

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MANYETİK ALANIN KISMİ BOŞALMAYA ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Uğur AKTEPE

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

ARALIK 2016

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MANYETİK ALANIN KISMİ BOŞALMAYA ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Uğur AKTEPE
(504141029)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Şükran Emel ÖNAL

ARALIK 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504141029 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Uğur AKTEPE, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “MANYETİK ALANIN KISMİ BOŞALMAYA ETKİSİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Şükran Emel ÖNAL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Gökhan GÖKMEN
Marmara Üniversitesi

Teslim Tarihi : 25 Kasım 2016
Savunma Tarihi : 20 Aralık 2016

Sevgili aileme,

ÖNSÖZ

Öncelikle, sadece lisans ve yüksek lisans bitirmelerimde değil, bana her zaman her konuda yardımcı olan sevgili hocam Doç. Dr. Şükran Emel Önal'a çok teşekkür ederim. Ayrıca çalışmalarımda aklıma bir konu takıldığında, sorunlar ortaya çıktığında çözümler üreten veya önerilere ihtiyaç duyduğumda benimle bilgilerini sabırla paylaşan Prof. Dr. Özcan Kalenderli'ye çok teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca iyi bir mühendis olma konusunda bana çok şey katan tüm İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü akademik personeline çok teşekkür ederim.

Son olarak beni her konuda destekleyen ve her zaman yanımda olan aileme teşekkür ederim.

Kasım 2016

Uğur Aktepe
(Elektrik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xi
SEMBOLLER.....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY.....	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı.....	2
1.2 Literatür Araştırması	2
1.3 Hipotez.....	4
2. ELEKTRİKSEL BOŞALMALAR	5
2.1 Elektriksel Boşalmaların Sınıflandırılması	5
2.1.1 Tam boşalmalar	6
2.1.2 Kısmi boşalmalar	6
2.1.2.1 İç kısmi boşalmalar	6
2.1.2.2 Yüzeysel boşalmalar	7
2.1.2.3 Korona boşalmaları	8
2.1.2.4 Elektriksel ağaçlanma	8
2.2 Korona	9
2.2.1 Negatif korona.....	9
2.2.2 Pozitif korona	10
2.2.3 Alternatif gerilimde korona.....	11
2.3 Boşalma Sinyallerinin Belirlenmesi	11
2.4 Kısmi Boşalma Başlangıç Gerilimi	12
2.5 Kısmi Boşalmada Manyetik Alan	12
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	15
3.1 Kısmi Boşalma Sinyallerinin Elde Edilmesi.....	15
3.2 Kısmi Boşalma Sinyallerinin Ölçülmesi	20
3.2.1 Manyetik alansız durumda KB başlangıç geriliminin ölçülmesi	22
3.2.2 Manyetik alansız durumda n-q-p deneyleri	28
3.3 Manyetik Alanın Elde Edilmesi	29
3.4 Manyetik Alanın Ölçülmesi.....	31
3.5 Manyetik Alanlı Durumda Kısmi Boşalma Sinyallerinin Elde Edilmesi.....	33
3.5.1 Manyetik alanlı durumda KB başlangıç geriliminin ölçülmesi	34
3.5.2 Manyetik alanlı durumda n-q-p deneyleri	38
4. VERİLERİN ANALİZİ	41
4.1 Manyetik Alanın Kısmi Boşalma Başlangıç Gerilimine Etkisi	42
4.2 N-q-p Analizi	52

4.3 Sonlu Elemanlar Analizi	74
4.3.1 Elektrik alan analizi.....	75
4.3.2 Manyetik alan analizi	78
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	87
KAYNAKLAR.....	89
ÖZGEÇMİŞ.....	91

KISALTMALAR

AA	: Alternatif Akım
DA	: Doğru Akım
FEMM	: Finite Element Method Magnetics
KB	: Kısmi Boşalma
N-Q-P	: Pulse Count-Charge-Phase Degree
YG	: Yüksek Gerilim

SEMBOLLER

B	: Manyetik akı yoğunluğu
E	: Elektrik alan vektörü
E_{max}	: Maksimum elektrik alan şiddeti
F_e	: Elektrik alan tarafından uygulanan kuvvet
F_m	: Manyetik alan tarafından uygulanan kuvvet
H	: Manyetik alan şiddeti
q	: Elektriksel yük
v	: Hız vektörü
ε_r	: Bağıl dielektrik katsayısı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Manyetik alansız durumda 30 mm düşey, 10 mm yatay açıklık için KB başlangıç gerilimi deney verilerinin bir kısmı.	25
Çizelge 3.2 : Manyetik alansız durumda 35 mm düşey, 10 mm yatay açıklık için KB başlangıç gerilimi deney verilerinin bir kısmı.	25
Çizelge 3.3 : Manyetik alansız durumda 40 mm düşey, 15 mm yatay açıklık için KB başlangıç gerilimi deney verilerinin bir kısmı.	26
Çizelge 3.4 : Manyetik alansız durumda üç düşey ve beş yatay açıklık için yapılan deneylerde bulunan KB başlangıç gerilimi değerleri.	27
Çizelge 3.5 : Mıknatıslar için Gaussmetre ile farklı açıklıklarda manyetik akı yoğunluğu ölçüm sonuçları.	32
Çizelge 3.6 : Manyetik alanlı durumda 30 mm düşey, 10 mm yatay açıklık için KB başlangıç gerilimi deney verilerinin bir kısmı.	35
Çizelge 3.7 : Manyetik alanlı durumda 35 mm düşey, 20 mm yatay açıklık için KB başlangıç gerilimi deney verilerinin bir kısmı.	36
Çizelge 3.8 : Manyetik alanlı durumda 40 mm düşey, 15 mm yatay açıklık için KB başlangıç gerilimi deney verilerinin bir kısmı.	36
Çizelge 3.9 : Manyetik alanlı durumda üç yatay ve düşey açıklık için yapılan deneylerde bulunan KB başlangıç gerilimi değerleri.	37
Çizelge 3.10 : Manyetik alansız durumda bulunan on beş KB başlangıç geriliminin %10 arttırılmış değerleri.	39
Çizelge 4.1 : Kısmi boşalma başlangıç gerilimi bulma deneylerinin sonuçları.	42
Çizelge 4.2 : FEMM programında çizilen şekiller için bulunan E_{max} değerleri.	78
Çizelge 4.3 : FEMM programından beş nokta için bulunan B ve H değerleri.	80
Çizelge 4.4 : FEMM programında dikdörtgen mıknatısların ortasındaki elektrot ucu için bulunan B ve H değerleri.	85

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : İç kısmi boşalmalar.	7
Şekil 2.2 : Yüzeysel boşalma.	7
Şekil 2.3 : Korona boşalması.	8
Şekil 2.4 : Elektriksel ağaçlanma.	9
Şekil 2.5 : Negatif korona.	10
Şekil 2.6 : Pozitif korona.	10
Şekil 2.7 : Alternatif gerilimde (a) sadece negatif yarı dalgada korona (b) iki yarı dalgada da korona.	11
Şekil 2.8 : Manyetik alanın kısmi boşalmaya etkisinin incelenmesi için kullanılan deney düzeneği [6].	13
Şekil 3.1 : Yüksek alternatif gerilim üretim düzeneğinin şeması.	15
Şekil 3.2 : Yüksek alternatif gerilim üretim düzeneği.	16
Şekil 3.3 : 50 Hz, 5 kVA, 0,220/100 kV YG deney transformatörü.	16
Şekil 3.4 : 50 kΩ, 125 W ön direnç.	17
Şekil 3.5 : 100 pF, 100 kV YG kondansatörü.	17
Şekil 3.6 : Çubuk – düzlem elektrot sistemi.	18
Şekil 3.7 : Elektrot sistemi ve ayarlanabilir pleksi cam kap.	19
Şekil 3.8 : Kumanda masası ve voltmetre bölümü.	19
Şekil 3.9 : Kısmi boşalma ölçüm deney düzeneği.	20
Şekil 3.10 : 1 nF, 50 kV, 50/60 Hz değerlerine sahip kuplaj kondansatörü.	21
Şekil 3.11 : Haefely marka DDX-9121 model kısmi boşalma ölçüm cihazı.	21
Şekil 3.12 : Haefely DDX-9121'in bilgisayarla bağlantısı.	21
Şekil 3.13 : Haefely DDX-9121'in programının ana ekran görüntüsü.	22
Şekil 3.14 : 30 mm elektrot ve 10 mm yatay açıklık için çubuk-düzlem model.	23
Şekil 3.15 : Deneylerde kullanılan elektrotlar.	23
Şekil 3.16 : Manyetik alansız durumda 30 mm düşey, 10 mm yatay açıklık için KB başlangıç gerilimini belirleme deney verilerinden bir kısmının ekran görüntüsü.	24
Şekil 3.17 : Manyetik alansız durumda 30 mm düşey, 10 mm yatay açıklık deneyi için gerilim - zaman grafiği.	27
Şekil 3.18 : Manyetik alansız durumda 30 mm düşey, 10 mm yatay açıklık deneyi için boşalma genliği - zaman grafiği.	28
Şekil 3.19 : Haefely DDX-9121'in n-q-p deney ekranı.	29
Şekil 3.20 : Neodyum silindir mıknatıs çap 20 mm, kalınlık 10 mm.	29
Şekil 3.21 : Neodyum silindir mıknatısların çubuk elektrotla durumlarını gösteren 3 boyutlu model.	30
Şekil 3.22 : Neodyum dikdörtgen mıknatıs uzunluk 40 mm, genişlik 20 mm ve kalınlık 10 mm.	30
Şekil 3.23 : Neodyum dikdörtgen mıknatısların çubuk elektrotla durumlarını gösteren 3 boyutlu model.	31

Şekil 3.24 : Manyetik alan ölçüm cihazı (Gaussmetre).	31
Şekil 3.25 : Mıknatıslar arası mesafe ile B değişimi.....	32
Şekil 3.26 : Manyetik alanlı durumda kısmi boşalma üretimi deney düzeneği.....	33
Şekil 3.27 : Çubuk-düzlem elektrot sistemine mıknatısların eklendiği durum modeli.	34
Şekil 3.28 : Manyetik alanlı durumda 30 mm düşey, 10 mm yatay açıklık deneyi gerilim - zaman grafiği.	38
Şekil 3.29 : Manyetik alanlı durumda 30 mm düşey, 10 mm yatay açıklık deneyi boşalma genliği - zaman grafiği.....	38
Şekil 4.1 : 30 mm elektrot açıklığı için KB başlangıç gerilim değerlerinin farklı açıklıklardaki silindirik mıknatıslarla değişimi.	43
Şekil 4.2 : 35 mm elektrot açıklığı için KB başlangıç gerilim değerlerinin farklı açıklıklardaki silindirik mıknatıslarla değişimi.	44
Şekil 4.3 : 40 mm elektrot açıklığı için KB başlangıç gerilim değerlerinin farklı açıklıklardaki silindirik mıknatıslarla değişimi.	44
Şekil 4.4 : 10 mm kap açıklığı için KB başlangıç gerilim değerlerinin farklı elektrot açıklıklarındaki değişimi.	45
Şekil 4.5 : 15 mm kap açıklığı için KB başlangıç gerilim değerlerinin farklı elektrot açıklıklarındaki değişimi.	46
Şekil 4.6 : 20 mm kap açıklığı için KB başlangıç gerilim değerlerinin farklı elektrot açıklıklarındaki değişimi.	46
Şekil 4.7 : 25 mm kap açıklığı için KB başlangıç gerilim değerlerinin farklı elektrot açıklıklarındaki değişimi.	47
Şekil 4.8 : 30 mm kap açıklığı için KB başlangıç gerilim değerlerinin farklı elektrot açıklıklarındaki değişimi.	47
Şekil 4.9 : 30 mm elektrot açıklığı için KB başlangıç gerilim değerlerinin farklı açıklıklardaki dikdörtgen mıknatıslarla değişimi.	48
Şekil 4.10 : 30 mm elektrot açıklığında KB başlangıç gerilimi değerinin farklı manyetik akı yoğunluğu değerlerinde azalma yüzdesi.	49
Şekil 4.11 : 35 mm elektrot açıklığında KB başlangıç gerilimi değerinin farklı manyetik akı yoğunluğu değerlerinde azalma yüzdesi.	50
Şekil 4.12 : 40 mm elektrot açıklığında KB başlangıç gerilimi değerinin farklı manyetik akı yoğunluğu değerlerinde azalma yüzdesi.	50
Şekil 4.13 : 30 mm kap açıklığı için KB başlangıç gerilim değerlerinin farklı elektrot açıklıklarındaki değişimi.	51
Şekil 4.14 : Manyetik alan yok, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 10 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (385 pC).....	52
Şekil 4.15 : Manyetik alan var, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 10 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (385 pC).....	53
Şekil 4.16 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 10 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (385 pC).	54
Şekil 4.17 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 10 mm durumu için 3 boyutlu n-q-p grafiği (385 pC).	55
Şekil 4.18 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 15 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (684 pC).	56
Şekil 4.19 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 15 mm durumu için 3 boyutlu n-q-p grafiği (684 pC).	56
Şekil 4.20 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 20 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (684 pC).	57

[illegible]

Şekil 4.46 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 10 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (385 pC).	71
Şekil 4.47 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 10 mm durumu için 3 boyutlu n-q-p grafiği (385 pC).	71
Şekil 4.48 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 20 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (1220 pC).	72
Şekil 4.49 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 20 mm durumu için 3 boyutlu n-q-p grafiği (1220 pC).	72
Şekil 4.50 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 25 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (1220 pC).	73
Şekil 4.51 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 25 mm durumu için 3 boyutlu n-q-p grafiği (1220 pC).	73
Şekil 4.52 : Elektrot açıklığı 30 mm, kap açıklığı 10 mm durumu için çizilen çubuk-düzlem elektrot sistemi.	75
Şekil 4.53 : Çubuk-düzlem elektrot sisteminde 30 mm elektrot açıklığı, 10 mm kap açıklığı durumu için elektrik alan dağılımı.	76
Şekil 4.54 : Şekil 4.53'deki çubuk elektrodun yaklaşmış şekli.	76
Şekil 4.55 : Elektrot açıklığı 40 mm, kap açıklığı 10 mm durumu için çizilen çubuk-düzlem elektrot sistemi.	77
Şekil 4.56 : Çubuk-düzlem elektrot sisteminde 40 mm elektrot açıklığı, 10 mm kap açıklığı durumu için elektrik alan dağılımı.	77
Şekil 4.57 : Neodyum silindir mıknatısa ait çizilen model.	79
Şekil 4.58 : Neodyum silindir mıknatısa ait alan dağılımı.	79
Şekil 4.59 : Neodyum silindir mıknatısına ait beş noktada alan dağılımı.	80
Şekil 4.60 : Silindir mıknatıs yüzeyinden uzakta bulunan beş noktada B değişimi. .	81
Şekil 4.61 : Silindir mıknatıs yüzeyinden uzakta bulunan beş noktada H değişimi. .	81
Şekil 4.62 : İki dikdörtgen mıknatıs için FEMM programında yapılan çizim (mıknatıslar arası mesafe 10 mm).	82
Şekil 4.63 : Dikdörtgen mıknatıslar için yapılan çizime ait manyetik alan dağılımı (mıknatıslar arası mesafe 10 mm).	83
Şekil 4.64 : 20 mm mıknatıs açıklığına ait manyetik alan dağılımı.	83
Şekil 4.65 : 25 mm mıknatıs açıklığına ait manyetik alan dağılımı.	84
Şekil 4.66 : Dikdörtgen mıknatıslarda çubuk elektrodun uç kısmının konumu.	84
Şekil 4.67 : Neodyum dikdörtgen mıknatıslar arası üç uzaklık durumu için manyetik akı yoğunluğu değişimi.	85
Şekil 4.68 : Neodyum dikdörtgen mıknatıslar arası üç uzaklık durumu için manyetik alan şiddeti değişimi.	86

MANYETİK ALANIN KISMİ BOŞALMAYA ETKİSİ

ÖZET

Elektriğin sorunsuz ve verimli bir şekilde üretilmesi, dağıtılması, iletilmesi elektrik mühendisliğinin önemli konularından biridir. Elektrik sisteminin kararlılığı özellikle sistemde kullanılan yüksek gerilim elemanlarının durumlarıyla ilişkilidir. Sistemde kullanılan yüksek gerilim elemanlarında ortaya çıkabilecek sorunlar sistemin kararlılığını etkileyerek sistemden istenilen verimin alınamamasına neden olur. Bu şekilde sistemdeki elemanlar için sorun çıkarabilecek olaylardan biri elektriksel boşalmalardır.

Elektriksel boşalmalar geçmişten beri önemini koruyan bir konudur. Elektriksel boşalmalar kısaca “yük veya elektrikten kurtulma” olarak tanımlanır. Elektriksel boşalmalar yalıtkanlarda gerçekleşmektedir. Yalıtkan malzemeler normal koşullarda elektrik akımını iletmezler. Yalıtkan malzemenin elektriği iletir hale geçtiği durum olarak adlandırılan elektriksel boşalmalar iki grupta (tam ve kısmi boşalmalar) incelenmektedir.

Gerçekleştirilen tez çalışmasında kısmi boşalma sinyalleri incelenmiş ve deneyler yapılmıştır. Kısmi boşalmalar belirli bir bölgede meydana gelen ve yalıtımı kısmen köprüleyen elektriksel boşalmalardır. Tam boşalma olayı bir elektrik sisteminin performansını kötü yönde etkileyerek sistemde düzeltilemeyecek arızalara neden olabilmektedir. Bu yüzden tam boşalma olayını gerçekleştirmeden önlemek için kısmi boşalma ölçümleri yapılmaktadır. Böylece arızalar daha oluşmadan sorun belirlenmektedir.

Kısmi boşalma konusu ile ilgili geçmişten bugüne birçok çalışma yapılmıştır. Bu tez çalışmasında manyetik alanın kısmi boşalma sinyallerine etkileri gerekli deney düzenekleri hazırlanarak araştırılmıştır. Gerçekleştirilen çalışma için çubuk-düzlem elektrot sistemi ve bu elektrot sisteminde 30 mm, 35 mm, 40 mm elektrot açıklıkları deney için seçilmiştir. Manyetik alan üretimi için 20 mm çap ve 10 mm kalınlık değerlerine sahip iki adet Neodyum silindir mıknatıs kullanılmıştır. Mıknatıs aralıkları pleksiglas bir kap yardımıyla 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm ve 30 mm olarak ayarlanarak manyetik alanın değiştirilmesi sağlanmıştır. Ayrıca 40 mm uzunluk, 10 mm genişlik ve 20 mm kalınlığa sahip iki adet Neodyum dikdörtgen mıknatıs da 30 mm elektrot açıklığında ve üç farklı kap açıklığı için deneylerde manyetik alan üretmek amacıyla kullanılmıştır.

DeneySEL çalışmalar iki ana başlıkta özetlenebilmektedir. İlk önce sistemde manyetik alan yokken üç farklı elektrot ve beş farklı pleksiglas kap açıklığı için kısmi boşalma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerin verileri Haefely marka DDX-9121 model kısmi boşalma ölçüm cihazı ve bilgisayar yardımıyla kaydedilmiştir. Deneyde alınan veriler kısmi boşalma başlangıç gerilimi ve kısmi boşalma sinyalinin fazı, boşalma genliği ve sayısı ile ilgilidir. Manyetik alanın olmadığı durum için elde edilen veriler kaydedildikten sonra aynı sisteme silindir

mıknatıslar dahil edilerek manyetik alanlı durum oluşturulmuştur. Manyetik alansız durumda gerçekleştirilen aynı deneyler bu sefer değişen manyetik alan durumu için tekrarlanmıştır. Silindir mıknatıslarla ilgili deneyler tamamlandıktan sonra dikdörtgen mıknatıslar üç kap açıklığı için kullanılmıştır. Veriler ve ölçümler alındıktan sonra bunların analiz kısmına geçilmiştir.

Elde edilen verilerin analizinde öncelikle kısmi boşalmanın başlangıç gerilimine olan etki araştırılmıştır. Manyetik alan varlığının kısmi boşalma başlangıç gerilimine etkisini incelemek için yatay ve düşeyde aynı açıklık değerleri için manyetik alan yokken bulunan veriler ile manyetik alan varlığında bulunan veriler birbirleriyle kıyaslanmıştır. İlk önce manyetik alansız durumda elde edilen on beş veriyle silindir mıknatıslarla oluşturulmuş manyetik alan varlığında elde edilen on beş veri aynı açıklıklar için kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamalar grafikler verilerek yapılmıştır. Manyetik alanın kısmi boşalma başlangıç gerilimini ne şekilde ve hangi oranda etkilediği belirlenmiştir. Silindir mıknatıslar için yapılan benzer kıyaslamalar daha sonra dikdörtgen mıknatıslar içinde yapılmıştır.

İkinci olarak n-q-p analizi gerçekleştirilmiştir. N-q-p analizi kısmi boşalmanın karakteristiği hakkında birçok bilgi içermesi bakımından önemlidir. Bu analiz sayesinde manyetik alanın kısmi boşalmaya etkisi 2 ve 3 boyutlu grafiklerle faz, boşalma genliği ve boşalma darbe sayısı bakımından karşılaştırılarak incelenmiştir. N-q-p analizinde öncelikle silindir mıknatısların oluşturduğu manyetik alanların, manyetik alansız durumdaki n-q-p verilerine etkileri farklı açıklıklar için incelenmiştir. Daha sonra benzer analiz dikdörtgen mıknatısların kullanıldığı durumlarla, manyetik alansız durumlar arasında yapılmıştır.

En son analizde oluşturulan sistemlerdeki manyetik ve elektrik alan dağılımları ayrı ayrı incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemine dayanan FEMM programı yardımı ile deneylerde oluşturulmuş sistemler modellenerek bunların elektrik ve manyetik alan dağılımları ayrı ayrı bulunmuştur.

Yapılan deneyler ve deneylerden elde edilen verilerin incelenmesi sonucunda kısmi boşalma sinyallerinin manyetik alan varlığından etkilendiği görülmüştür. Özellikle yapılan çalışma sonucu kısmi boşalma başlangıç geriliminde ve n-q-p verilerinde meydana gelen değişimler ortaya konulmuştur. Manyetik akı yoğunluğunun büyük olduğu durumlarda kısmi boşalma başlangıç geriliminde azalmalar ve n-q-p verilerindeki değişimler daha net görülmüştür. Ayrıca elektrot açıklığı arttıkça kısmi boşalma başlangıç geriliminin de arttığı, Neodyum mıknatıslar arası mesafe arttıkça ürettikleri manyetik akı yoğunluğu değerlerinin de azaldığı yapılan çalışma sonucunda belirlenmiştir.

THE EFFECT OF MAGNETIC FIELD ON PARTIAL DISCHARGE

SUMMARY

Efficient generation, transmission and distribution of electricity is one of the important issues of electrical engineering. The stability of the electrical system is related to the state of high voltage components used in system. Problems that may arise in high voltage components can affect the stability of the system and this will lead system not to get desired efficiency. One of the events that can cause problems for the components of system is electrical discharges.

Electrical discharges are a matter of importance since the past. Electrical discharges are briefly referred to as "relief from charge or electricity". Electrical discharges occur in insulators. Insulating materials do not conduct electrical current under normal conditions. The electrical discharges which is the state in which the insulating material becomes electrically conductive are studied in two groups (complete and partial discharges).

