977:Charge-position Problem in Charge Simulation Method for Electric Field Calculation Research Reports of Faculty of Engineering ,Tokyo University-Japan,No.13,Okt.

Murashima,S., and Kuhara,H., 1980.An Approximate Method to Solve Two-Dimensional Laplace's Equation by Means of Superposition of Green's Functions on a Riemann Surface,Journal of Information Processing ,Vol.3 ,No. 3, September: 127-139

Metz,D., 1979. Ein Verfahren zur Feldoptimierung in Hochspannungsanlagen, Diss.RWTH Aachen

Nazareth,L., 1977. A Conjugate Direction Algorithm without Line Searches,Journal of Optimization theory and Applications,Vol.23,No. 3,November: 373-387

Okubo, H. , and Metz,D. ,1978. Vergleichende Feldberechnungen und Optimierung in Elektrodensystemen von Hochspannungsanlagen,Archiv Elektrotechnik 60 : 27-35

Okubo, H., Honda, M., and Menju, S., 1979. Calculation error and the field discretisation of finite element method,ISH MILAN ,No.11.05

Okubo,H.,Ikeda,M., and Honda,M., 1979.Combination method for electric field calculation, ISH MILAN ,No.11.13

Okubo,H., Amemiya,T., and Honda,M., 1979. Borda's profile and electric field optimization by using charge simulation method,ISH MILAN ,No.11.16

Okubo,H.,Ikeda,M., Honda,M., and Yanari,T., 1982.Electric Field Analysis by Combination Methods,IEEE ,WM 195-6

Praxl,G.,1978. Berechnung freier Potentiale mittels der Methode der Finiten Elemente,Diss-Technische Universitaet Graz

Reichert,K.,1972. Über Verfahren zur nümerischen Berechnung elektrostatischer Felder,ETZ-A,Bd.93: 338-339

Singer,H.,Steinbigler,H., and Weiss,P., 1974. A charge simulation method for the calculation of high voltage fields,IEEE PES Winter Meeting : 1660-1668

Singer,H., 1974.Berechnung von Hochspannungsfeldern mit Hilfe von Flaechenladungen Habilitationsschrift TU München

Sato,S.,Menju,S.,Sakaki,T.,Aoyagi,K.,and Honda,M., 1979.Electric Field Calculation by Charge Simulation Method using Axi-Spheroidal Charge ,ISH MILAN ,No.11.07

Steinbigler,H., 1979. Combined application of finite method and charge simulation method for the computation of the electric fields, ISH MILAN, No.11.11

Singer,H., and Grafoner,P., 1975. Optimization of electrode and insulator contours, ISH Zürich , Konferenzband: 111-116

Singer,H.,1979.Computation of optimized electrode geometries, ISH MILAN , No. 11.06

Slater,L.J., 1961. Regression Analysis,The Computer Journal,Vol.4, No.1,April.

Spielrein,J.,1915. Geometrisches zur elektrischen Festigkeitsrechnung,Archiv für Elektrotechnik 4 : 78-85

Spielrein,J., 1917.Geometrisches zur elektrischen Festigkeitsrechnung II,Archiv für Elektrotechnik 244-254

Utmischi,D.,1979. Charge substitution Method for Three-Dimensional High Voltage Fields, ISH MILAN

Veverka,A.,1979. Electrical Field with Space Charge,ISH MILAN ,No. 11.17

Weiss,P.,1969. Berechnung von Zweistoffdielektrika, ETZ-A Bd. 90 , S.693 - 694

Yializis,A. ,Kuffel,E. and Alexander, P.H. , 1978. An optimized charge simulation method for the calculation of high voltage fields,IEEE PES Winter Meeting ,New York, NY ,USA, 29th January -3rd February , S. 2434 - 2440

Zienkiewicz,O.C., 1971. The finite element method in engineering science,London, Mc - Graw Hill

Ö Z G E Ç M İ Ş

Doğum Tarih : 4-7-1967
Doğum Yeri : İstanbul
İlkokul : 1973-1978 Fethiye-İstanbul
Ortaokul : 1978-1981 Ahmet Rasim-İstanbul
Lise : 1981-1984 Pertevniyal-İstanbul
Üniversite : 1984-1988 Yıldız Teknik Üniversitesi (Y.T.Ü.)-İstanbul-Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans : 1988-1990 Y.T.Ü.- Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Ana Bilim Dalı
Askerlik : 1990-1991 Deniz Harp Okulu-İstanbul
Araştırma Görevlisi : 1989' dan beri Y.T.Ü.-Elektrik Mühendisliği Bölümü Başkanlığı
Doktora : 1992'den beri Y.T.Ü.-Fen Bilimleri Enstitüsü

TC. YATIRIM MENKUL DEĞERLER A.Ş. YATIRIM KURULU
MÜDÜRLÜĞÜ
MÜHÜR