When voltage is applied to the dielectrics, various events occur. If the applied voltage is low, small currents flow through the electrodes and the insulation loses its electrical properties. If, on the other hand, a large voltage is applied, the flow of current in the insulation starts to increase sharply and the breakdown event takes place. During breakdown, a strong conductive spark is generated and it produces a short circuit between the electrodes.

Partial discharge is electrical discharge which does not fully bridge the insulation. Partial discharge is called as a localized dielectric breakdown. Although partial discharges are usually small in size, they can cause growth problems and can cause the material to deteriorate. Partial discharge is a generic term for discharge events that are not completely realized. The concept of partial discharge includes different groups. These groups can be examined in internal discharges, surface discharges, corona discharges and electrical treeing.

Problems may arise in HV components due to electrical discharges. Due to failures in the insulation system, costly and time consuming maintenance is required. Therefore, the determination of partial discharges and the analysis of partial discharge data are very important in preventing the problems that may occur in the insulation system. In this case, the number of maintenance that is time consuming and costly is reduced. Electrical and non-electrical methods are available for determining electrical discharges.

Partial discharge signals were studied in the thesis and in this subject experiments were carried out. Partial discharges are electrical discharges that flow into a particular region and partly bridge the insulation. Partial discharge affects the performance of an electrical system in a bad way which can cause irreparable damage to the system. Therefore, partial discharge measurements are made to

prevent partial discharge from occurring. Thus, the problem is determined before failures occur.

A lot of study has been done from the past on the subject of partial discharge. Although there are many studies on partial discharge concept, there are few studies on the effect of the magnetic field. In this thesis study the effects of the magnetic field on the partial discharge signals were investigated.

Firstly, the electrode system to be used in the experiment was determined. The rod-plane electrode system was selected to form and the test setup was established. Three different electrode gap spacings were selected which are 30 mm, 35 mm and 40 mm. By selecting these electrode gap spacings, partial discharge analysis can be performed more safely without breakdown. The rod electrode used in the experiments is 67 mm long, 2 mm thick and chrome plated. In addition, the radius of the tip of the rod electrode is 1 mm. The plane electrode is 10 mm thick, 75 mm in diameter and has a radius of curvature of 3 mm.

Secondly, the high voltage test system to be applied to the selected electrode system was set in two different way. A high voltage test transformer, a resistor and a capacitive voltage divider are used to apply high alternating voltage to the electrode system. On the plane electrode, plexiglass box with adjustable range was placed. The plexiglass box used for the magnetic field setup was also used in this setup to be identical. Plexiglass box thickness is 3 mm. The distance between the two outer surfaces of the plexiglass to be used in the experiment was selected as 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm and 30 mm. The electrical measurement was carried out by means of a partial discharge measuring device (Haefely DDX-9121) and a computer via a coupling capacitor connected in parallel with the high alternating voltage generation test system.

Two types of tests were carried out after the initial test setup was determined and connections were completed. First 30 mm vertical (electrode) and 10 mm horizontal gap spacings (plexiglass box) were set in the test setup. High alternating voltage started to apply gradually to the electrode system starting from zero by control panel. The partial discharge data was saved to the computer for every second that passed in the experiment by the software of Haefely DDX-9121. Partial discharge inception voltage for these gap spacings was found by recorded data. The voltage at which the permanent partial discharge first appears is taken as the inception voltage. The inception voltage value of the partial discharge is noted for comparison to the case where the magnetic field is applied at the same gap spacings values. With this test performed, the time, voltage and pC value of the partial discharge are recorded in a list. Also, time-voltage and time-discharge magnitude graphs are taken from test reports. After completion of the first test, experiments were carried out for 35 and 40 mm electrode openings with 10 mm horizontal gap fixed. Thus, three partial discharge inception voltage values were obtained for 10 mm horizontal opening. Similar tests for three vertical openings were also made for 15 mm, 20 mm, 25 mm and 30 mm horizontal openings. As a result, fifteen partial discharge inception voltage values were found in the case of no magnetic field.

Two neodymium cylindrical magnets were added to the system after the fifteen partial discharge inception voltage obtained in the absence of the magnetic field. Cylindrical magnets were added to the plexiglass box to create a changing magnetic field for five openings. Cylindrical magnets were also used for horizontal spacings of 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm and vertical spacings of 30 mm, 35 mm,

40 mm. So that comparison can be made between the results obtained in the case of no magnetic field. After the tests with the cylindrical magnets were completed, fifteen partial discharge inception voltage values were obtained. After the tests of the cylindrical magnets were completed, two neodymium rectangular magnets were placed in the plexiglass box to create the magnetic field. Rectangular magnets were only used in tests for 30 mm electrode gap spacings and three horizontal openings.

The second test that the partial discharge measurement device can perform is n-q-p analysis. The n-q-p data tells a lot about partial discharge phenomenon. N-q-p can be called as frequency of occurrence against magnitude and phase. The recorded n-q-p data can be used to determine the type of partial discharge. N-q-p tests were also performed when partial discharge inception voltage finding tests were performed. With the feature of the partial discharge measurement device, two and three dimensional n-q-p graphics were obtained for both magnetic field and non-magnetic field situations. The n-q-p data for the case with and without the magnetic field with the same horizontal and vertical openings are given in the same graphic and compared. First of all, this comparison was made for fifteen data that cylindrical magnets were used and not used. Later, comparative graphs of the three cases in which the rectangular magnets are used are given. The graphs obtained by n-q-p tests are given in the analysis section.

In the analysis part, the data obtained from the tests performed were examined. Firstly, the effects of the magnetic field on the partial discharge inception voltage were investigated. Fifteen data obtained in the case of no magnetic field for three vertical and five horizontal openings and fifteen data obtained in the presence of magnetic field using cylindrical magnets were compared in terms of partial discharge inception voltage in graphs. When the obtained graphs are examined, it is found that the presence of the magnetic field lowers the value of the partial discharge inception voltage. Since the magnetic flux density is greatest when the distance between the magnets is the smallest, the greatest effect is seen in the horizontal opening of 10 mm. As the distance between the magnets increases, the magnetic flux density decreases, so the effect on the partial discharge starting voltage also decreases. The percentage reduction in the partial discharge inception voltage values was also determined by changing the magnetic flux density values. The largest decrease in the percentage of the partial discharge inception voltage value was found to be the value at which the magnetic flux density was the greatest. Similar studies have been carried out for the three data obtained in the case of magnetic field generated by rectangular magnets and in the case of no magnetic field.

Secondly, n-q-p analysis was performed in the analysis section. Where the n-q-p data obtained in the absence of the magnetic field and the n-q-p data obtained in the presence of the magnetic field are compared in two and three dimensions in the same graphs. As a result of the comparison, it was determined that the presence of the magnetic field widens the phase angles and shifts, causes the increase in the discharge magnitude, and causes an increase in the discharge numbers. These changes were seen in both positive and negative half-waves. These comparisons were made separately within the two magnet types used in the experiment.

In the final analysis, the magnetic and electric fields generated in the experiments have been investigated. The FEMM program based on the finite element method was used to model the systems created in the experiments and their electric and magnetic field distributions were found separately. Magnetic flux density and magnetic field

strength values were found for the cylinders and rectangular magnets in the FEMM program and compared in different gap spacings.

As a result of the thesis study, it was found that the partial discharge signals were affected by the magnetic field presence. In particular, values at which the magnetic flux density is large show reductions in partial discharge inception voltage and changes in the n-q-p data. Furthermore, as the electrode gap spacings increased, increases in partial discharge inception voltage values were also determined as the end result of the experiments.

1. GİRİŞ

Yüksek gerilim (YG), elektrik enerjisinin iletilmesi ve dağıtılmasında çok büyük önem taşımaktadır. Yüksek gerilim kullanılması sayesinde enerji kayıpları en aza inmektedir. YG bu açıdan avantaj sağlasa da YG’de önemli bir problem olan yalıtım sorunları ile karşılaşilmektedir [1].

Güç elemanları yüksek gerilimlerde çalıştığı için elektriksel yalıtım bu sistemin çok önemli bir parçası olarak görülmektedir. Bir yalıtım sistemi uzun yıllar kullanıldığı için ister istemez çeşitli mekanik, termal ve elektriksel zorlamalara maruz kalır ve bu durumun etkisi yıllar içerisinde birikerek yalıtım sistemindeki elemanların bozulmasına yol açar [2]. Bu tip elemanlardaki arızanın bulunması ilk zamanlarda klasik yöntem olan elemanların çalışmaz durumdayken düzenli bakımlarının yapılmasıyla gerçekleştirilmiştir ve yıllar içinde çalışır durumdaki elemanları izleyebilen, bir arızayı gerçekleşmeden önce tespit edebilen özelliklere sahip bir sistem ihtiyacı duyulmuştur.

Yalıtımda bir arıza gerçekleştiğinde, nedenine bakılmaksızın, yalıtım içinde küçük elektriksel kıvılcımlar oluşur ki bunlar kısmi boşalma olarak adlandırılır [3]. YG yalıtım sistemlerindeki kısmi boşalma olayı sistem çalışır durumdayken zorlanmalardan dolayı gerçekleşmektedir. Kısmi boşalma olayı gerçekleştiyse bu olayın kendisi ciddi bir zorlamadır ve bu olay malzemede değişikliklere, sistemde bozulmaya yol açmaktadır [4]. Bu nedenle yalıtım arızalarını belirlemek önemlidir. Yalıtım arızalarının en iyi göstergesinin yalıtım malzemesinde gerçekleşen kısmi boşalma olayının düzeyi olduğu bazı çalışmalarda belirtilmiştir [2].

Güç sistemlerinde yalıtım durumunun belirlenmesinin önemli yöntemlerinden biri kısmi boşalma olayı ile oluşan elektrik sinyallerinin izlenmesidir [4]. Kısmi boşalma ölçümlerinin yalıtım elemanları çalışır durumdayken veya yalıtım elemanlarının üretimleri esnasında izlenmesi konularında etkili bir tanı aracı olduğu genel kabul görmüştür [5]. Kısmi boşalma ölçümü güç transformatörleri, kablolar ve geçit

izolatörleri gibi YG elektriksel yalıtım sistemlerinin sağlamlığıyla ilgili bilgi sağlayan önemli bir tanı aracıdır [6].

Kısmi boşalmalar analiz edilirken arızanın hangi tip boşalmaya sahip olduğunu bulmak için faz ayrışmalı kısmi boşalma modeli kullanılabilir. İki ve üç boyutlu faz ayrışmalı model kullanılarak istatistiksel analizle kısmi boşalmanın tipi bulunabilir [7]. Bu model kullanılarak manyetik alanın kısmi boşalma üzerine etkisi de incelenebilir. Manyetik alanın kısmi boşalma üzerinde hangi büyüklüklerde ve ne derece etkili olduğu n-q-p analizi ile araştırılabilir [4].

1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı manyetik alanın kısmi boşalma olayı üzerine etkisinin incelenmesidir. Bu incelemenin yapılabilmesi için uygun deney koşullarının sağlanması, manyetik alan üretilerek manyetik alanın olmadığı durumla kısmi boşalmanın başlangıç gerilimi ve n-q-p değerleri açısından karşılaştırılması amaçlanmıştır. Elde edilecek deneysel verilerin analiz edilerek kıyaslamaların detaylandırılması hedeflenmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Kısmi boşalma üzerine yapılan çalışmalarda eskiden beri genellikle elektrik alanın kısmi boşalmaya etkisi incelenmiştir. Elektrik alan ile kısmi boşalma konusunda sayısız çalışma bulunurken, manyetik alan ile kısmi boşalma konusunda bu kadar çalışma bulunmamaktadır. Manyetik alanın kısmi boşalma üzerine etkileriyle ilgili ciddi çalışmalar son yıllarda gerçekleştirilmiştir.

70'li yılların sonunda manyetik alanın pozitif korona boşalmaları üzerine etkisi incelenmiştir. Koaksiyel silindirler arasındaki pozitif korona boşalmalarına homojen manyetik alanın etkisi deneysel çalışma ile araştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda manyetik alanın havadaki pozitif korona boşalmasındaki korona akımlarında artışa neden olduğu görülmüştür [8].

Gerçekleştirilen diğer çalışmada çapraz bir DA manyetik alanın tel-silindir tipi termal olmayan bir plazma reaktöründe SO₂ ve CO uzaklaştırma oranı ve boşalma karakteristikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Korona başlangıç gerilimi ve korona boşalma akımının manyetik alanın varlığından oldukça etkilendiği bulunmuştur.

Manyetik alanın korona başlangıç gerilimini düşürdüğü ve korona boşalma akımını arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca manyetik akı yoğunluğunun artmasıyla SO₂ ve CO uzaklaştırma oranının arttığı görülmüştür [9].

Bir diğer çalışmada koronanın ϕ -q-n analizi üzerine manyetik alanın etkisi araştırılmış ve kıyaslamalarla manyetik alanın uygulandığı ve uygulanmadığı durumlar koni-düzlem elektrot sistemi için incelenmiştir. Faz açılarının aralığı, boşalmanın büyüklüğü ve boşalmaların sayısının manyetik alanın yoğunluğuna göre değiştiği gösterilmiştir. Çalışma sonucunda 70mT değerinden büyük manyetik alan değerinin ϕ -q-n parametrelerini ve kısmi boşalma başlangıç değerlerini etkilediği görülmüştür [4].

Manyetik alanın negatif korona akımları üzerine etkileri bir diğer çalışmada açıklanmıştır. Manyetik olarak gelişmiş negatif korona mekanizması, farklı iki manyetik alanın negatif korona boşalma akımına etkilerinin kıyaslanmasıyla çalışılmıştır. Korona boşalmasındaki akımın ortalama elektrik alan şiddetine göre grafiği çizilmiştir [10].

Atmosfer basıncında havadan ozon üretimine sabit bir manyetik alanın etkisi silindrsel elektrot sisteminde negatif korona boşalmaları üzerinden incelenmiştir. Yapılan çalışmada manyetik alanın boşalmanın akım gerilim aralığını genişlettiği ve bunun boşalmayı dengelediği görülmüş. Manyetik alanın maksimum ozon üretim verimini önemli derecede arttırmadığı sonucuna varılmıştır [11].

Bir başka çalışmada anma akımlarından gelen kaçak manyetik akıların elektrik makinelerine etkileri analiz edilmiştir. Kısmi boşalmanın oluşabilir olduğu bölgelerde kaçak manyetik akı yoğunluklarının tespiti için 150 MVA güç trafosunun sonlu eleman modeli kullanılmıştır ve 60-700mT değer aralığı bulunmuştur [12].

Gerçekleştirilen bir diğer çalışmada sivri uç-düzlem koronada çok yüksek frekans ölçümü üzerine alternatif manyetik alanın etkisi araştırılmıştır. Manyetik alanın korona üzerine etkisinin varlığının analizi plazma perspektifi ve hesaplamalarla gösterilmiştir. Yapılan çalışmayla AA bir manyetik alan varlığının çok yüksek frekanslı korona sinyallerini ölçme üzerinde yararlı bir etkisi olduğu bulunmuştur [13].

Yakın zamanda gerçekleştirilen çalışmalardan birinde dışarıdan uygulanan manyetik alanın (128mT kadar) kısmi boşalma parametreleri üzerine etkisi, boyutları bilinen

birkaç boşluklu epoksi reçine için araştırılmıştır. Elde edilen fazlara ayrılmış kısmi boşalma modelinde manyetik alan uygulanmış ve uygulanmamış durumlar için farklar gözlemlenmiş olsa da bunun kusurlu kısım içerisinde sadece Lorentz kuvvetinin yüke etkisine dayandırılmayacağı belirtilmiştir. Yapılan deneylerden boşluk içerisinde manyetik alanın basınç değişimleri gibi diğer değişkenlerle kıyaslandığında onlardan çok büyük etkisi olmadığı görülmüştür [6].

Manyetik alanın güç transformatörlerinde kullanılabilen bitkisel yağdaki delinme ve kısmi boşalma karakteristiklerine etkisi yapılan son çalışmalardan birinde incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlara göre dışarıdan uygulanan DA manyetik alanın yağdaki kısmi boşalma olayını önemli derecede etkilediği görülmüştür. DA manyetik alanın şiddeti arttırıldığında kısmi boşalma başlama gerilimi azalmıştır. [14].

1.3 Hipotez

Çalışmada seçilen bir elektrot sistemi için uygun bir manyetik alan üretimi düzeneği hazırlanmış ve bu manyetik alan değerleri Gaussmetre yardımıyla belirlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak üretilmiş olan manyetik alan dağılımı bulunmuş ve bu dağılım sistemi nasıl etkilediği incelenmiştir.

Beş farklı açıklık için iki adet silindir mıknatıs kullanılarak manyetik alanın değeri ve dağılımı değiştirilmiştir. Daha sonra dikdörtgen mıknatıslarda üç açıklık için benzer çalışma yapılmıştır. Bunların kısmi boşalmaya etkileri Haefely DDX-9121 ve cihazın bilgisayarla bağlantısının yardımıyla kaydedilerek manyetik alanın olmadığı durumla kıyaslanmıştır.

Üç farklı elektrot açıklığı kullanılarak manyetik alanın varlığının elektrot açıklığına etkisi araştırılmıştır. Ayrıca elektrot açıklığı arttıkça kısmi boşalma başlangıç geriliminin ne şekilde değiştiği gösterilmiştir.

Kısmi boşalma ölçüm cihazı programının yardımıyla n-q-p analizi yapılarak manyetik alanın olmadığı durumla olduğu durumun grafikleri iki boyutlu olarak kaydedilmiştir. Daha sonra bu veriler iki ve üç boyutlu olarak aynı grafik üzerinde açılarak aralarındaki farklar belirtilmiştir. Böylelikle n-q-p değerlerine manyetik alanın etkisi incelenmiştir.

2. ELEKTRİKSEL BOŞALMALAR

Elektrik mühendisliğinde boşalmanın gerçek anlamı yük veya elektrikten kurtulmaktır. Boşalma aynı zamanda bir elektrik yükünün geri çekilmesinin veya transferinin süreci olarak da tanımlanır. Elektriksel yükün serbest kalması veya nötr hale gelmesi, havadan veya başka gazdan elektrik akımının akması, yükün ani hareketi gibi tanımlarda elektriksel boşalmalar için kullanılır [15].

Elektriksel boşalmalar gaz, sıvı, katı veya bunların birleşimi yalıtkanlarda gerçekleşir. Yalıtkanlar bazı noktalarda birbirinden farklılık göstermektedir. Gazların, katıların ve sıvıların dielektrik dayanımlarına ve fiziksel özelliklerine göre çeşitli avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Sıvılar ve gazlar kıyaslandığında sıvıların delinme dayanımlarının gazlara kıyasla daha büyük olduğu görülür. Sıvıların elektriksel geçirgenliği ve kayıpları gazlardan daha düşüktür. Ayrıca sıvılar delinme gerçekleştikten sonra eski haline gelebilirler, elektrotları veya sargıları gazdan daha iyi soğuturlar. Sıvıların bu tür avantajlarına karşın sıvıyı koymak için bir kap gerekmesi ve mineral yağların yanıcı olması gibi dezavantajları da vardır. Katılarda ise sıvı veya gaz gibi bir kap ihtiyacı bulunmaz. Diğerlerine kıyasla katılarda delinme dayanımı yüksektir. Kendi kendini düzeltememesi, sıklıkla yanıcı olması, gaz veya sıvı kadar soğutmada etkili olmaması katıların dezavantajlarıdır [16]. Gaz karışımı bir yalıtkan olan hava ise yüksek gerilim çalışmalarda katı veya sıvılara göre daha fazla kullanılmaktadır. Bunun nedeni her yerde ulaşılabilir olması, maliyetinin ise olmamasıdır.

2.1 Elektriksel Boşalmaların Sınıflandırılması

Elektriksel boşalmalar konusu yüksek gerilim sisteminde önemli bir yere sahiptir. Yüksek gerilim sisteminde kullanılan bir malzemede elektriksel boşalmaların olması sistemde büyük sorunlara yol açabilmektedir. Yalıtkan olarak sistemde kullanılan malzemenin kendi özelliğini koruması istenir. Yalıtkan bir malzeme normal koşullarda elektrik akımını iletmezken, malzemenin elektriği iletir hale geçtiği

durum olan elektriksel boşalmalar tam (delinme, atlama) ve kısmi boşalma olmak üzere iki ana başlıkta incelenebilir.

2.1.1 Tam boşalmalar

Dielektriklere gerilim uygulandığında çeşitli olaylar gerçekleşir. Uygulanan gerilim düşük olduğunda, elektrotlar arasında küçük akımlar akar ve yalıtım elektriksel özelliklerini korur. Buna karşın eğer büyük bir gerilim uygulanırsa yalıtımda akımın akışı keskin bir şekilde artmaya başlar ve delinme olayı meydana gelir. Delinme esnasında güçlü, iletken bir kıvılcım oluşarak elektrotlar arasında kısa devre üretir. Yalıtımda delinmenin gerçekleştiği anda uygulanmış olan maksimum gerilime delinme gerilimi denir [17]. Boşalmanın gerçekleşme şekline göre tam boşalmalar delinme veya atlama adını alır [18].

2.1.2 Kısmi boşalmalar

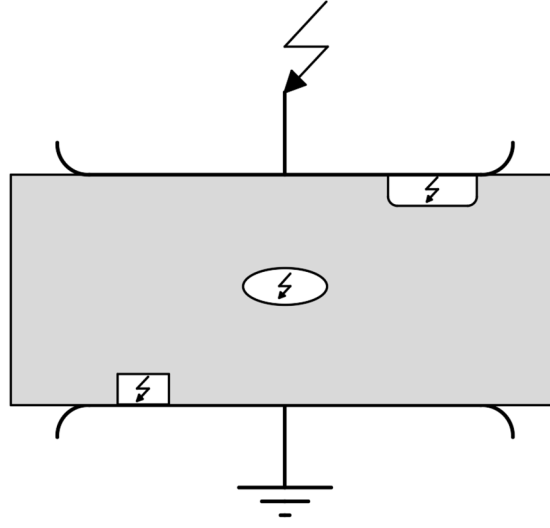
İletkenler arasındaki yalıtımda belirli bir bölgede meydana gelen ve yalıtımı tam köprülemeyen (kısmen köprüleyen) elektriksel boşalmalardır. Bu tip boşalmalar bir iletkenin yakınında meydana gelebilir veya gelmeyebilir. Genellikle kısmi boşalmalar yalıtımın yüzeyinde veya içinde meydana gelen bölgesel elektriksel zorlanmaların bir sonucu olarak ortaya çıkar [19]. Kısmi boşalmaların büyüklüğü genellikle küçük olmasına rağmen bunlar zamanla büyüyerek sorunlara yol açabilir ve malzemenin bozulmasına neden olabilir [20].

Kısmi boşalma tam gerçekleşmeyen boşalma olayları için genel bir terimdir. Kısmi boşalma kavramı farklı grupları da içerir. Bu gruplar kısmi boşalma altında dört başlıkta incelenebilir [20].

2.1.2.1 İç kısmi boşalmalar

İç kısmi boşalmalar güç elemanlarının çoğundaki elektriksel yalıtımın ömrünü belirleyen önemli faktörlerdendir. Yalıtkanın üretimi esnasında kusursuz bir üretim istenir fakat üretim esnasında çeşitli kusurlar oluşabilmektedir. Bu kusurların çoğu yalıtım sistemlerinin üretimi esnasında oluşan gaz dolu boşluklardır [21]. Genelde katı yalıtım malzemelerinde ve nadiren sıvılarda oluşan bu boşlukların onu çevreleyen yalıtıkana göre delinme dayanımı ve dielektrik katsayısı daha düşüktür. Bu yüzden elektrik alan boşluğun olduğu bölgede diğer noktalara kıyasla daha büyük

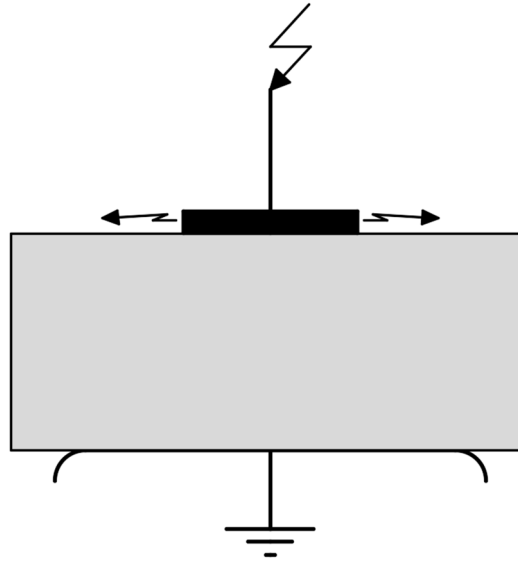
zorlanmalar meydana getirir [17]. Normal çalışma gerilimlerinde bile boşluktaki alan delinme sınırını aşabilir ve burada kısmi boşalma meydana gelebilir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : İç kısmi boşalmalar.

2.1.2.2 Yüzeysel boşalmalar

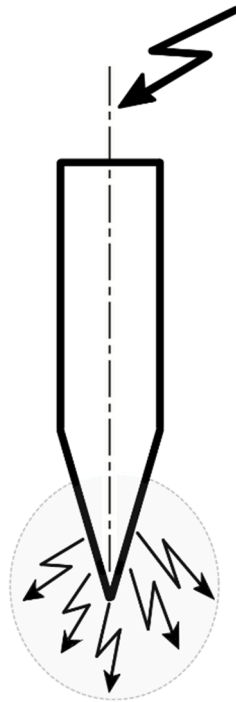
Eğer bir dielektrik yüzeyine paralel bir zorlama bileşeni varsa yüzeysel boşalmalar oluşabilir [20]. Yüzeysel boşalmalar herhangi bir gaz ortamda ve ayrıca vakumda onların katı veya sıvı dielektriklerle arayüzeylerinde gerçekleşebilir. Sınır yüzeye komşu olan iki yalıtkandan birinin delinme dayanımı diğerine göre daha düşükse, elektrik alanın teğetsel bileşeni, dayanımı düşük olan yalıtkanın dayanım değerini aştığında bu yalıtkanda yüzeysel boşalma başlar (Şekil 2.2). Geçit izolatörleri ve kablo başlıkları yüzeysel boşalmaların gerçekleştiği yerlere örnek olarak verilebilir [15].



Şekil 2.2 : Yüzeysel boşalma.

2.1.2.3 Korona boşalmaları

Elektrik alan düzgünse ve alan kademeli olarak arttırılıyorsa, ölçülebilir iyonlaşmanın başladığı anda iyonlaşma havanın delinmesine yol açar. Alanın düzgün olmadığı durumda ise kıvılcım veya delinme olayları orta seviyelerde olup tam gerçekleşmeden önce görsel veya sesli olarak boşalmalar oluşur. Bu boşalmalar korona boşalmaları olarak adlandırılır. Kendi kendini besleyen bir boşalma türü olan korona, alanda gerçekleşen yoğun iyonlaşmanın elektrotlar arasındaki mesafe boyunca sadece belirli bir bölgede gerçekleşmesi şeklinde tanımlanır [22]. Yüksek gerilim mühendisliğinde karşılaşılan alanların çoğu düzgün olmayan alanlar olduğu için korona çok büyük önem taşır. Sistem elemanlarında var olan çapaklar, sivri uçlar, çıkıntılar, köşeler ve keskin kenarlar koronanın başladığı yerlere örnek verilebilir [16]. Küçük yarıçaplı veya sivri uç elektrotlarda da elektrik alan şiddeti yüksek olduğundan korona meydana gelebilir (Şekil 2.3).

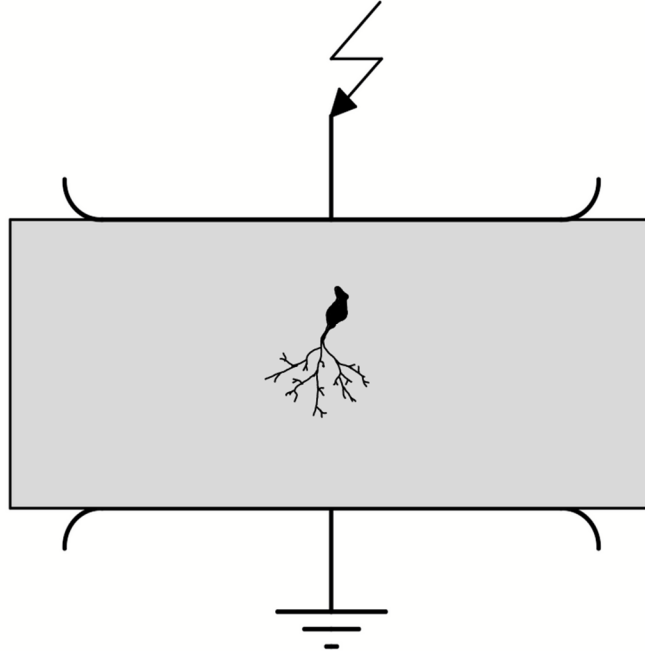


Şekil 2.3 : Korona boşalması.

2.1.2.4 Elektriksel ağaçlanma

Ağaçlanma elektriksel delinme öncesi gerçekleşen bir olaydır. Yalıtımın üretimi esnasında veya sonrasında yapısal bozukluklar oluşabilir ve bu yapısal bozukluklarda boşalmalar gerçekleşebilir. Gerçekleşen boşalmalar sürekli bir boşalma türü ise katı yalıtkanlarda boşalma kanalları (dallar) oluşturur ki bu durum elektriksel ağaçlanma

olarak adlandırılır [22]. Ağaçlanma düşük alan şiddeti etkisinde çok yavaştır ve çalışma geriliminde delinme oluşması aylar, yıllar alabilmektedir. Yüksek alan şiddeti ise ağaçlanmanın büyüme oranını önemli derecede artırarak birkaç saat hatta dakika içinde delinmesine neden olabilmektedir [23].



Şekil 2.4 : Elektriksel ağaçlanma.

2.2 Korona

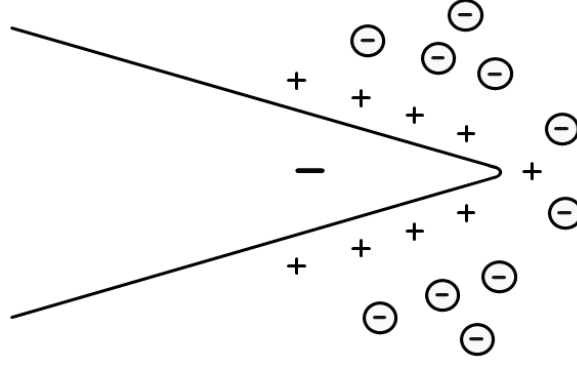
Korona, gaz yalıtımlarda sivri uç ve kenarlarda gerçekleşir. Elektrotlar arasında alan şiddeti büyük olan yerlerde tam delinme gerçekleşmeden önce meydana gelen boşalmalardır.

Korona olayının bazı avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin, YG hatlarında korona kayıplara neden olmakta, hattın iletim verimliliğini etkilemektedir. Ayrıca korona YG hatlarında ve diğer YG elemanlarında radyo parazitlerine neden olmaktadır. SF₆ içerisinde yan ürünler meydana getirerek yalıtımın yapısını bozma ve boşalma sinyallerini elde etmede asıl sinyali bozma gibi sorunlara da korona olayı yol açabilmektedir. Ozon üretiminde kullanılması birkaç avatanjından biridir [16].

Korona olayı çeşitli başlıklar altında incelenebilir.

2.2.1 Negatif korona

Hava ortamında negatif gerilimde bir sivri uç Şekil 2.5’de görülmektedir. Noktanın yakın çevresi katottur ve Townsend boşalmaları kolaylıkla oluşabilir [16].

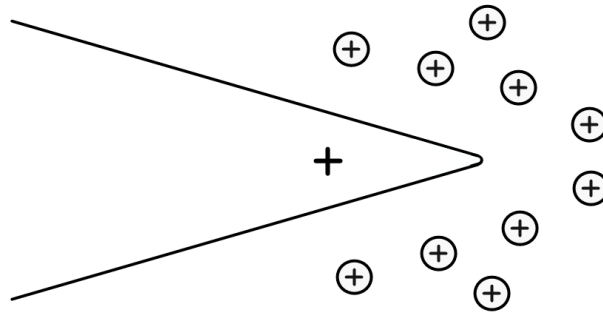


Şekil 2.5 : Negatif korona.

Uç çevresinde dağılmış bir boşalma meydana gelir, elektronlar ileri itilir ve bir pozitif uzay yükü oluşur. Buna karşın uzaktaki elektronlar oksijen molekülleri ile birleşirler. Böylece sivri noktayı elektrik alandan koruyan ve boşalmayı durduran bir negatif uzay yükü oluşur. Negatif uzay yükü daha sonra anoda doğru uzaklaşır, elektriksel zorlanma artar ve bir sonraki boşalma başlar. Boşalmanın tekrarlanması olayı bu şekilde olmaktadır ki bu olay dielektrik kayıplarına neden olan radyo parazitinin oluşum sebebidir [16, 20].

2.2.2 Pozitif korona

Yüksek alan şiddeti içerisinde kalan bölgede katot bulunmadığı için pozitif korona biraz daha yüksek bir yüksek gerilimde başlar. Işık demeti gaz içerisindeki sivri uç kısmında ortaya çıkar ve pozitif uzay yükleri ayrılır (Şekil 2.6).



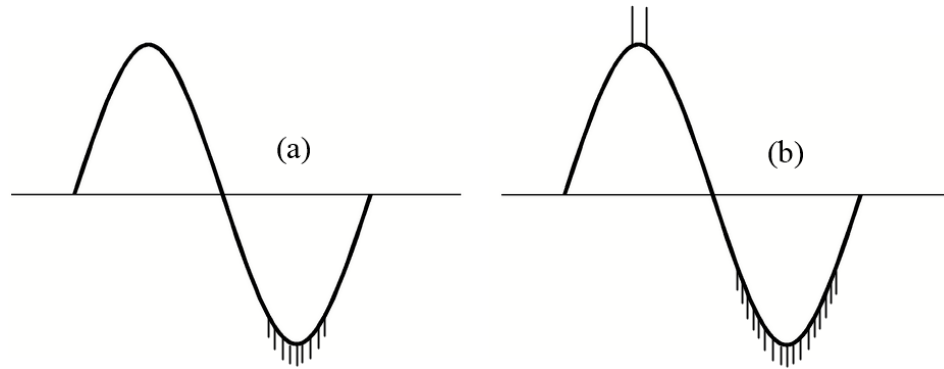
Şekil 2.6 : Pozitif korona.

Bu pozitif uzay yükü sivri ucu alandan korur ve böylece boşalma durur. Pozitif yük uzay içerisine sürüklenirken korona boşalmaları tekrar başlar. Bu şekilde yeni boşalmalar diğerinin yerini alarak olay tekrarlanır. Daha yüksek bir gerilim değerinde uzay yükü tarafından söndürülemeyen, boşalma kanalı olarak adlandırılan uzun ışık demetleri oluşmaktadır [16].

2.2.3 Alternatif gerilimde korona

Alternatif gerilimde pozitif ve negatif korona birbiri ardına oluşur. Gerilim arttırılırken öncelikle negatif korona oluşur. Oluşan negatif korona sadece sinüs dalgasının negatif yarı dalgasındadır. Townsend mekanizması nispeten düşük alan şiddetlerinde (negatif) katotta geri beslemeye neden olur. Gerilim arttırılırsa boşalma sayısı önemli ölçüde artar (Şekil 2.7a).

Gerilim değeri daha çok arttırılırsa boşalmalar pozitif yarı dalgada da oluşur (Şekil 2.7b). Bu boşalmalar ışık demeti mekanizmasından dolayı oluşur ve daha büyük ve daha düzensizdirler [16, 20].



Şekil 2.7 : Alternatif gerilimde (a) sadece negatif yarı dalgada korona (b) iki yarı dalgada da korona.

2.3 Boşalma Sinyallerinin Belirlenmesi

Elektriksel boşalmalar nedeniyle YG elemanlarında sorunlar ortaya çıkabilmektedir. Yalıtım sisteminde gerçekleşen arızalar nedeniyle büyük masraflı ve zaman alıcı bakımlar yapılması gerekmektedir. Bu yüzden kısmi boşalmaların belirlenmesi ve kısmi boşalma verilerinin analizi yalıtım sistemlerinde oluşabilecek sorunları önlemede büyük önem taşımaktadır. Bu sayede zaman alıcı ve büyük masraf gerektiren bakımların sayısı azalabilmektedir [21]. Elektriksel boşalmaların varlığını belirlemek için elektriksel yöntemler ve elektriksel olmayan yöntemler bulunmaktadır. Bunlar kullanılarak boşalmanın varlığı incelenmektedir.

Elektriksel olmayan yöntemler boşalmaların var olup olmadığını bulmak için kullanılabilir. Eğer boşalmanın genliği ölçülmek istenirse elektriksel olmayan yöntemler pek tercih edilmemektedir. Kimyasal dönüşüm, gaz basıncı, ısı, ses ve ışıktan yararlanılarak elektriksel olmayan yöntemler kullanılabilir. Yapılan

Çalışmalarda ses ve ışığın boşalmaları belirlemede diğerlerine göre daha büyük önem taşıdığı ve bu yüzden daha sık kullanıldığı belirtilir [20].

Kısmi boşalmaların ölçülmesi için çeşitli elektriksel yöntemler bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında elektriksel ölçme işlemi yüksek alternatif gerilim üretimi deney düzeneğine paralel bağlanan bir kuplaj kondansatörü üzerinden bir kısmi boşalma ölçüm cihazı ve bilgisayar yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Cihaz Haefely markasının DDX-9121 modelidir.

2.4 Kısmi Boşalma Başlangıç Gerilimi

Kısmi boşalma başlangıç gerilimi bir deney cismine gerilim uygulandığında kısmi boşalmaların ölçüldüğü en düşük gerilim olarak adlandırılır [17]. Düşük seviyede uygulanan gerilimin kısmi boşalmalar tespit edilene kadar artırılması ile ölçülür [20]. Genelde kısmi boşalma başlangıç gerilimi, kısmi boşalmanın ilk görüldüğü gerilim değeri olarak tanımlansa da uygulamalarda sürekli kısmi boşalma olaylarının başladığı değer olarak kullanılır.

Kısmi boşalma başlangıç gerilimini belirlemek zordur. Bunun nedeni ortam koşullarından oldukça etkilenmesidir. Sıcaklık, basınç, elektrot yüzeyinin durumu gibi birçok etki kısmi boşalma başlangıç değerini değiştirmektedir. Kısmi boşalma başlangıç gerilimini belirleme ölçümleri yapılırken deney cismine sıfırdan başlanarak gerilim kademeli olarak uygulanır ve sürekli boşalmaların başladığı ilk gerilim değeri not edilerek başlangıç gerilimi olarak alınır. Bulunan bu gerilimin %10 daha fazlası deney cismine uygulanarak yapılan çalışma ile ilgili veriler elde edilmektedir.

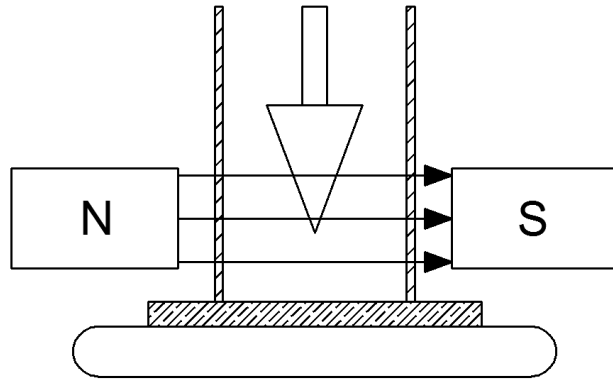
2.5 Kısmi Boşalmada Manyetik Alan

Klasik elektromanyetik teoriden, elektrik ve manyetik alanlarının ikisinin de yüklü bir parçacık üzerinde bir kuvvet uygulayacağı bilinmektedir. Elektrik alan yüklü bir parçacığa alan yönünde kuvvet uygulamaktadır. Uygulanan kuvvetin büyüklüğünü alan dayanımı ve parçacığın yükü belirlemektedir. Manyetik alan ise parçacığın hızıyla orantılı bir büyüklük ile alana dik bir kuvvet uygulamaktadır [6]. Ortaya çıkan kuvvet, Lorentz Kuvveti olarak tanımlanır (2.1).

$$F = F_e + F_m = q(E + v \times B) \quad (2.1)$$

Burada F_e elektrik alan tarafından uygulanan kuvvet, F_m manyetik alan tarafından uygulanan kuvvet, q parçacık üzerindeki yük, E elektrik alan vektörü, v parçacığın hız vektörü ve B ise manyetik akı yoğunluğudur.

Manyetik alanın varlığıyla KB sürecinde ortaya çıkan elektronların ve iyonların yörüngesini değiştirmesi beklenmektedir [14]. Şekil 2.8’de hava ortamında koni-düzlem elektrot sistemine, dışarıdan bir manyetik alan uygulanmasıyla gerçekleştirilen kısmi boşalma analizine ait düzenek görülmektedir.



Şekil 2.8 : Manyetik alanın kısmi boşalmaya etkisinin incelenmesi için kullanılan deney düzeneği [6].

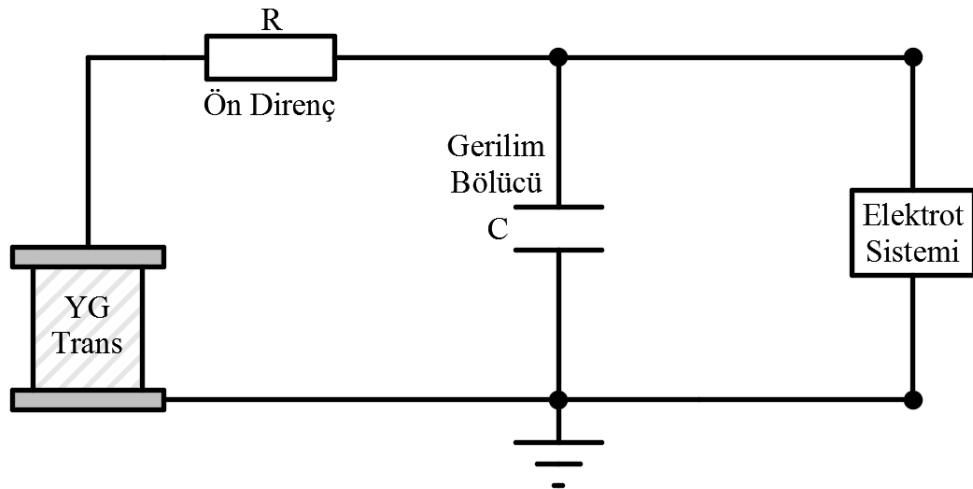
Şekil 2.8’deki elektrot sistemine benzer bir deney düzeneği bu tez çalışmasında oluşturulmuş ve farklı elektrot açıklıkları ve manyetik akı yoğunluğu değerleri için kısmi boşalmaya etkiler araştırılmıştır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Gerçekleştirilen tez çalışmasında, hava ortamında kısmi boşalma sinyallerinin manyetik alanlı ve alansız durumlarının incelenebilmesi için İTÜ Maslak Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda gerekli deney düzenekleri oluşturulmuştur. Çubuk-düzlem elektrot sisteminde ölçülebilir kısmi boşalma elde edilene kadar manyetik alanlı ve alansız durumlar için alternatif gerilim uygulanmış, elektrot aralıkları ve manyetik akı yoğunluğu değerleri değiştirilerek kısmi boşalma ile ilgili veriler bir kısmi boşalma ölçüm cihazı (Haefely DDX-9121) yardımıyla bilgisayara kaydedilmiştir. Kaydedilen verilerin manyetik alanlı ve alansız durumları KB başlangıç gerilimleri açısından kıyaslanmış, n-q-p analizleri gerçekleştirilerek farkları araştırılmıştır. Alan dağılımları bir bilgisayar programı ile analiz kısmında modellenerek incelenmiştir.

3.1 Kısmi Boşalma Sinyallerinin Elde Edilmesi

Ölçülebilir kısmi boşalma sinyallerinin üretilmesi için gerekli yüksek gerilimler laboratuvarında bulunan yüksek gerilim deney setleri kullanılarak elde edilmiştir. Yapılan deneylerin hepsi hava ortamında gerçekleştirilmiştir. Tüm deneylerde çubuk-düzlem elektrot sistemi kullanılmıştır. Kısmi boşalma sinyallerin üretilmesi için oluşturulan deney düzeneğinin şeması Şekil 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.1 : Yüksek alternatif gerilim üretim düzeneğinin şeması.



Şekil 3.2 : Yüksek alternatif gerilim üretim düzeneği.

Manyetik alanlı ve alansız durumlar için hava ortamında elektrot sistemine alternatif gerilimin uygulanması Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de görülen düzeneklerle gerçekleştirilmiştir. Bu düzenekte kullanılan yüksek gerilim deney transformatörü bir fazlı, 50 Hz, 5 kVA, 0,220/100 kV’luk, yağlı, yalıtkan gövdelidir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 : 50 Hz, 5 kVA, 0,220/100 kV YG deney transformatörü.

Deney transformatöründen sonra 50 k Ω luk 125 W değerinde bir ön direnç bağlanarak, devreyi aşırı akımdan korumak amaçlanmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 : 50 k Ω , 125 W ön direnç.

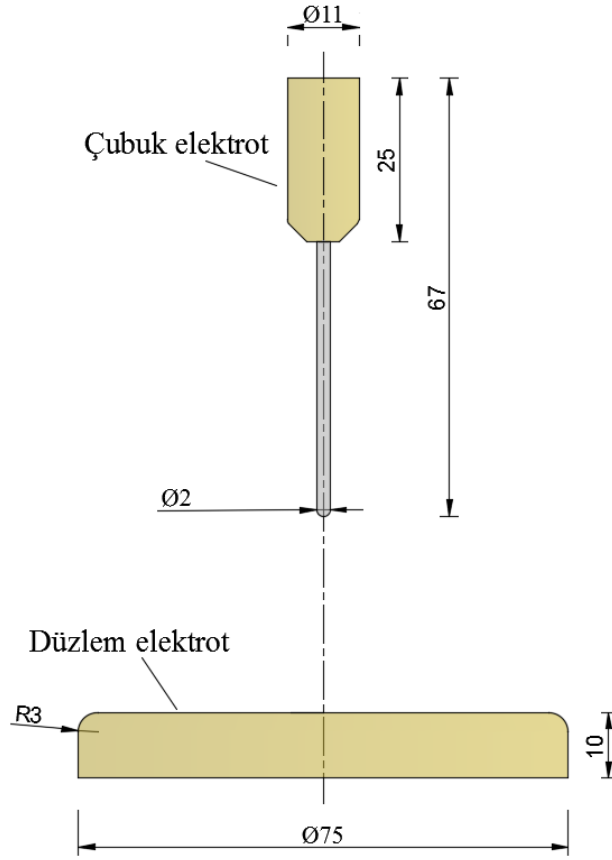
Yüksek alternatif gerilim üretildikten sonra ise üretilen gerilimin okunması 100 pF, 100 kV değerinde kapasitif bir gerilim bölücü kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.5). Kumanda masasında bulunan yüksek gerilim voltmetresi (Şekil 3.8) ve kapasitif gerilim bölücü yardımıyla deney cismine uygulanan gerilim değerleri okunmuştur.



Şekil 3.5 : 100 pF, 100 kV YG kondansatörü.

Hazırlanan yüksek alternatif gerilim üretimi düzeneğine eklenecek deney cismi olarak çubuk-düzlem elektrot sistemi seçilmiştir. Üretilen bu yüksek alternatif gerilimin seçilen elektrotlara varyak yardımıyla artırılarak uygulanması amaçlanmıştır. Kullanılan çubuk elektrot 67 mm uzunluk, 2 mm kalınlığına sahiptir ve krom kaplıdır. Ayrıca çubuk elektrotun uç kısmının yarıçapı 1 mm'dir. Düzlem

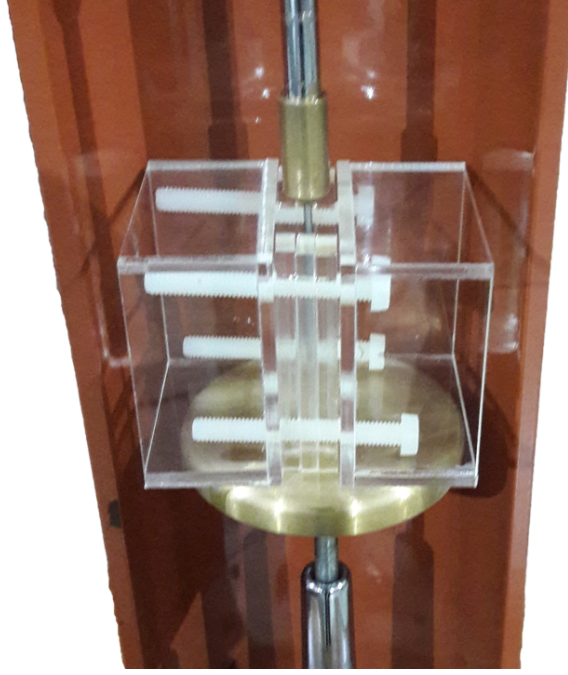
elektrot ise 10 mm kalınlıkta, 75 mm çapındadır ve 3 mm kenar eğrilik yarıçapına sahiptir. Şekil 3.6’da deneyde kullanılan çubuk-düzlem elektrot sistemiyle ilgili bilgiler mm cinsinden görölmektedir.



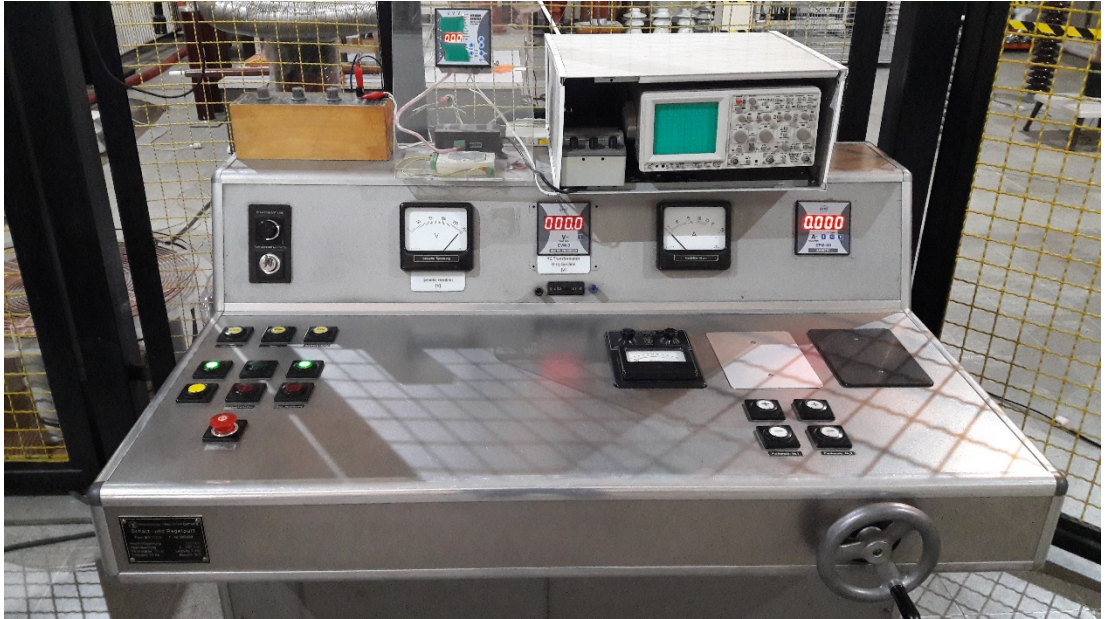
Şekil 3.6 : ubuk – düzlem elektrot sistemi.

ubuk-düzlem elektrot sisteminde manyetik alansız durumda ilk deneyler gerçekleştirilmiştir. Manyetik alan işin içine girdiğinde mıknatıs aralıklarını ayarlamak ve gerçekleşebilecek atlamaları önlemek amacıyla bu sistem için pleksiglas malzemeden bir kap yapılmıştır. Bu kap manyetik alan varlığında mıknatıs aralıklarını kademeli bir şekilde ayarlamak için gereklidir. Manyetik alanın olmadığı durum ile olduğu durum kıyaslanacağı için ortam koşulları aynı olmalıdır. Bu yüzden manyetik alanın uygulanmadığı durumda da bu kap kullanılmıştır (Şekil 3.7).

ubuk-düzlem elektrot sistemi pleksiglas kap içerisindeyken tüm deneyler gerçekleştirildiği için kabın etkisi de ayrıca araştırılmıştır. Öncelikle ubuk-düzlem elektrot sistemi sadece hava ortamında incelenmiştir ve bu durumda ölçümler alınmıştır. Daha sonra aynı elektrot açıklığında pleksiglas kap içinde farklı açıklıklarda ölçümler yapıp kabın etkisi araştırılmıştır. Bu duruma ait bilgiler veri analizi kısmında verilmiştir.



Şekil 3.7 : Elektrot sistemi ve ayarlanabilir pleksi cam kap.

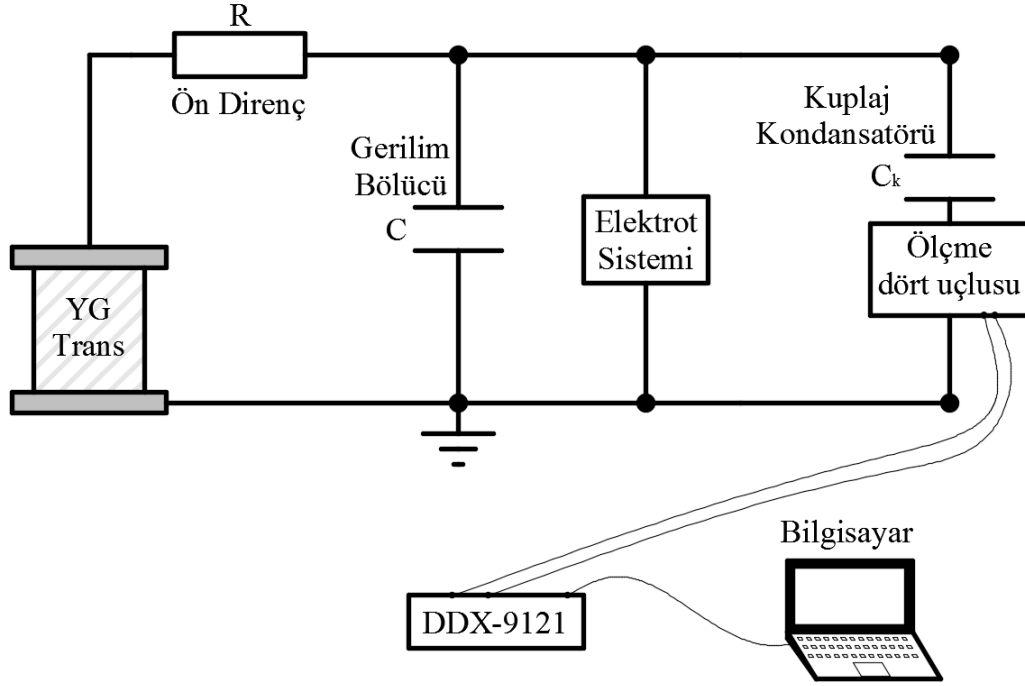


Şekil 3.8 : Kumanda masası ve voltmetre bölümü.

Tüm deney düzeneği ayarlandıktan sonra kumanda masasından gerilim varyak yardımıyla yavaş bir şekilde arttırılarak istenilen durumlar için elektrot sistemine yüksek alternatif gerilim uygulanmıştır. Belirli süreler tutularak manyetik alanlı ve alansız durumlar için aynı elektrot ve kap açıklıklarında deneyler gerçekleştirilmiştir. İki durum kıyaslanacağı için öncelikle manyetik alan yokken kısmi boşalma sinyalleri üretilmiştir. Daha sonra manyetik alan üretilmesi gerçekleştirilerek benzer deneyler tekrarlanmıştır.

3.2 Kısmi Boşalma Sinyallerinin Ölçülmesi

Elektrot sistemine yüksek alternatif gerilim uygulanarak elde edilen kısmi boşalma sinyallerini ölçmek için bir kuplaj kondansatörü, kısmi boşalma ölçüm cihazı (Haefely DDX-9121) ve bir bilgisayar Şekil 3.1'deki düzeneğe eklenmiştir (Şekil 3.9). Kuplaj kondansatörü devreye eklendikten sonra ölçme dört uçlusundan iki adet kabloyla kısmi boşalma ölçüm cihazına bağlantı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.9 : Kısmi boşalma ölçüm deney düzeneği.

Şekil 3.10'da, kullanılan kuplaj kondansatörü ve ona bağlanan iki adet kablo görülmektedir. Bu kablolardan biri iki adet filtre üzerinden kısmi boşalma ölçüm cihazının PD-in kısmına diğeri ise direk cihazın KVM-in kısmına bağlanmıştır. Kısmi boşalma ölçüm cihazının programı, deneyler gerçekleşirken kısmi boşalma verilerinin okunması, grafiklerinin görüntülenmesi ve kaydı gibi gerekli işlemleri yapmak için bir bilgisayara yüklenmiştir. Haefely DDX-9121 ile bilgisayar arasındaki bağlantı ethernet kablosuyla gerçekleştirilmiştir. Cihazın bilgisayar tarafından tanınması ve bağlantının tamamlanması için bilgisayar içerisindeki ağ ayarlarından gerekli düzenlemeler yapılmıştır. Son olarak cihazın ve kuplaj kondansatörünün topraklama bağlantıları ve diğer bağlantılar tekrar kontrol edilmiştir. Bunun nedeni sistemdeki elemanların birbirleriyle bağlantısında veya toprak bağlantılarında sorun olması durumunda asıl sinyali bozmasıdır.



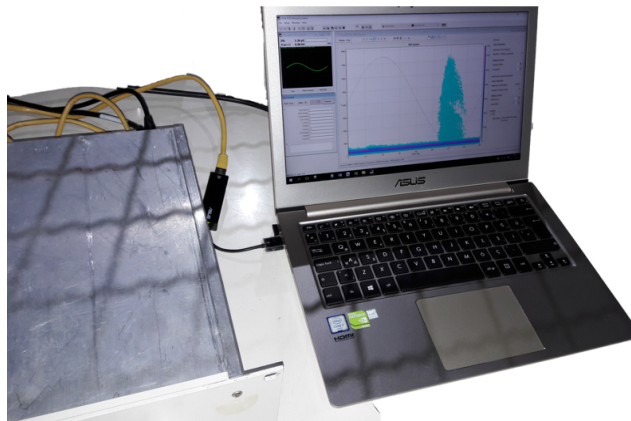
Şekil 3.10 : 1 nF, 50 kV, 50/60 Hz değerlerine sahip kuplaj kondansatörü.

Kısmi boşalma ölçüm cihazının önden görüntüsü Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11 : Haefely marka DDX-9121 model kısmi boşalma ölçüm cihazı.

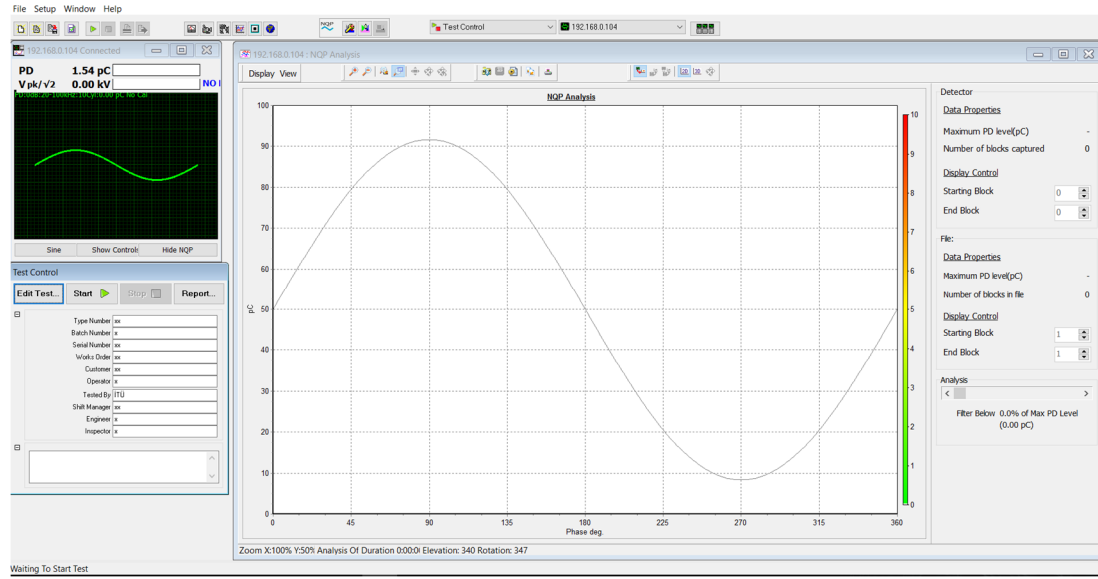
Ethernet ayarları yapıldıktan sonra Haefely DDX-9121 ile kurulan bağlantı Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12 : Haefely DDX-9121’in bilgisayarla bağlantısı.

Bağlantılar tamamlandıktan sonra bilgisayarda KB ölçüm cihazının programı açılarak elektrot sisteminde o anda bulunan gerilim değerleri ve pC değerleri görülmüştür. Şekil 3.13’de cihazın programının ana ekranı görülmektedir.

Ölçmeye başlamadan önce devrede gerilim yok iken kuplaj kondansatörünün kalibrasyonu yapılmıştır. Deneyde kullanılan kuplaj kondansatörü 1.0 nF, 50 kV ve 50/60 Hz değerlerine sahiptir. Buradan cihazla yapılan bağlantı ile kısmi boşalmanın ölçülmesi, verilerin kaydı ve analizi gerçekleştirilmiştir.



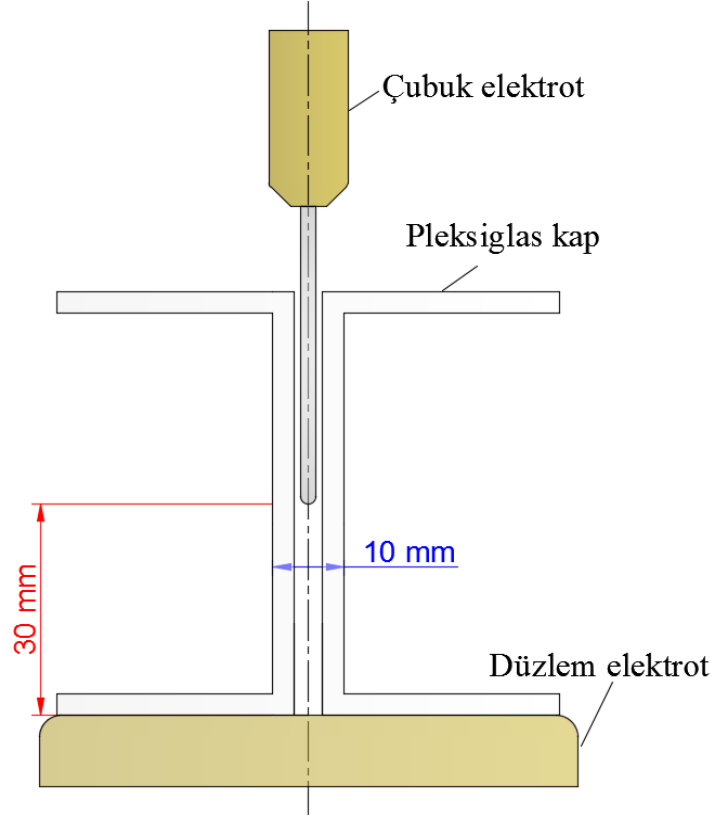
Şekil 3.13 : Haefely DDX-9121’in programının ana ekran görüntüsü.

3.2.1 Manyetik alansız durumda KB başlangıç geriliminin ölçülmesi

Manyetik alanın olmadığı durumda kısmi boşalma sinyallerinin üretilmesi ve ölçülmesi için tüm düzenekler ayarlandıktan sonra ilk deney kısmına geçilmiştir. Deneylerde iki konu üzerinde durulmuştur. Bunlardan biri kısmi boşalma başlangıç gerilimi diğeri ise n-q-p verileridir.

Manyetik alansız durumda kumanda masasından yüksek alternatif gerilim sıfırdan başlanarak seçilen yatay ve düşey açıklıklar için çubuk-düzlem elektrot sistemine varyak yardımıyla artırılarak uygulanmıştır. Burada tanımlanan düşey açıklık, elektrot açıklıkları olup 30 mm, 35 mm ve 40 mm’dir. Yatay açıklık ise pleksiglas kabın dış yüzeyleri arası mesafe olup 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm ve 30 mm değerlerinde deneylerde alınmıştır.

Seçilen bir yatay ve düşey açıklık için kullanılan elektrot sistemine ve pleksiglas kaba ait model Şekil 3.14’de gösterilmiştir.



Şekil 3.14 : 30 mm elektrot ve 10 mm yatay açıklık için çubuk-düzlem model.



Şekil 3.15 : Deneylerde kullanılan elektrotlar.

İlk olarak hava ortamında 30 mm düşey ve 10 mm yatay açıklık için manyetik alansız durumda kısmi boşalma başlangıç gerilimini bulma deneyi gerçekleştirilmiştir.

Time (HH:MM:SS)	Time (Secs.)	192.168.0.104 (kV)	192.168.0.104 (pC)
11:24:48	34	7.42	1.56
11:24:49	35	7.54	1.64
11:24:50	36	7.75	1.54
11:24:51	37	7.91	1.44
11:24:52	38	7.91	1.54
11:24:53	39	7.91	40.8
11:24:54	40	8.00	40.1
11:24:55	41	8.03	81.9
11:24:56	42	7.99	81.9
11:24:57	43	7.99	81.9
11:24:58	44	7.99	145
11:24:59	45	7.99	145
11:25:00	46	7.99	239
11:25:01	47	8.07	259
11:25:02	48	8.08	50.9
11:25:03	49	8.08	458
11:25:04	50	8.08	372
11:25:05	51	8.08	443
11:25:06	52	8.08	443

Şekil 3.16 : Manyetik alansız durumda 30 mm düşey, 10 mm yatay açıklık için KB başlangıç gerilimini belirleme deney verilerinden bir kısmının ekran görüntüsü.

Şekil 3.16’da gerçekleştirilen ilk ölçümle ilgili bilgisayardan alınan program görüntüsünün bir kısmı verilmiştir. Kısmi boşalma ölçüm cihazının programı dört sütunda veriler vermektedir. Bunlar deneyin gerçekleştirildiği andaki zaman, veriler alınırken geçen süre, sisteme uygulanan gerilim değeri ve boşalmanın büyüklüğüdür. Gerçekleştirilen deney için program her saniye için gerilim ve pC değerleri verecek şekilde ayarlanmıştır. Şekil 3.16’da tüm değerlerin verilmemesinin nedeni sadece kısmi boşalmanın başlangıç gerilimiyle ilgilenilmesidir. Kısmi boşalmanın başlangıç gerilimini belirlemede kalıcı boşalmaların başladığı ilk değer önemsenmiştir. Yaklaşık 2 pC civarı ve altında olan değerler ise gürültü olarak kabul edilmiştir ve bu seviyedeki boşalma değerleri 0 pC gibi düşünülmüştür. Burada dikkat edilmesi gereken nokta deney boyunca gerilim arttırılırken ona karşılık gelen pC değerinde kabul edilen gürültü seviyesinden büyük bir pC değerinin yakalanmasıdır. Bu pC değerindeki artmanın daha sonra tekrar 1-2 pC civarına düşmemesi, aksine yükselmesi beklenir ki ancak o durumda kısmi boşalmanın başlangıç gerilimi olarak kabul edilir. Şekil 3.16’ya bakıldığında 38. saniyeden 39. saniyeye geçilirken 1,54 pC değerinden 40,8 pC değerine yükselme görülmüştür ve sonrasında da bu yükseliş devam etmiştir. Yükselme değeri 39. saniyede gerçekleştiği için bu saniyeye ait gerilim değerine bakılmış ve bu değer 7,91 kV olarak görülmüştür. Bu yüzden deney sonucunda 30 mm düşey ve 10 mm yatay açıklık için artışın görüldüğü değer olan 7,91 kV değeri kısmi boşalma başlangıç gerilimi olarak alınmıştır.

Haefely DDX-9121'in programından deney verileriyle ilgili alınan görüntülerde önemli olan kısımların daha rahat görülmesi ve belirtilmesi için tablo kullanılmıştır (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1 : Manyetik alansız durumda 30 mm düşey, 10 mm yatay açıklık için KB başlangıç gerilimi deney verilerinin bir kısmı.

Gerilim değeri U (kV)	Boşalma genliği q (pC)
7,91	1,44
7,91	1,54
7,91	40,8
8,00	40,1
8,03	81,9
7,99	81,9
7,99	81,9
7,99	145

Çizelge 3.1'de gerilim artarken bazı değerler için azalmalar görülmektedir. Bu deneyde kullanılan kumanda masasındaki varyaktan kaynaklanan bir problemdir.

İlk yatay ve düşey açıklık için deney tamamlandıktan sonra yapılan işlemler aynı şekilde farklı yatay ve düşey açıklıklar için gerçekleştirilmiştir. Bunlarla ilgili verilerden birkaç tanesi yine çizelgeler halinde verilmiştir (Çizelge 3.2, Çizelge 3.3).

Çizelge 3.2 : Manyetik alansız durumda 35 mm düşey, 10 mm yatay açıklık için KB başlangıç gerilimi deney verilerinin bir kısmı.

Gerilim değeri U (kV)	Boşalma genliği q (pC)
8,13	1,62
8,25	1,56
8,38	81,9
8,42	81,9
8,42	120
8,46	146
8,42	257
8,42	259

İkinci elektrot açıklığı 35 mm'ye ayarlanmış ve kap açıklığı sabit tutulmuştur. Gerilim yine varyak yardımıyla arttırılmış, veriler bilgisayar ortamında kaydedilmiştir (Çizelge 3.2). Sürekli boşalmaların başladığı ilk gerilim değeri

8,38 kV olarak görülmüştür ki bu değer çalışılan açıklıklar için KB başlangıç gerilimidir.

Çizelge 3.3 : Manyetik alansız durumda 40 mm düşey, 15 mm yatay açıklık için KB başlangıç gerilimi deney verilerinin bir kısmı.

Gerilim değeri U (kV)	Boşalma genliği q (pC)
8,32	1,56
8,44	1,68
8,48	1,52
8,60	79,3
8,60	71,2
8,60	72,3
8,61	72,3
8,60	143

Bir başka deneyde elektrot açıklığı bu sefer 40 mm'ye, kap açıklığı ise 15 mm'ye ayarlanmıştır. Gerilim varyak yardımıyla arttırılarak ölçüm gerçekleştirilmiştir ve geçen her saniye için veriler kaydedilmiştir (Çizelge 3.3). Sürekli boşalmaların başladığı ilk gerilim değeri bu açıklıklar için 8,60 kV olarak belirlenmiştir.

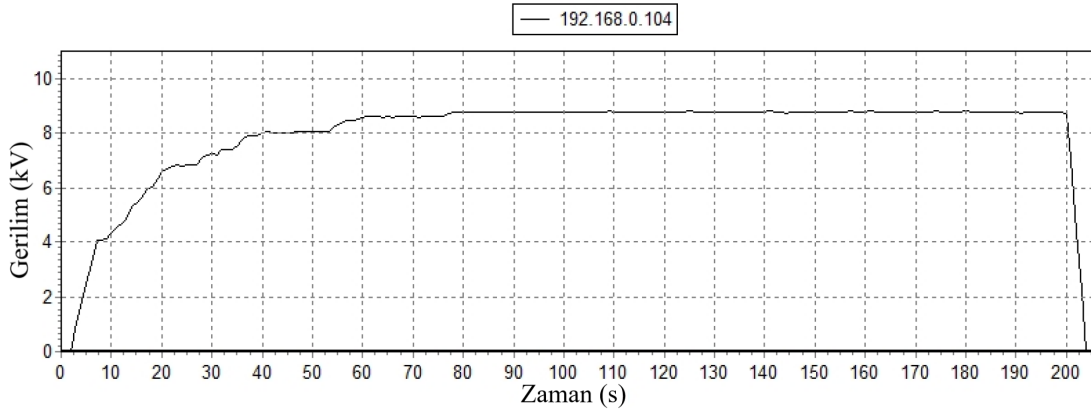
Elektrot ve kap açıklıkları değiştirilerek diğer deneyler de tamamlanmıştır. Toplamda manyetik alansız durum için on beş deney yapılarak farklı açıklık değerleri için KB başlangıç gerilimi değerleri bulunmuştur. Deneylerde elde edilen her veri değeri burada ayrı ayrı verilmemiştir. Sonuç olarak 30 mm, 35 mm ve 40 mm elektrot açıklıkları ve 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm ve 30 mm kap açıklıkları için bulunan KB başlangıç gerilimlerinin hepsinin değerleri manyetik alanın olmadığı durum için Çizelge 3.4'te görülmektedir.

Bu deneylerde alınan verilerin koşulları ve açıklıkları daha sonra manyetik alan varlığında gerçekleştirilen deneylerle kıyaslanacağı için önemlidir. On beş deney boyunca manyetik alanın olmadığı durumda alınan veriler daha sonra kıyaslanacağı için açıklık değerleri ve manyetik alan varlığı kodlamayla isimlendirilmiştir. Deneylerde gerçekleştirilen tüm ölçümlerle ilgili değerlendirmeler, alınan verilerle ilgili değişimler ve grafikler tezin analiz bölümünde verilmiştir. Deneysel kısımda ise gerçekleştirilen deneylerin bilgilerine ve kaydedilen verilerden bazılarına yer verilmiştir. Gerçekleştirilen on beş deneye ait bulunan KB başlangıç gerilimleri farklı açıklık değerleri için kaydedilmiştir (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4 : Manyetik alansız durumda üç düşey ve beş yatay açıklık için yapılan deneylerde bulunan KB başlangıç gerilimi değerleri.

	Elektrot açıklığı 30 mm	Elektrot açıklığı 35 mm	Elektrot açıklığı 40 mm
Kap açıklığı 10 mm	7,91 kV	8,38 kV	8,62 kV
Kap açıklığı 15 mm	8,11 kV	8,43 kV	8,60 kV
Kap açıklığı 20 mm	8,29 kV	8,47 kV	8,85 kV
Kap açıklığı 25 mm	8,65 kV	8,91 kV	9,14 kV
Kap açıklığı 30 mm	8,5 kV	8,99 kV	9,3 kV

Ayrıca Haefely DDX-9121 ile kısmi boşalma başlangıç gerilimini bulma deneyleri gerçekleştirilirken program alınan verileri bir deney sonucu raporunda grafiklerle de vermektedir. KB ölçüm cihazının programı Şekil 3.16’da görülen dört sütunlu verilerden, deneyde geçen süre ile ona karşılık düşen gerilim değerinin grafiğini vermektedir (Şekil 3.17).

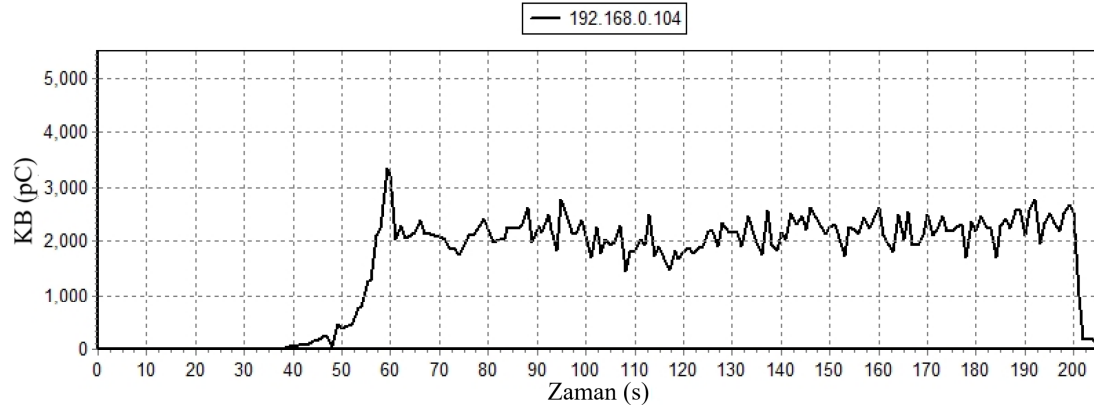


Şekil 3.17 : Manyetik alansız durumda 30 mm düşey, 10 mm yatay açıklık deneyi için gerilim - zaman grafiği.

Şekil 3.17’deki grafik gerçekleştirilen ilk deneye aittir. Bu grafiğe bakılarak deney boyunca geçen her saniyedeki gerilim durumunun değişimi görülmektedir. Manyetik alansız durumda kısmi boşalma ölçüm deneylerinde gerilim varyak yardımıyla arttırıp kısmi boşalmanın başladığı değer bulunarak bunun %10 daha fazlası gerilime

gelmıştır. Bu %10 arttırılarak geline gerilim değerleri de daha sonra manyetik alanlı durumda gerekeceği için kaydedilmiştir.

Haefely DDX-9121'in deney raporu deneyde geçen süre ile ona karşılık gelen boşalmanın büyüklüğünü de grafiklerle vermektedir (Şekil 3.18). Bu grafikten ise deney boyunca geçen sürede kısmi boşalmanın genliğinin değişimi pC cinsinden görülmektedir.

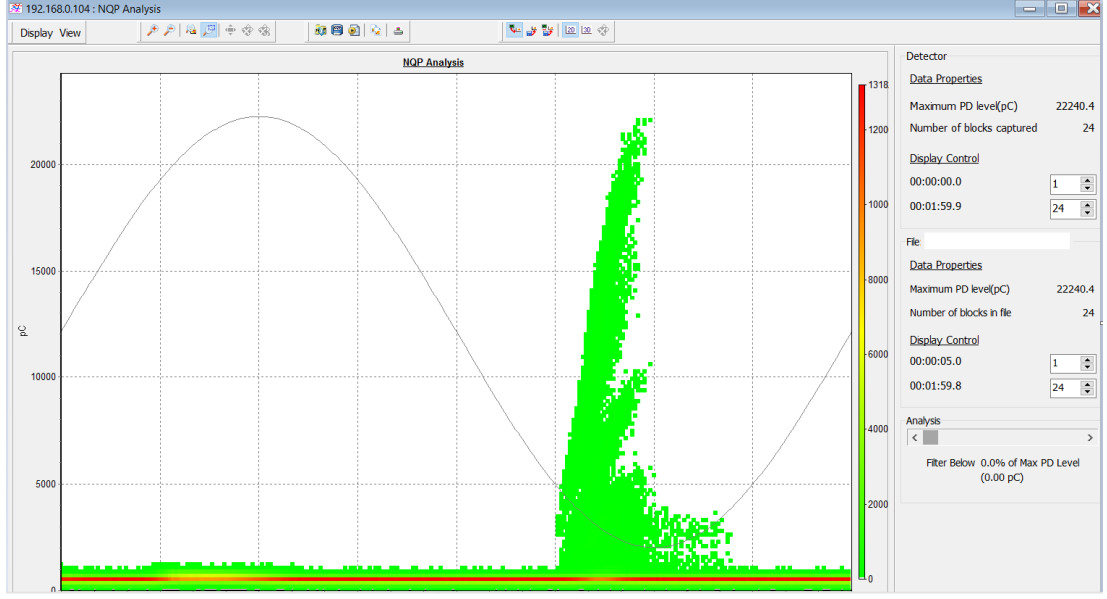


Şekil 3.18 : Manyetik alansız durumda 30 mm düşey, 10 mm yatay açıklık deneyi için boşalma genliği - zaman grafiği.

Kısmi boşalma raporundan elde edilen veriler not edilmiştir ve buralardan kısmi boşalma başlangıç gerilimleri farklı açıklıklar için manyetik alansız durumda bulunmuştur ve ileride kıyaslanmalarda kullanılacağı için çok önemlidir. Buna karşın Şekil 3.17 ve Şekil 3.18 gibi grafikler gerçekleştirilen deneylerin rapor kısmından elde edilen birer örnek olarak verilmiştir. Bu grafikler üzerinde gerçekleştirilen tez çalışmasında durulmamıştır. Bunun nedeni n-q-p grafiklerinin kısmi boşalma sinyalleri hakkında daha fazla bilgiler içermesidir.

3.2.2 Manyetik alansız durumda n-q-p deneyleri

Manyetik alanın olmadığı durum için KB başlangıç deneyleri yapılırken aynı zamanda n-q-p deneyleri de gerçekleştirilmiştir. N-q-p deneyi Haefely DDX-9121'in programı içerisinde ayrı bir bölüm altındadır. N-q-p deneyi ayrı olarak başlatılmadıysa diğer standart deney başlatılsa dahi n-q-p deneyi kendisi başlamamaktadır. KB ölçüm cihazı, n-q-p analizini grafikler vererek ve verileri kendi içerisinde tutarak gerçekleştirmektedir. Bu yüzden n-q-p ile ilgili gerçekleştirilen deneyler ve bu deneylerin sonuçları analiz kısmında verilmiştir. Cihazın n-q-p deney ekranından bir görüntü Şekil 3.19'da verilmiştir.



Şekil 3.19 : Haefely DDX-9121'in n-q-p deney ekranı.

Manyetik alanın olmadığı durumda farklı açıklıklar için yapılan on beş adet KB başlangıç gerilimi bulma deneyi ve ayrı olarak gerçekleştirilen n-q-p deneyleri ile çalışmanın ilk kısmı tamamlanmıştır. Bundan sonra aynı koşullar, sistemler ve açıklıklarda manyetik alan sisteme dahil edilmiş, deneyler bu sefer manyetik alan varlığında tekrarlanmıştır.

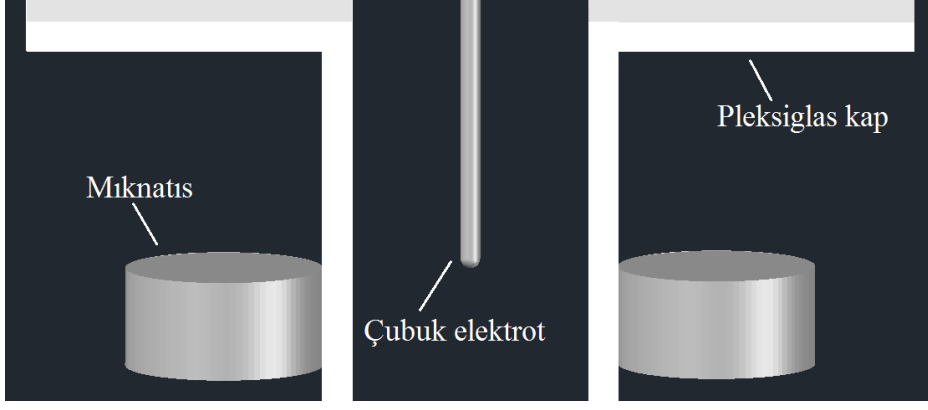
3.3 Manyetik Alanın Elde Edilmesi

Manyetik alanın elde edilmesi birçok yolla gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışmada manyetik alan Neodyum mıknatıslar kullanılarak elde edilmiştir. Neodyum mıknatıslar sıradan mıknatıslara göre çok daha güçlü oldukları ve deneyde gerekli manyetik alanı oluşturabildikleri için tercih edilmiştir (Şekil 3.20).



Şekil 3.20 : Neodyum silindir mıknatıs çap 20 mm, kalınlık 10 mm.

Güçlü bir manyetik alan elde etmek için iki adet Neodyum silindir mıknatıs, kullanılan elektrot sistemine yerleştirilmiştir. Mıknatısın etkisi yüksek alternatif gerilimin verildiği çubuk elektrotadır. Çubuk elektrot ile mıknatısların durumunu gösteren bir model Şekil 3.21'de görülmektedir.

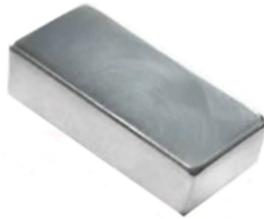


Şekil 3.21 : Neodyum silindir mıknatısların çubuk elektrotla durumlarını gösteren 3 boyutlu model.

Mıknatıslar arası mesafe beş farklı değer için ayarlanmıştır ve böylece manyetik alan beş farklı büyüklükte üretilebilmiştir. Üretilen bu beş farklı büyüklükteki manyetik alan üç farklı elektrot açıklığına uygulanmıştır. Bu işlem yapılırken elektrot düzeneğine daha önceden verildiği gibi yüksek alternatif gerilim verilmiş ve daha sonra manyetik alansız durumla kıyaslamalar gerçekleştirilmiştir.

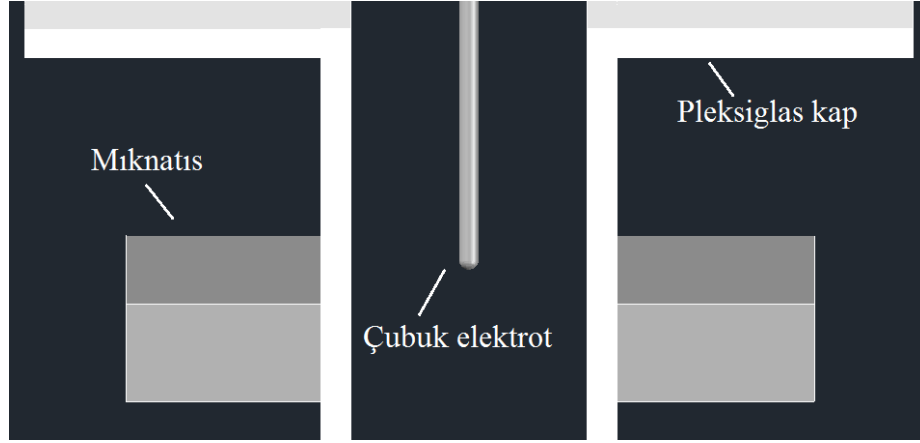
Manyetik alansız durumda farklı yatay ve düşey açıklıklar için on beş KB başlangıç gerilimi verisi ile n-q-p verileri ilk deneylerde elde edilmiştir. Bu elde edilen verileri manyetik alanlı durumla kıyaslamak için silindir mıknatıslar yine aynı yatay ve düşey açıklıklarda on beş deney için kullanılmıştır. Mıknatıslar arası mesafenin değiştirilmesi farklı manyetik akı yoğunluğu değerlerinin elde edilmesi içindir. Bu sayede manyetik alanın etkisinin daha net görülmesi beklenmiştir. Sadece silindir mıknatıslar manyetik alan üretilmesi konusunda on beş deneyde kullanılmıştır ve manyetik alansız durumla her açıklık için kıyaslanmıştır.

Silindir mıknatıs on beş deney için kullanıldıktan sonra ayrı olarak bir de iki adet Neodyum dikdörtgen mıknatısla çalışılmıştır. Dikdörtgen mıknatıslarla sadece 30 mm elektrot açıklığı kullanılmıştır ve üç kap açıklığı durumu için deneyler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.22 : Neodyum dikdörtgen mıknatıs uzunluk 40 mm, genişlik 20 mm ve kalınlık 10 mm.

Şekil 3.23’de elektrot sisteminde kullanılan dikdörtgen mıknatısların üç boyutlu bir modeli görülmektedir. Mıknatıslar arası mesafe 10 mm, 20 mm ve 25 mm için ayarlanarak farklı manyetik akı yoğunluğu değerleri elde edilmiştir. Dikdörtgen mıknatıslarla 30 mm elektrot açıklığında çalışılmıştır.



Şekil 3.23 : Neodyum dikdörtgen mıknatısların çubuk elektrotla durumlarını gösteren 3 boyutlu model.

3.4 Manyetik Alanın Ölçülmesi

Silindir mıknatıslarla manyetik alan oluşturulması beş farklı açıklık için gerçekleştirilmiştir. Bu açıklık değerleri 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm ve 30 mm dir. Mıknatıslar arası mesafe bu açıklıklarda iken bir Gaussmetre yardımıyla manyetik akı yoğunluğu beş farklı değer için ölçülmüştür (Şekil 3.24).



Şekil 3.24 : Manyetik alan ölçüm cihazı (Gaussmetre).

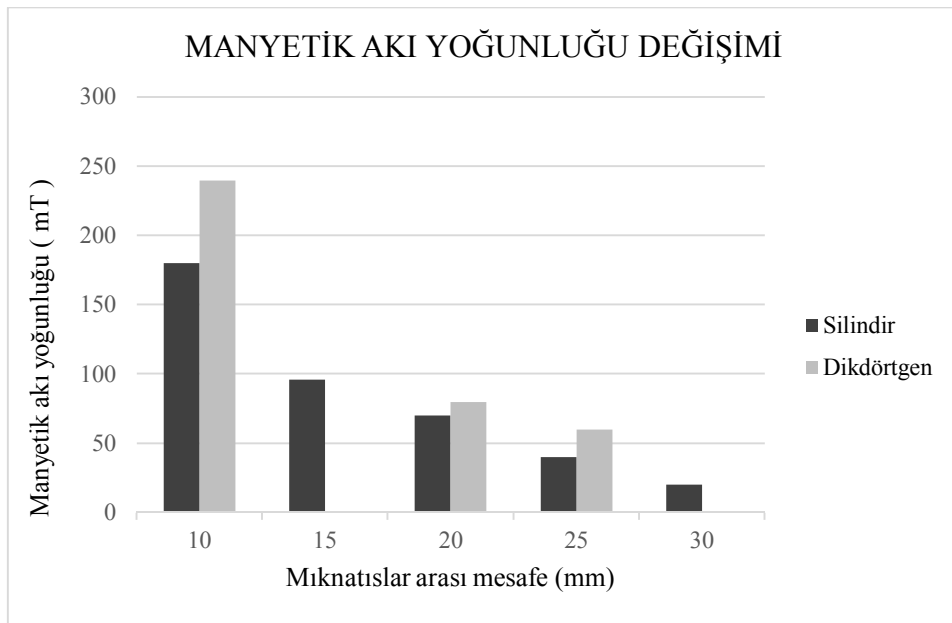
Silindir mıknatısların manyetik akı yoğunluğu değerleri bulunduğundan sonra bu sefer dikdörtgen mıknatıslar ölçüm için pleksiglas kaba konumlandırılmıştır. Dikdörtgen mıknatısların manyetik akı yoğunluğu değerleri 10 mm, 20 mm ve 25 mm açıklıkları için ölçülmüştür.

Ölçme sonucu elde edilen değerler Çizelge 3.5’de verilmiştir. Ölçülen değerler Gauss cinsinden okunmuş bunlar daha sonra mT’ya çevrilmiştir. Bunun nedeni daha önce bu konularda gerçekleştirilmiş çalışmalarda genellikle mT kullanılmasıdır.

Çizelge 3.5 : Mıknatıslar için Gaussmetre ile farklı açıklıklarda manyetik akı yoğunluğu ölçüm sonuçları.

Mıknatıslar arası mesafe (mm)	Manyetik akı yoğunluğu B (mT)	Manyetik akı yoğunluğu B (mT)
	Silindir	Dikdörtgen
10	180	240
15	96	
20	70	80
25	40	60
30	20	

Yapılan ölçümler sonucu Neodyum mıknatıslar arası mesafe arttıkça manyetik alan değerinin oldukça azaldığı görülmüştür (Şekil 3.25).

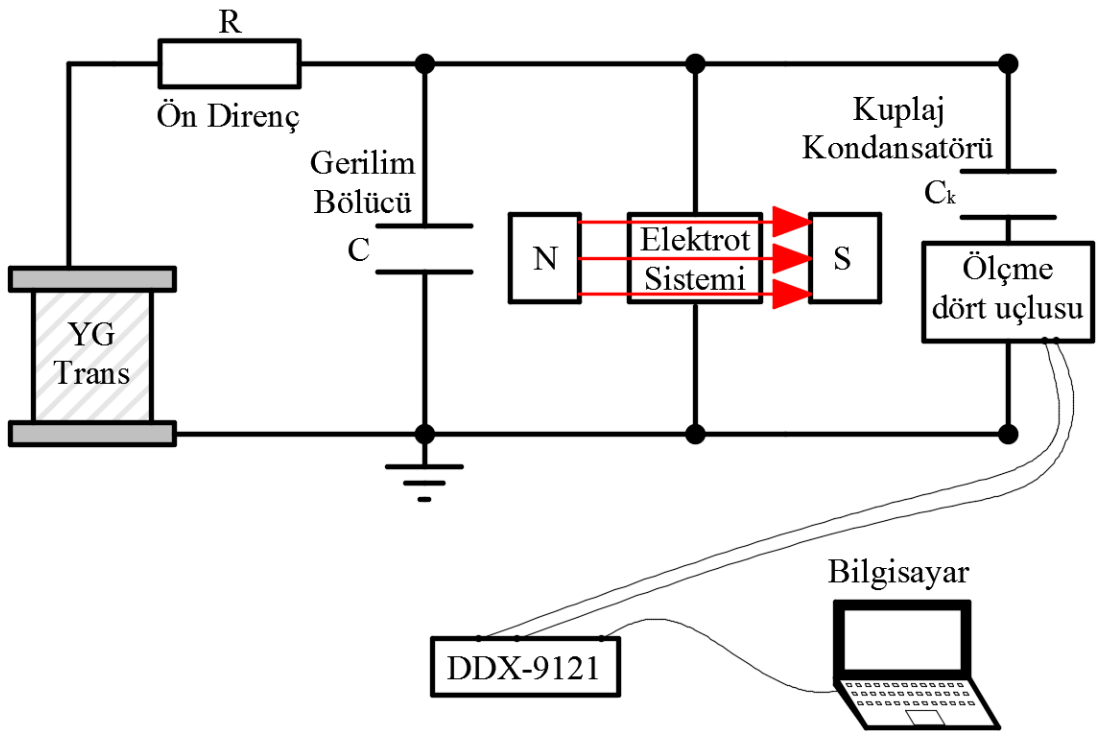


Şekil 3.25 : Mıknatıslar arası mesafe ile B değişimi.

3.5 Manyetik Alanlı Durumda Kısmi Boşalma Sinyallerinin Elde Edilmesi

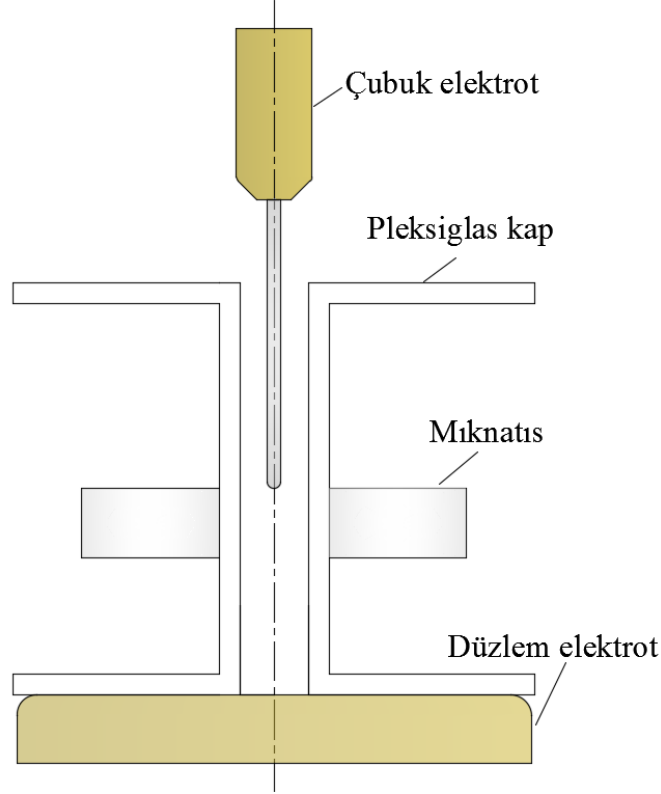
Manyetik alanın olmadığı durum için önceden belirlenen yatay ve düşey açıklıklarda on beş deney, kısmi boşalma başlangıç gerilimini bulmak ve n-q-p grafiklerini elde etmek için yapılmıştır. Bu deneyler tamamlandıktan sonra elektrot sistemine manyetik alan üretmek için önce Neodyum silindir mıknatıslar eklenmiştir. Ayarlanabilir pleksiglas kap içerisine yerleştirilen silindir mıknatıslar üç düşey ve beş yatay açıklık için toplamda yine on beş deneyde, manyetik alansız durumla kıyaslanması için kullanılmıştır. Silindir mıknatıslarla yapılan deneyler bitirildikten sonra dikdörtgen mıknatıslar silindirler yerine düzeneğe eklenmiştir. Dikdörtgen mıknatıslar ise tek düşey açıklık ve üç yatay açıklık için olmak üzere toplamda üç deneyde kullanılmıştır.

Şekil 3.9’da daha önce görülen deney düzeneğindeki elektrot sistemine bu sefer mıknatıslar eklenerek manyetik alan üretilmesi sağlanmıştır. Manyetik alanın elektrot sistemine etkisi ve yeni durum için deney düzeneği Şekil 3.26’da görülmektedir.



Şekil 3.26 : Manyetik alanlı durumda kısmi boşalma üretimi deney düzeneği.

Şekil 3.27’de manyetik alanlı durum için gerçekleştirilen deneylerde kullanılan elektrot sistemi, mıknatıslar ve aralığı ayarlanabilir pleksiglas kap çizilen modelde görülmektedir. Şekil 3.27 silindir ve dikdörtgen mıknatısların ikisi içinde geçerlidir.



Şekil 3.27 : Çubuk-düzlem elektrot sistemine mıknatısların eklendiği durum modeli.

3.5.1 Manyetik alanlı durumda KB başlangıç geriliminin ölçülmesi

Deney düzeneği hazırlandıktan sonra bu sefer manyetik alanlı durumda KB başlangıç gerilimlerinin bulunması için deneylere başlanmıştır. Manyetik alansız durumda gerçekleştirilen ilk deneyde olduğu gibi elektrot açıklığı yine 30 mm'ye kap açıklığı ise 10 mm'ye ayarlanmıştır. İlk durumdan farklı olarak sisteme yeni eklenen silindirik mıknatıslar ise kaba şekil 3.27'de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir.

Manyetik alan etkisini tam olarak görebilmek ve kıyaslayabilmek için yeni durumda yapılan on beş deneyde de daha önce manyetik alansız durumda bulunan KB başlangıç gerilimlerinin %10 arttırılmış değerlerine gelinmiştir. Örneğin, 30 mm düşey ve 10 mm yatay açıklık için manyetik alansız durumda bulunan KB başlangıç gerilimi 7,91 kV'tur. Bu değer yaklaşık %10 arttırılmış değeri ise 8,70 kV'tur. Buna göre manyetik alanlı durumda 30 mm düşey ve 10 mm yatay açıklıkta deneyde çıkılacak en yüksek gerilim değeri 8,70 kV olarak belirlenmiştir. Bu durum manyetik alanlı durumda KB başlangıç gerilimleri bulunurken değil n-q-p ve diğer veriler elde edilirken kullanılmıştır. Manyetik alansız durumda önceden bulunmuş olan diğer on dört deneyin KB başlangıç gerilimlerinin %10 arttırılmış değerleri ise manyetik alanda n-q-p deneyi kısmında tablo ile verilmiştir.

Elektrot sistemi 30 mm düşey ve 10 mm yatay açıklıklarına ayarlandıktan sonra bu açıklıklarda manyetik alan varlığında KB başlangıç gerilimini belirlemek için ilk deneye başlanmıştır. Gerilim yine kumanda masasında bulunan varyak yardımıyla sıfırdan başlanarak arttırılmıştır. Manyetik alansız durumda gerçekleştirilen ilk deneyde 30 mm düşey ve 10 mm yatay açıklık için KB başlangıç gerilimi 7,91 kV bulunmuştur. Bu sefer aynı sisteme silindir mıknatıslar eklenerek manyetik alan oluşturulduğunda deney gerçekleştirilerek veriler elde edilmiştir (Çizelge 3.6). Elde edilen veriler incelenerek manyetik alanlı durumda KB başlangıç gerilimi bulunmuştur.

Çizelge 3.6 : Manyetik alanlı durumda 30 mm düşey, 10 mm yatay açıklık için KB başlangıç gerilimi deney verilerinin bir kısmı.

Gerilim değeri U (kV)	Boşalma büyüklüğü q (pC)
5,68	1,72
5,79	1,48
5,89	51,0
5,93	22,3
5,94	78,7
5,94	81,9
5,98	81,9
5,98	105

Çizelge 3.6’da görülen veriler silindir mıknatısların kullanıldığı duruma aittir. Veriler incelendiğinde gerilim varyak yardımıyla arttırılırken sistemde yaklaşık 2 pC seviyesinde gürültü belirlenmiştir. 5,89 kV altındaki gerilim değerlerinde elde edilen verilerde 2 pC üzerinde kalıcı bir boşalma görülmediği için o kısımlar çizelgeye dahil edilmemiştir. 5,68 kV ve 5,79 kV değerinde gürültü dışında bir yükselme görülmemiştir. Buna karşın 5,79 kV değerinden 5,89 kV seviyesine çıkılırken pC değeri 51,0 pC seviyesine yükselmiştir. Bu yükselme daha sonra 2 pC olan gürültü seviyesine düşmediği için ve arkasından boşalmalar gerçekleşmeye devam ettiği için 51,0 pC değerinin görüldüğü saniyedeki gerilim değeri olan 5,89 kV, silindir mıknatıslar varken manyetik alanlı durumda 30 mm düşey ve 10 mm yatay açıklıkları için KB başlangıç gerilimi olarak belirlenmiştir. Deney tamamlandıktan sonra belirlenen gerilim değeri not edilmiştir. Aynı şekilde farklı açıklıklar için diğer on dört deneyde gerçekleştirildikten sonra bulunan değerler not edilmiştir. Bunların incelenmesi ve kıyaslanmaları ise tezin analiz kısmında gerçekleştirilmiştir.

Manyetik alanlı durumda yapılan bir başka deneyde elektrot açıklığı 35 mm'ye silindir mıknatıslar arası mesafe ise 20 mm'ye ayarlanmıştır. Gerilim yine varyak yardımıyla arttırılarak deney verileri elde edilmiştir. Elde edilen verilerin önemli kısmı Çizelge 3.7'de görülmektedir.

Çizelge 3.7 : Manyetik alanlı durumda 35 mm düşey, 20 mm yatay açıklık için KB başlangıç gerilimi deney verilerinin bir kısmı.

Gerilim değeri U (kV)	Boşalma genliği q (pC)
7,99	2,12
8,03	1,70
8,02	38,3
8,02	66,5
8,11	81,9
8,14	81,9
8,14	81,9
8,13	81,9

Çizelge 3.7'den sürekli kısmi boşalmaların başladığı ilk gerilim değeri 8,02 kV olarak belirlenmiştir. Bu değer deneyi yapılan yatay ve düşey açıklık için KB başlangıç değeridir.

Manyetik alanlı durumda 40 mm düşey ve 15 mm yatay açıklık için gerçekleştirilen deneye ait verilerden önemli kısmı Çizelge 3.8'de görülmektedir.

Çizelge 3.8 : Manyetik alanlı durumda 40 mm düşey, 15 mm yatay açıklık için KB başlangıç gerilimi deney verilerinin bir kısmı.

Gerilim değeri U (kV)	Boşalma genliği q (pC)
7,46	1,54
7,50	1,52
7,63	1,56
7,78	74,7
7,83	81,8
7,83	79,9
7,83	79,9
7,88	145

Çizelge 3.8'deki verileri incelendiğinde sürekli boşalmaların başladığı ilk gerilim değeri, gerilimin 7,63 kV seviyesinden 7,78 kV değerine çıktığı an olarak görülmüştür. Burada boşalma genliği değeri 1,56 pC değerinden 74,7 değerine

yükselmiştir. Bu sonuçlara göre silindir mıknatısların kullanıldığı manyetik alanlı durumda 40 mm düşey ve 10 mm yatay açıklıkları için KB başlangıç gerilimi değeri 7,78 kV olarak bulunmuştur.

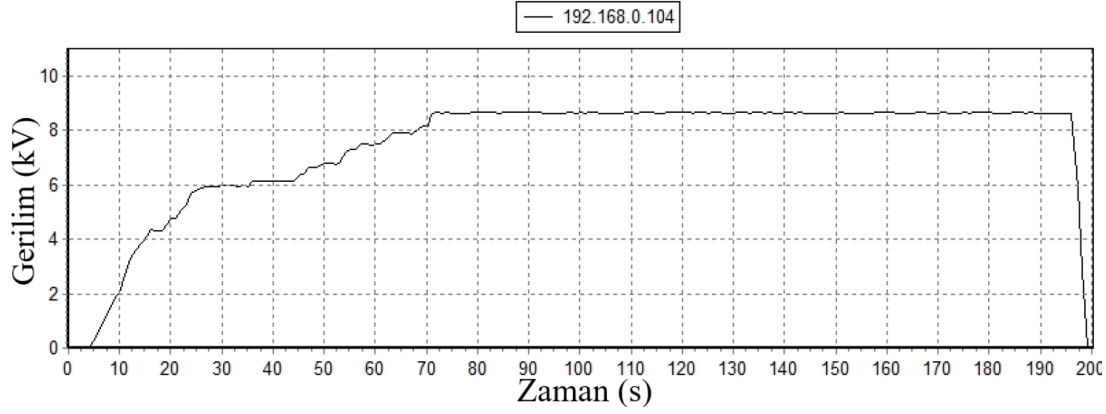
Silindir mıknatıslar kullanılarak üretilen manyetik alanın yatay ve düşey üç farklı açıklık durumu için elektrot sistemine uygulandığı durumlara ait verilerin bir kısmı Çizelge 3.6, Çizelge 3.7 ve Çizelge 3.8 de verilmiştir. Geriye kalan on iki deneye ait veri ise burada verilmemiştir. Bunun yerine silindir mıknatısların kullanıldığı manyetik alanlı durum için farklı açıklıklarda gerçekleştirilen tüm deneylere ait bulunan KB başlangıç gerilim değerleri Çizelge 3.9’da bir arada verilmiştir.

Çizelge 3.9 : Manyetik alanlı durumda üç yatay ve düşey açıklık için yapılan deneylerde bulunan KB başlangıç gerilimi değerleri.

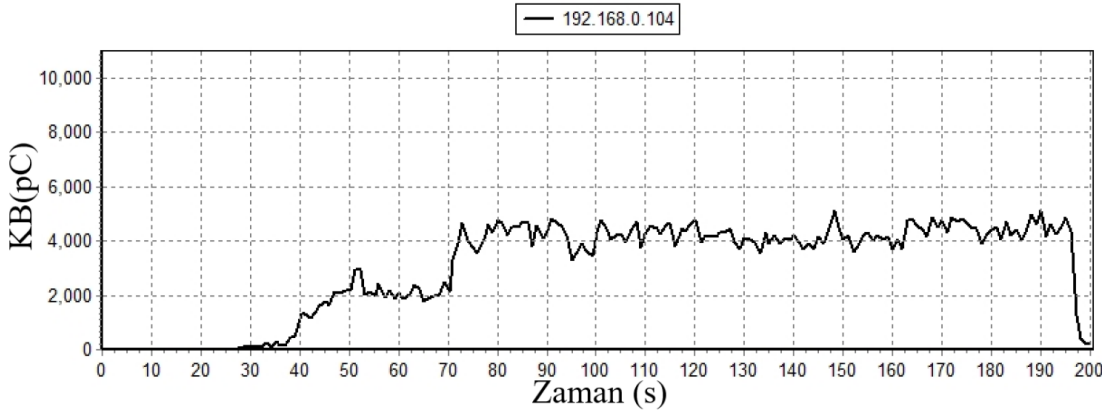
	Elektrot açıklığı 30 mm	Elektrot açıklığı 35 mm	Elektrot açıklığı 40 mm
Mıknatıs açıklığı 10 mm	5,89 kV	6,62 kV	7,33 kV
Mıknatıs açıklığı 15 mm	7,42 kV	7,66 kV	7,78 kV
Mıknatıs açıklığı 20 mm	7,91 kV	8,02 kV	8,35 kV
Mıknatıs açıklığı 25 mm	8,15 kV	8,29 kV	8,52 kV
Mıknatıs açıklığı 30 mm	8,27 kV	8,57 kV	8,76 kV

Çizelge 3.9’da manyetik alanlı durumda on beş durum için elde edilen KB başlangıç gerilimi değerleri görülmektedir. Bu değerlerin hepsi silindir mıknatıslar kullanılarak elde edilmiştir. Dikdörtgen mıknatıslar ise sadece üç durum için kullanılmıştır. 30 mm elektrot ve 10 mm, 15 mm, 25 mm mıknatıs açıklığı değerlerinde bu deneyler gerçekleştirilmiştir. Dikdörtgen mıknatıslar kullanılarak elde edilen KB başlangıç gerilimi değerleri ise manyetik alanlı ve alansız durumlar için analiz kısmında verilmiştir.

Manyetik alanlı durumda silindir mıknatıslarla gerçekleştirilen ilk deney ile ilgili KB ölçüm cihazının verdiği rapordaki gerilim-zaman grafiği Şekil 3.28’de boşalma genliği-zaman grafiği ise Şekil 3.29’da görülmektedir.



Şekil 3.28 : Manyetik alanlı durumda 30 mm düşey, 10 mm yatay açıklık deneyi gerilim - zaman grafiği.



Şekil 3.29 : Manyetik alanlı durumda 30 mm düşey, 10 mm yatay açıklık deneyi boşalma genliği - zaman grafiği.

Manyetik alanda KB başlangıç gerilimi bulma deneyleri tamamlandıktan sonra manyetik alanlı durumda n-q-p deneylerine geçilmiştir.

3.5.2 Manyetik alanlı durumda n-q-p deneyleri

KB başlangıç gerilimi değerlerini bulma deneyleri gerçekleştirilirken n-q-p deney verileri de kısmi boşalma ölçüm cihazının bilgisayardaki programından ayrı olarak başlatılarak elde edilmiştir. Daha önce manyetik alansız durum için farklı açıklıklarda on beş deneyde bulunan kısmi boşalma başlangıç gerilimi değerleri not edilmiştir. N-q-p deneylerinde farklı yatay ve düşey açıklıklarda bulunan on beş KB başlangıç gerilimi değerlerinin %10 daha fazlası kullanılmıştır. Örneğin, 30 mm düşey ve 10 mm yatay açıklıkları için manyetik alansız durumda bulunan KB başlangıç gerilimi 7,91 kV'tur. Bu değer yaklaşık %10 fazlası olan 8,70 kV değeri not edilmiştir. Aynı açıklıklar için bu sefer silindir mıknatıslarla oluşturulan manyetik alan varlığında gerilim varyak yardımıyla sıfırdan başlanarak 8,70 kV

değerine kadar arttırılmıştır. Burada manyetik alanlı ve alansız durumlarda n-q-p verileri elde edilirken aynı süreler tutulmuştur ve iki durum içinde en yüksek gerilim deneylerde 8,70 kV olmuştur. Bu sayede iki durumun kıyaslanması amaçlanmıştır. Bu kıyaslanmanın yapılabilmesi için aynı açıklık değerlerinde manyetik alansız durumda elde edilen veriler program içerisinde açılarak, manyetik alanlı durumda elde edilen verilerle aynı grafik üzerinde incelenmiştir. Bu incelemeler ve sonuçları verilerin analizi kısmında verilmiştir.

Manyetik alansız durumda bulunan on beş KB başlangıç geriliminin yaklaşık %10 arttırılmış değerleri Çizelge 3.10'da verilmiştir. N-q-p deneylerinin verilerini doğru bir şekilde kıyaslamak için bu değerler önemlidir.

Çizelge 3.10 : Manyetik alansız durumda bulunan on beş KB başlangıç geriliminin %10 arttırılmış değerleri.

Elektrotlar Arası Açıklık	Manyetik Alan Varlığı	Kabın Dış Yüzeyleri Arası Açık				
		10 mm	15 mm	20 mm	25 mm	30 mm
30 mm	Yok	7,91	8,11	8,29	8,65	8,5
	(~ % 10)	8,70	9,14	9,12	9,52	9,35
35 mm	Yok	8,38	8,43	8,47	8,91	8,99
	(~ % 10)	9,22	9,27	9,32	9,80	9,89
40 mm	Yok	8,62	8,60	8,85	9,14	9,30
	(~ % 10)	9,49	9,46	9,74	10,05	10,3

4. VERİLERİN ANALİZİ

Bu tez çalışmasında ilk başta manyetik alansız durumda üç farklı elektrot ve beş farklı pleksiglas kap açıklığında toplam on beş deney gerçekleştirilmiştir. Elektrot sistemine kumanda masasında bulunan bir varyak yardımıyla yüksek alternatif gerilim uygulanmıştır. Manyetik alansız durumla ilgili deneylere ait veriler KB ölçüm cihazı ve bir bilgisayar yardımıyla kaydedilmiştir. Manyetik alansız durumdaki deneyler bitirildikten sonra bu sefer manyetik alanlı durumdaki deneylere geçilmiştir. İlk olarak iki adet Neodyum silindir mıknatıs sisteme eklenmiştir. Mıknatıslar pleksiglas kaba eklenerek mıknatısların aralıkları beş açıklık için ayarlanabilir hale getirilmiştir. Bu sayede manyetik alansız durumda gerçekleştirilen on beş deney ile silindir mıknatıslarla manyetik alanlı durumda gerçekleştirilen on beş deney aynı yatay ve düşey açıklıklarda birbirleriyle kıyaslanabilmiştir. Silindir mıknatısların deneyleri bitirildikten sonra bu sefer sisteme iki adet Neodyum dikdörtgen mıknatıs eklenmiştir. Bu mıknatıslar sadece 30 mm elektrot açıklığında ve üç kap açıklığı için kullanılmıştır.

Yapılan çalışmada ilk araştırılan konu manyetik alanın kısmi boşalma başlangıç gerilimine olan etkisidir. İkinci olarak manyetik alanlı durum ile manyetik alansız durumlarda elde edilen verilerin n-q-p analizlerine bakılarak KB sinyalinin faz, boşalma genliği ve sayıları açılarından incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu inceleme hem silindir mıknatısların hem de dikdörtgen mıknatısların kullanıldığı iki durum için de yapılmıştır.

Verilerin analizi bölümünde bu elde edilen deney verilerinin incelenmesi gerçekleştirilmiştir ve grafikler verilmiştir. Ayrıca silindir ve dikdörtgen mıknatıslarla farklı kap açıklıkları için üretilen manyetik alanların dağılımları ile çubuk-düzlem elektrot sistemindeki elektrik alan dağılımı FEMM (Finite Element Method) programı ile modellenerek incelenmiştir. Mıknatısların yüzeyinden belirli uzaklıktaki noktalara ait manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti programdan hesaplanmıştır. Elde edilen değerler tabloyla verilerek grafikleri çizilmiştir.

4.1 Manyetik Alanın Kısmi Boşalma Başlangıç Gerilimine Etkisi

Manyetik alanın KB başlangıç gerilimine etkisinin araştırılması için öncelikle manyetik alanın olmadığı durumda seçilen 30 mm, 35 mm ve 40 mm elektrot açıklıkları ve 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm ve 30 mm pleksiglas kap açıklıkları için ölçümler gerçekleştirilmiştir. Sürekli kısmi boşalmaların başladığı andaki ilk gerilim KB başlangıç gerilimi olarak alınmıştır. Bulunan KB başlangıç gerilim değerleri %10 daha arttırılarak bir süre daha elektrot sistemine uygulanmıştır ve bu değerler de not edilmiştir. Daha sonra manyetik alan varlığında aynı deneyler tekrarlanmış ve %10 arttırılmış gerilim değerlerine kadar gelinerek KB başlangıç gerilimleri ve n-q-p verileri kaydedilmiştir.

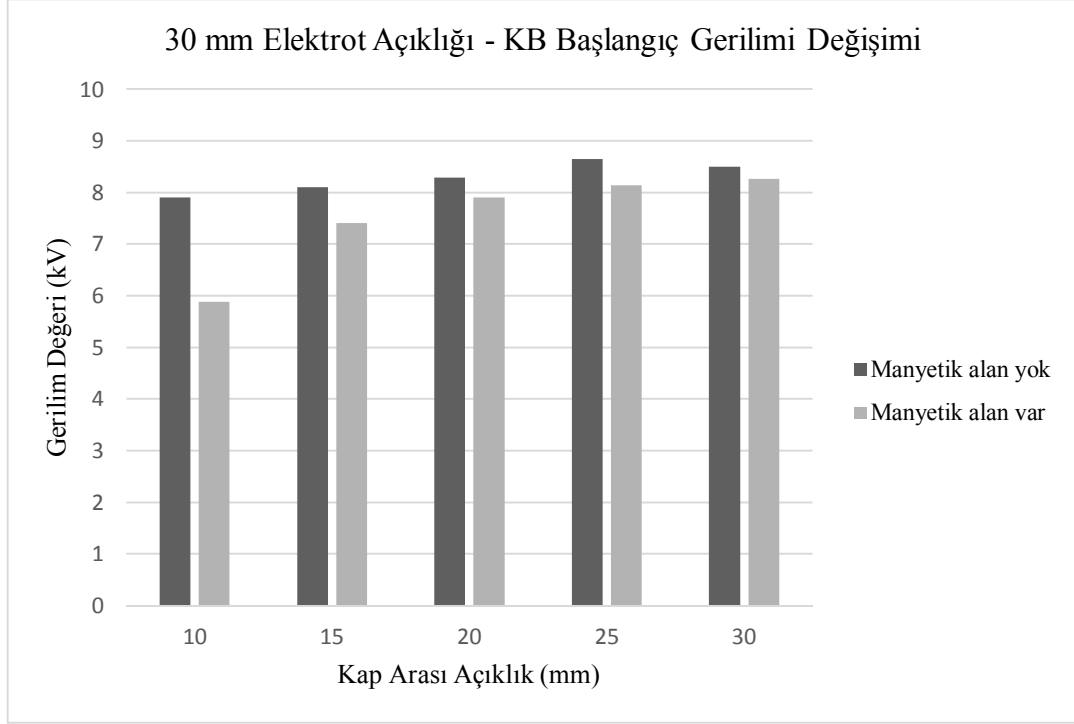
Çizelge 4.1’de kısmi boşalma başlangıç gerilimi deneyleri boyunca bulunan değerler görülmektedir. Buradaki manyetik alan varlığı silindir mıknatıslarla oluşturulmuştur.

Çizelge 4.1 : Kısmi boşalma başlangıç gerilimi bulma deneylerinin sonuçları.

Elektrotlar Arası Açıklık	Manyetik Alan Varlığı (Gerilim Artışı)	Kabın Dış Yüzeyleri Arası Açık				
		10 mm	15 mm	20 mm	25 mm	30 mm
30 mm	Yok	7,91	8,11	8,29	8,65	8,5
	Var	5,89	7,42	7,91	8,15	8,27
	(~ % 10)	8,70	9,14	9,12	9,52	9,35
35 mm	Yok	8,38	8,43	8,47	8,91	8,99
	Var	6,62	7,66	8,02	8,29	8,57
	(~ % 10)	9,22	9,27	9,32	9,80	9,89
40 mm	Yok	8,62	8,60	8,85	9,14	9,30
	Var	7,33	7,78	8,35	8,52	8,76
	(~ % 10)	9,49	9,46	9,74	10,05	10,3

Çizelge 4.1’den kısmi boşalma başlangıç gerilimi değerleri belirli yatay ve düşey açıklık değerleri için manyetik alanlı ve alansız durumlarda görülmektedir.

Manyetik alan varlığının KB başlangıç gerilimini düşürdüğü deney sonuçlarından bulunmuştur. Mıknatıslar arası mesafe en küçük olduğu durumda manyetik akı yoğunluğu en büyük olduğundan en büyük etki bu aralık için görülmüştür. Seçilen 30 mm elektrot açıklığı için mıknatıslar arası mesafenin artmasının yani manyetik akı yoğunluğunun azalmasının KB başlangıç gerilimine etkisi Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

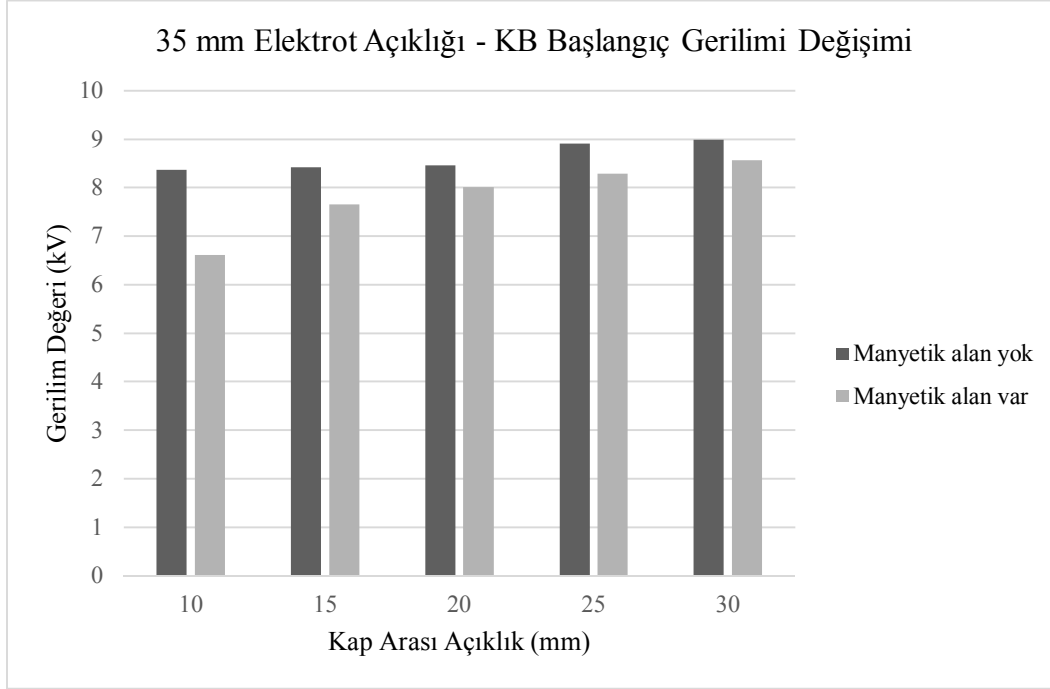


Şekil 4.1 : 30 mm elektrot açıklığı için KB başlangıç gerilim değerlerinin farklı açıklıklardaki silindirik mıknatıslarla değişimi.

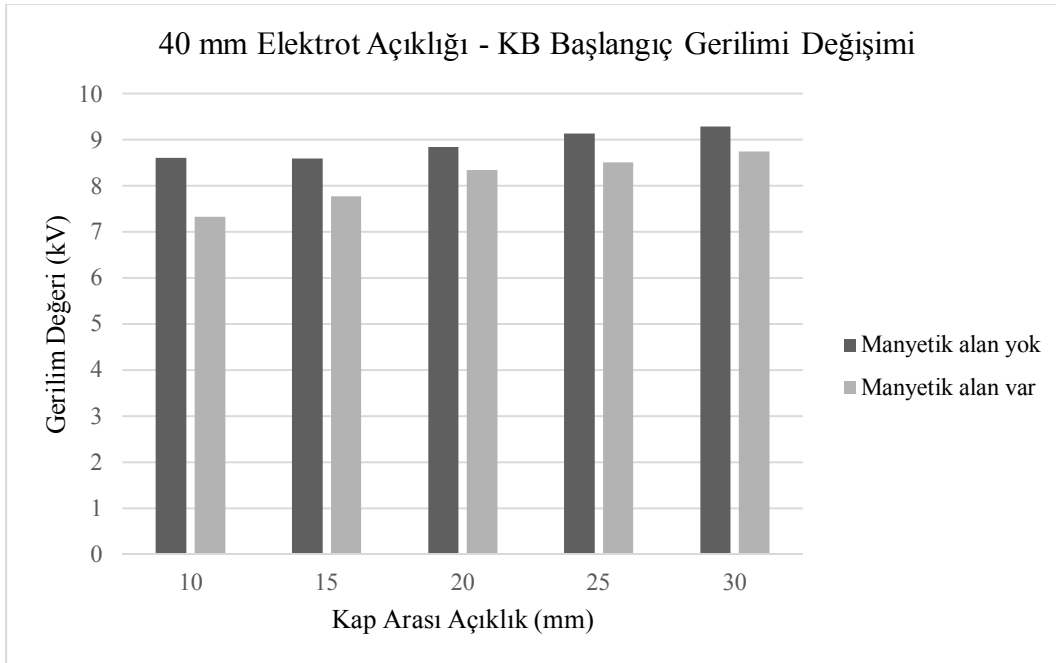
Şekil 4.1’e bakıldığında manyetik alanın en büyük etkisi 10 mm açıklık değerindedir. Bu açıklık değerinde mıknatıslar arası mesafe en düşük olduğu için manyetik akı yoğunluğu en büyüktür. Manyetik akı yoğunluğu ne kadar güçlü ise KB başlangıç gerilimi değerini o ölçüde etkilemiştir ve düşürmüştür. Ayrıca kap arası açıklığın artması KB başlangıç gerilimini genelde yükseltmiştir.

30 mm elektrot açıklığında manyetik alanın etkisi incelendikten sonra 35 mm ve 40 mm elektrot açıklıklarına geçilmiştir. Şekil 4.2’de 35 mm ve Şekil 4.3’de 40 mm elektrot açıklıkları için grafikler görülmektedir. Bu grafiklerde de 30 mm elektrot açıklığına benzer durumlar oluşmuştur. Silindirik mıknatıslar arası mesafe küçük olduğu durumlarda KB başlangıç geriliminde azalma daha fazla olmuştur. Silindirik mıknatıslar arası mesafeler arttıkça KB başlangıç gerilimine olan etki de azalmıştır.

Ayrıca yine kap arası açıklık arttıkça genelde KB başlangıç geriliminde yükselmeler belirlenmiştir.



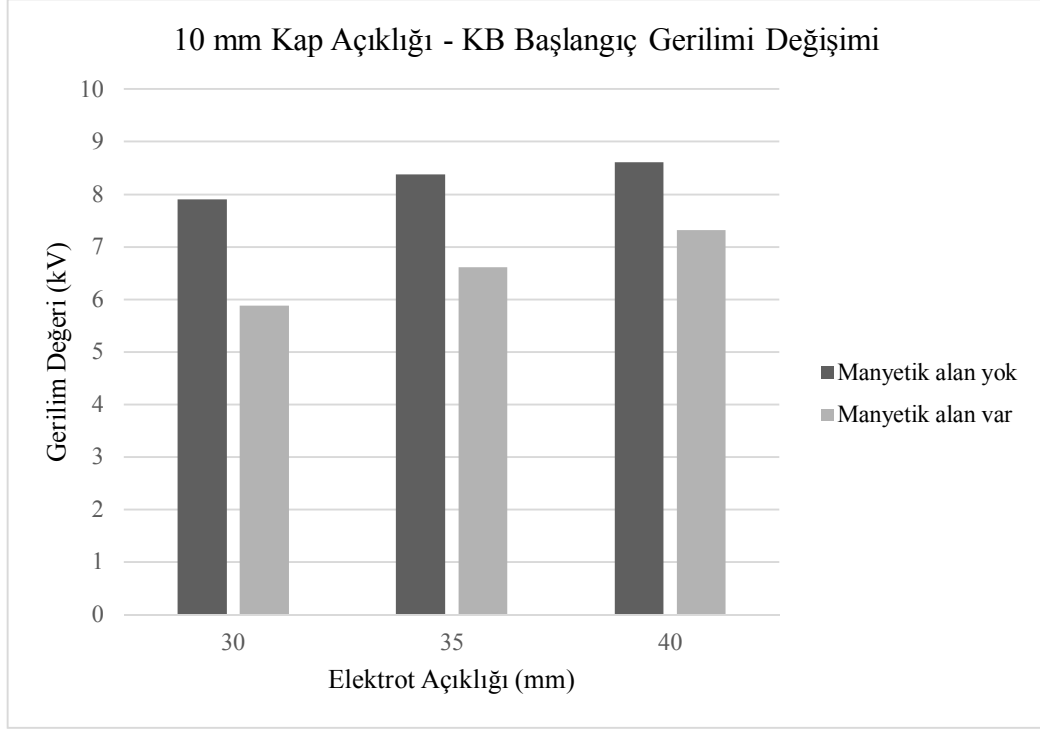
Şekil 4.2 : 35 mm elektrot açıklığı için KB başlangıç gerilim değerlerinin farklı açıklıklardaki silindir mıknatıslarla değişimi.



Şekil 4.3 : 40 mm elektrot açıklığı için KB başlangıç gerilim değerlerinin farklı açıklıklardaki silindir mıknatıslarla değişimi.

Elektrot açıklığı değişiminin kısmi boşalmanın başlangıç gerilimine etkisi de elde edilen verilerle incelenmiştir. Bu sefer kap açıklığı sabit tutulmuştur ve elektrot

açıklığının artmasının KB başlangıç gerilimini ne şekilde değiştirdiği araştırılmıştır. İlk inceleme 10 mm kap açıklığı için gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.4). Burada bahsedilen kap açıklığı (dış kap açıklığı) aynı zamanda silindir mıknatıslar arası açıklıktır. Mıknatısların olmadığı durumla daha rahat kıyaslanması açısından kap açıklığı ifadesi kullanılmıştır.

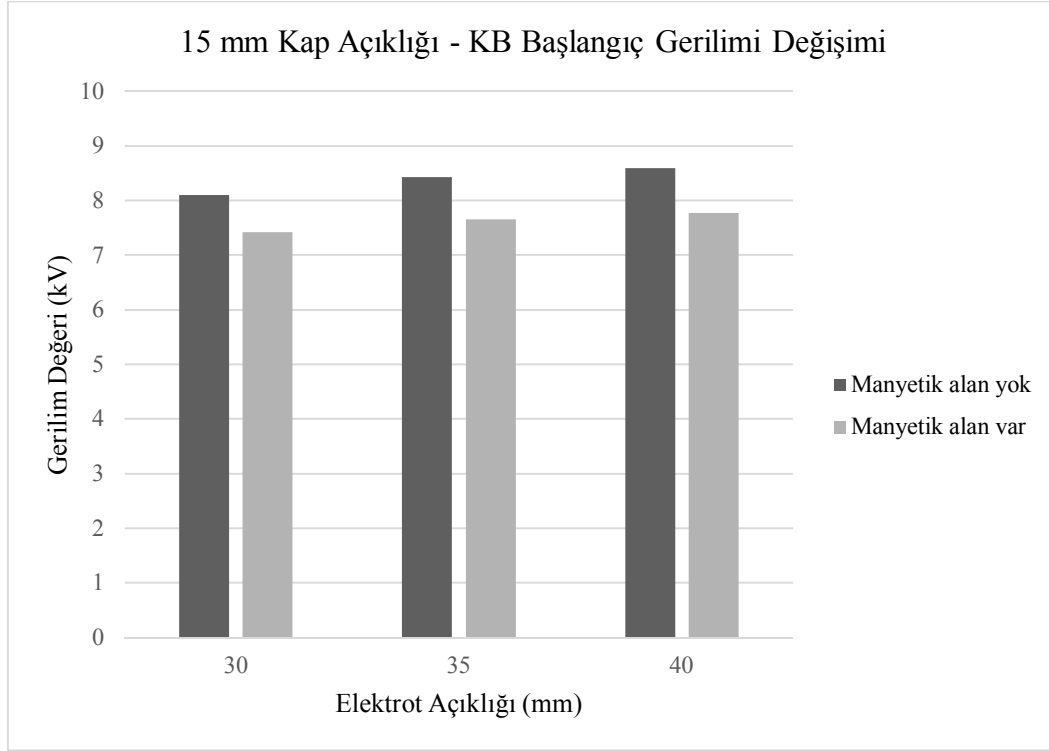


Şekil 4.4 : 10 mm kap açıklığı için KB başlangıç gerilim değerlerinin farklı elektrot açıklıklarındaki değişimi.

Şekil 4.4 incelendiğinde öncelikle manyetik alanlı ve manyetik alansız durumların ikisinde de elektrot açıklığı arttıkça KB başlangıç gerilimi değerlerinde artmalar görülmüştür. Aynı zamanda elektrot açıklığı arttıkça manyetik alan varlığının KB başlangıç gerilimi değeri üzerine etkisi de 10 mm kap açıklığında daha azalmıştır. 30 mm elektrot açıklığında en büyük etki gözlemlenmiştir.

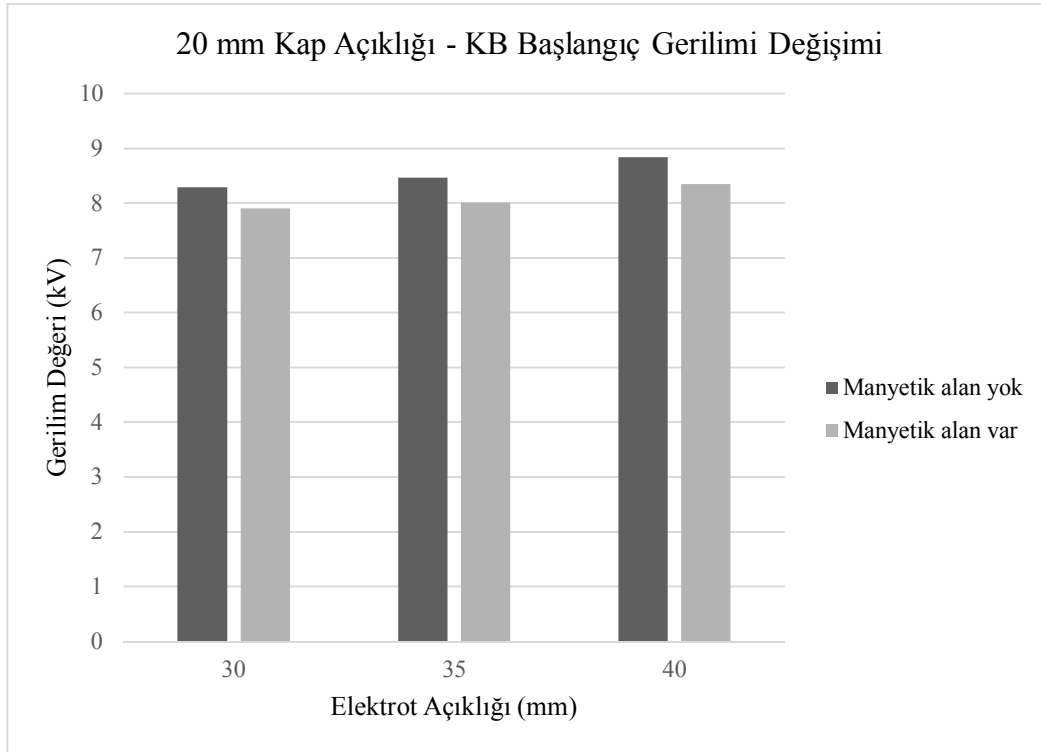
10 mm kap açıklığı incelendikten sonra 15 mm, 20 mm, 25 mm ve 30 mm kap açıklıkları içinde benzer grafikler elde edilerek elektrot açıklığının etkileri araştırılmıştır.

Şekil 4.5’ de 15 mm kap açıklığı için grafik görülmektedir. Burada da elektrot açıklığı arttıkça KB başlangıç gerilimi manyetik alanlı ve alansız durumların ikisi içinde artmıştır. Ancak elektrot açıklığının artması ile manyetik alan varlığının KB başlangıç gerilimi değeri üzerindeki etkisinde büyük farklılık görülmemiştir.



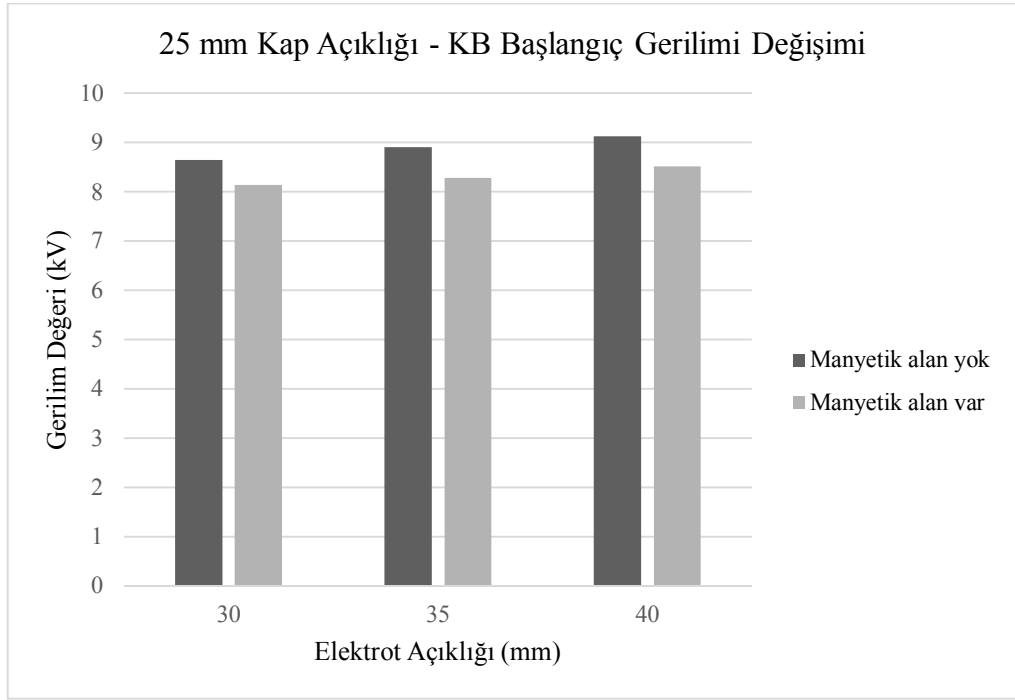
Şekil 4.5 : 15 mm kap açıklığı için KB başlangıç gerilim değerlerinin farklı elektrot açıklıklarındaki değişimi.

Şekil 4.6’da 20 mm kap açıklığı için grafik görülmektedir.



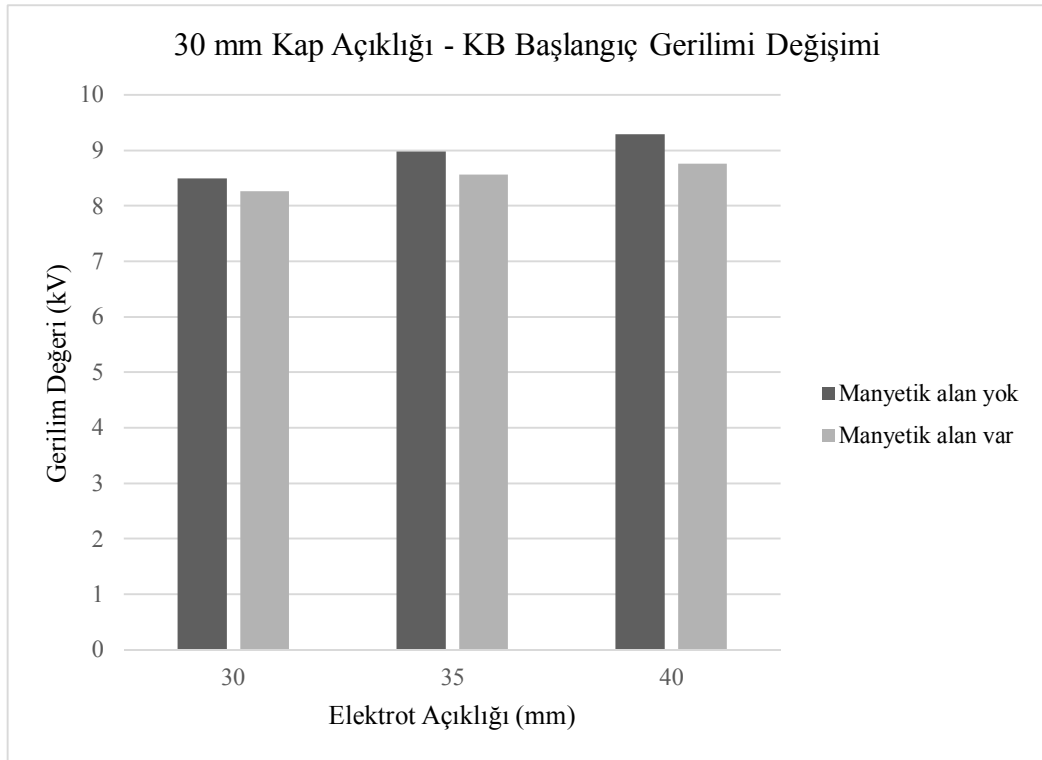
Şekil 4.6 : 20 mm kap açıklığı için KB başlangıç gerilim değerlerinin farklı elektrot açıklıklarındaki değişimi.

Şekil 4.7’de 25 mm kap açıklığı için grafik görülmektedir.



Şekil 4.7 : 25 mm kap açıklığı için KB başlangıç gerilim değerlerinin farklı elektrot açıklıklarındaki değişimi.

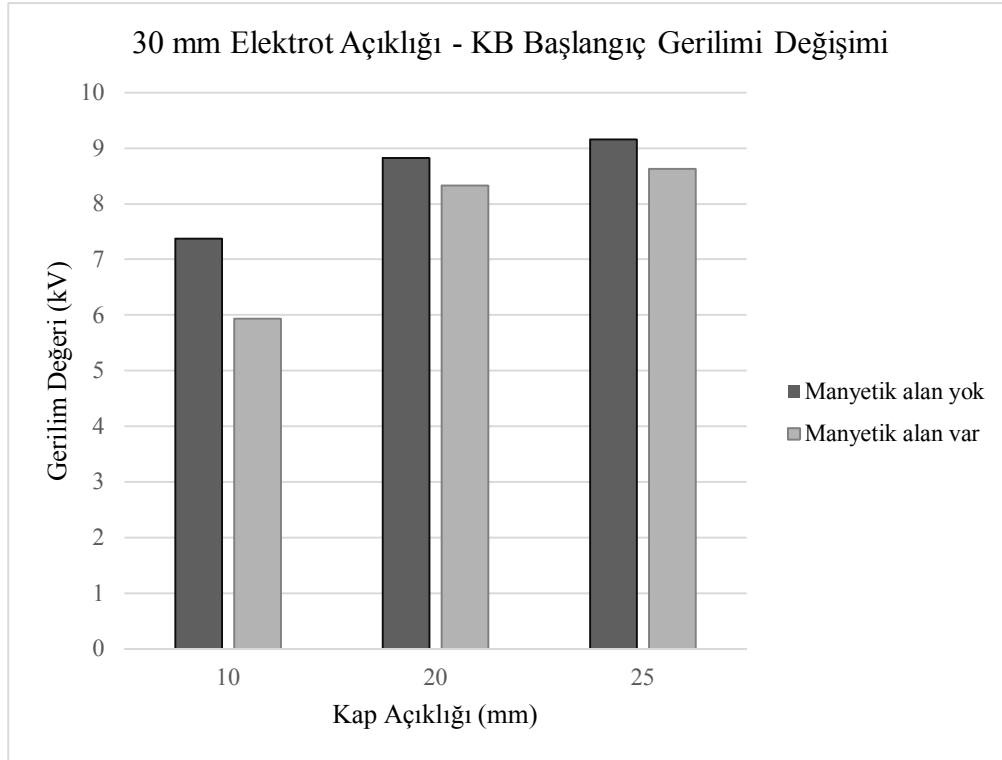
Şekil 4.8’de 30 mm kap açıklığı için grafik görülmektedir.



Şekil 4.8 : 30 mm kap açıklığı için KB başlangıç gerilim değerlerinin farklı elektrot açıklıklarındaki değişimi.

20 mm, 25 mm ve 30 mm kap açıklıklarında yine elektrot açıklığı arttıkça KB başlangıç geriliminin de arttığı görülmüştür.

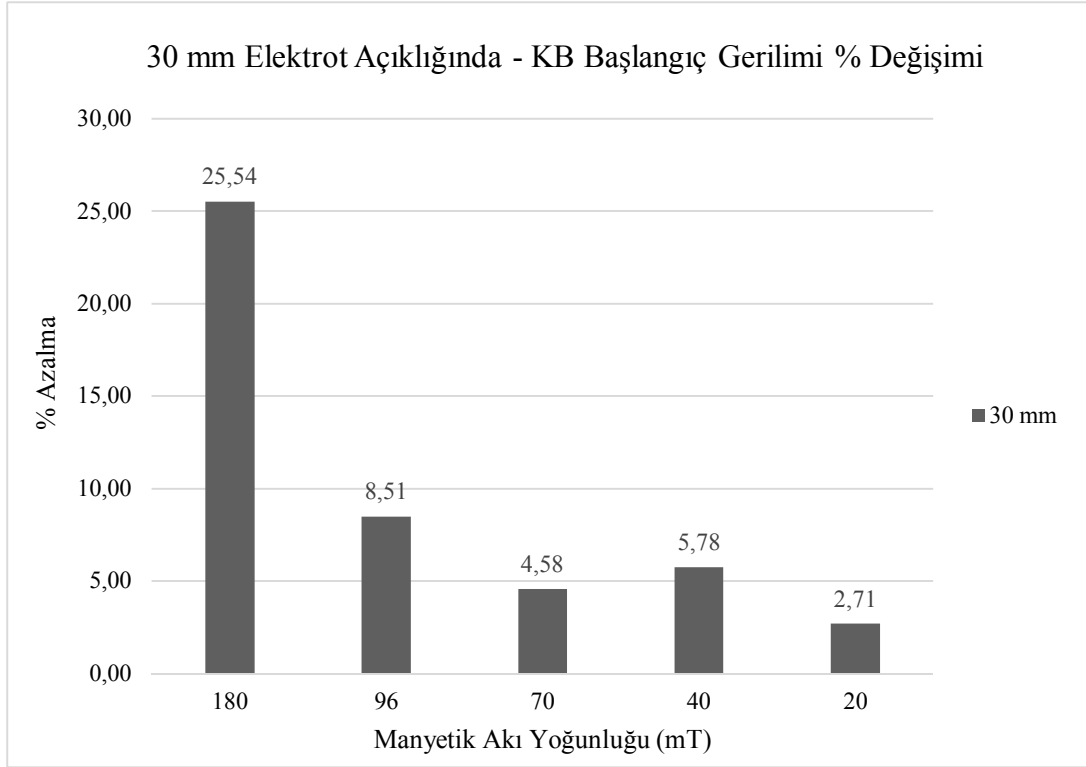
Silindir mıknatıslarla oluşturulan farklı büyüklükteki manyetik akı yoğunluklarının KB başlangıç gerilimine etkisi incelendikten sonra dikdörtgen mıknatıslarla kıyaslamalar yapılmıştır. Manyetik alansız durumda alanın veriler bu sefer dikdörtgen mıknatıslarla oluşturulan manyetik alanlarda sadece 30 mm elektrot açıklığında üç farklı kap açıklığı için kıyaslanmıştır.



Şekil 4.9 : 30 mm elektrot açıklığı için KB başlangıç gerilim değerlerinin farklı açıklıklardaki dikdörtgen mıknatıslarla değişimi.

Şekil 4.9’da dikdörtgen mıknatıslarla oluşturulan üç farklı büyüklükteki manyetik akı yoğunluğunun KB başlangıç gerilimine etkisi görülmektedir. 30 mm elektrot açıklığında elde edilen veriler incelendiğinde 10 mm kap açıklığında KB başlangıç geriliminde en büyük azalma görülmektedir. Kap açıklığı yani dikdörtgen mıknatıslar arası mesafe arttıkça manyetik akı yoğunluğu azaldığı için KB başlangıç gerilimine olan etki de azalmıştır. 25 mm ile 10 mm kap açıklığındaki KB başlangıç gerilimindeki azalma miktarının farklı olmasının nedeni budur. Grafikler ayrı ayrı incelendiklerinde ise manyetik alanlı ve alansız durumların ikisinde de kap açıklığı arttıkça KB başlangıç geriliminde yükselmeler görülmüştür.

Kap ve elektrot açıklığı kıyaslamalarının dışında KB başlangıç gerilimi üzerine bir başka analizde gerçekleştirilmiştir. Mıknatıslarla oluşturulan manyetik akı yoğunluğu değerlerinin KB başlangıç değerlerinde yüzde olarak ne kadar bir azalmaya neden olduğu belirlenmiştir.

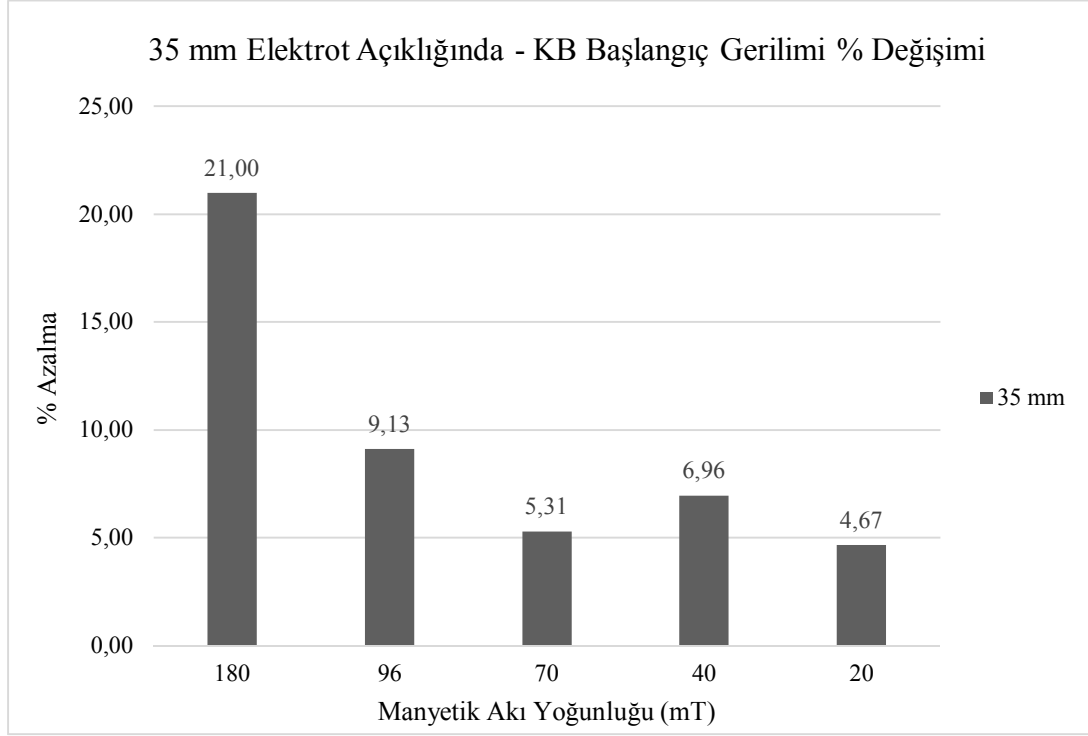


Şekil 4.10 : 30 mm elektrot açıklığında KB başlangıç gerilimi değerinin farklı manyetik akı yoğunluğu değerlerinde azalma yüzdesi.

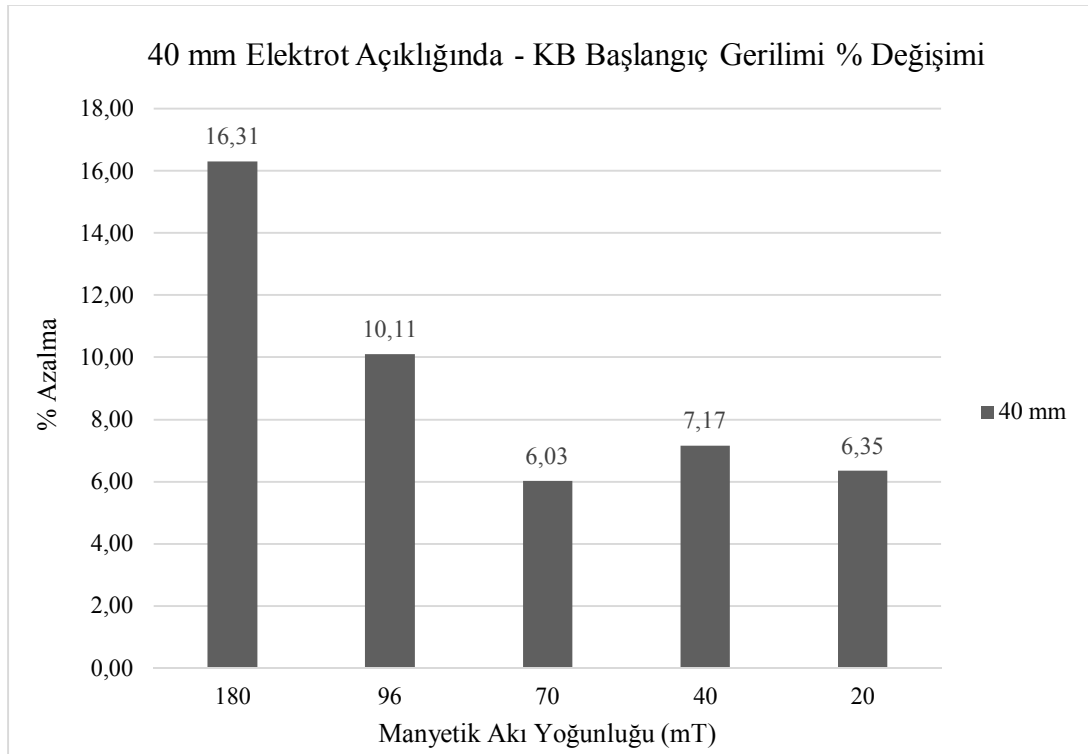
Şekil 4.10'da 30 mm elektrot açıklığında farklı manyetik akı yoğunluklarında KB başlangıç gerilimi değerlerindeki yüzde azalmalar görülmektedir. Bu manyetik akı yoğunluğu değerleri silindir mıknatısların beş farklı kap açıklığında kullanıldıkları durumlara aittir. 30 mm elektrot açıklığında, manyetik alansız durumdaki KB başlangıç geriliminin 180 mT'lık bir manyetik akı yoğunluğuyla %25,54 azaldığı görülmüştür. Manyetik akı yoğunluğu değerinin en yüksek olduğu durumda KB başlangıç gerilimindeki azalma en büyük olmuştur. 20 mT etkisinde ise KB başlangıç geriliminde %2,71'lik bir azalma belirlenmiştir. Beş değere ait yüzde azalmalar Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

30 mm elektrot açıklığından sonra benzer analizler 35 mm ve 40 mm elektrot açıklıkları için de gerçekleştirilmiştir. Bu iki analizde de 30 mm de olduğu gibi en büyük azalma yüzdesi 180 mT değerinde görülmüştür. Genellikle mT değeri azaldıkça KB başlangıç gerilimindeki azalma yüzdelerinde de düşüş görülmüştür.

Şekil 4.11’de 35 mm ve Şekil 4.12 de 40 mm elektrot açıklığında, KB başlangıç gerilimi değerindeki yüzde azalmalar görülmektedir.

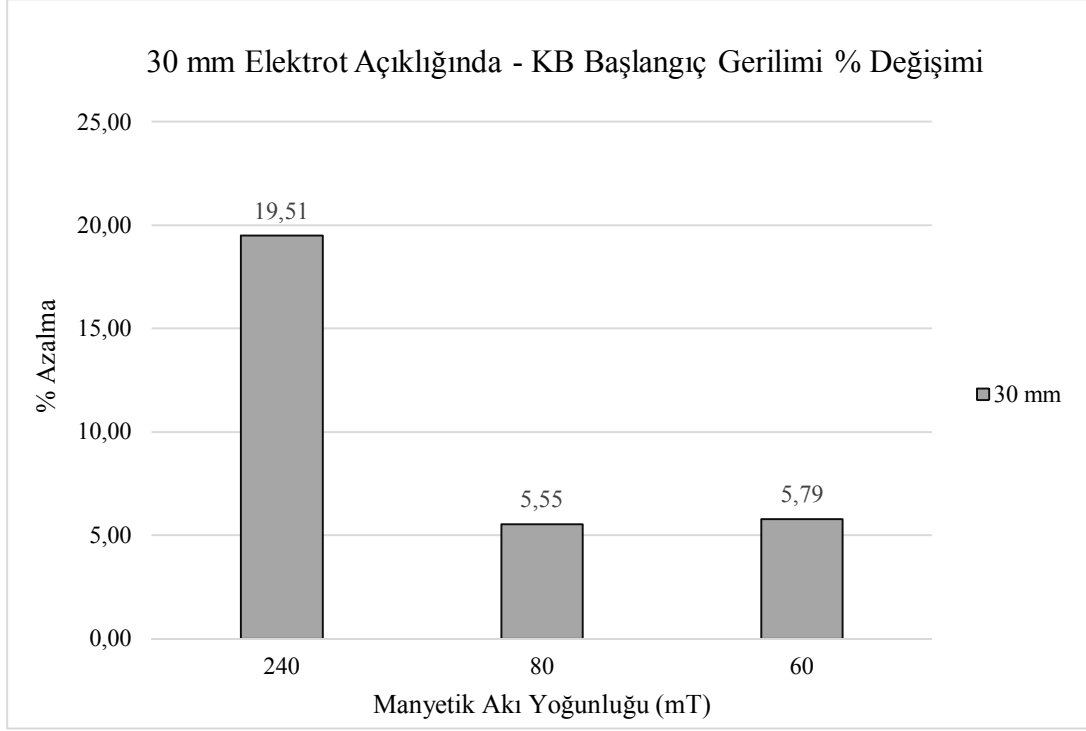


Şekil 4.11 : 35 mm elektrot açıklığında KB başlangıç gerilimi değerinin farklı manyetik akı yoğunluğu değerlerinde azalma yüzdesi.



Şekil 4.12 : 40 mm elektrot açıklığında KB başlangıç gerilimi değerinin farklı manyetik akı yoğunluğu değerlerinde azalma yüzdesi.

KB başlangıç gerilimindeki yüzde azalmalar silindir mıknatısların varlığında incelendikten sonra dikdörtgen mıknatısların kullanıldığı durumlar için de benzer analiz gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.13’de 30 mm elektrot açıklığında, manyetik alan yokken elde edilen KB başlangıç gerilimi değerlerine üç farklı büyüklükte manyetik akı yoğunluğu uygulandığında oluşan yüzde azalmalar görülmektedir.



Şekil 4.13 : 30 mm kap açıklığı için KB başlangıç gerilim değerlerinin farklı elektrot açıklıklarındaki değişimi.

Manyetik alansız durumda elde edilen KB başlangıç gerilimine 240 mT uygulandığında %19,51’lik bir azalma görülmüştür. Dikdörtgen mıknatısların oluşturduğu manyetik akı yoğunlukları 80 mT ve 60 mT değerlerine geldiğinde ise KB başlangıç gerilimine olan etkide azalmalar görülmüştür.

KB başlangıç gerilimi değerlerindeki değişimlere sadece oluşturulan manyetik alan neden olmamaktadır. Elektrotların bulunduğu ortam koşulları, gerilimin artırılma hızı gibi birçok etken de deneylerde elde edilen KB başlangıç gerilimi değerlerini değiştirmektedir. Manyetik alanın diğer etkenlere baskın olduğu durumlar manyetik akı yoğunluğunun en büyük olduğu durumlar olarak grafiklerde belirlenmiştir. Manyetik alanın etkisi bu yüzden yüksek mT değerlerinde daha net görülmüştür.

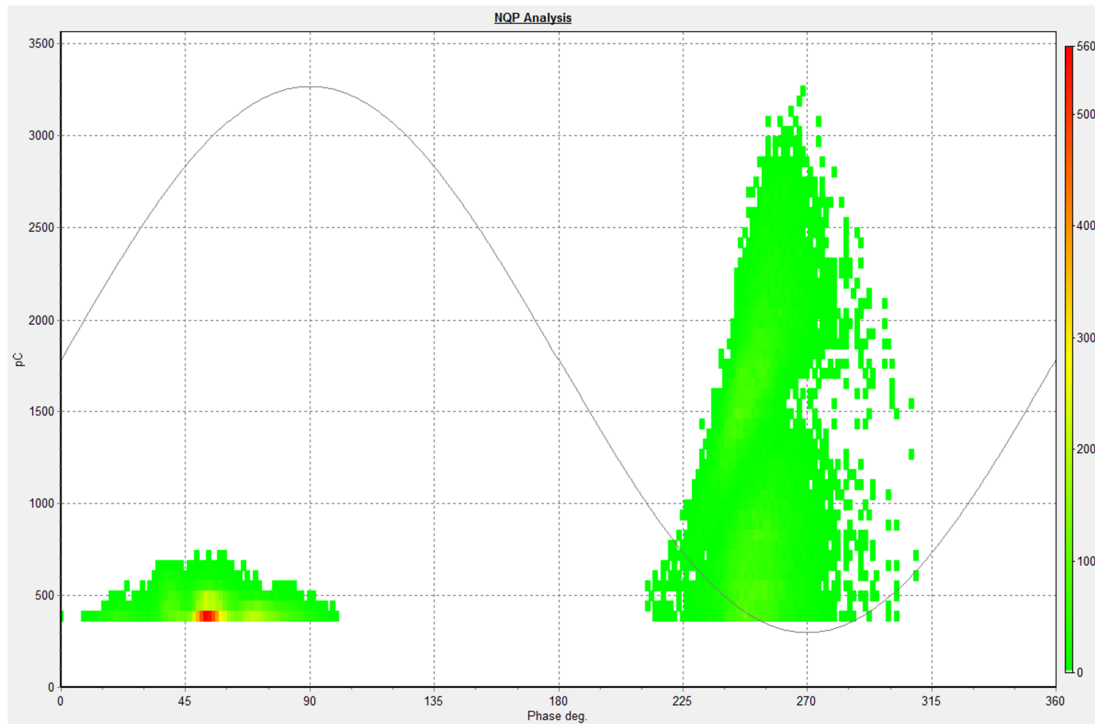
KB başlangıç gerilimi değerlerine manyetik alanın etkisi incelendikten sonra n-q-p analizine geçilmiştir.

4.2 N-q-p Analizi

N-q-p analizi kısmi boşalma sinyallerini detaylı incelemek için kullanılmaktadır. N-q-p analizi kısmi boşalma sinyalinin faz, genlik ve boşalma sayısını bir grafikte verebilmektedir. İki ve üç boyutlu seçeneklerle elde edilebilen bu grafiklere bakılarak gerçekleşen kısmi boşalmaların cinsi ve özellikleri belirlenebilmektedir.

Deneyde kullanılan Haefely DDX-9121 ile farklı açıklık durumları için manyetik alanlı ve alansız durumların n-q-p grafikleri ayrı ayrı 2 boyutlu olarak kaydedilmiştir. Ayrıca yatayda ve düşeyde aynı açıklık değerleri için manyetik alanlı ve alansız durumların n-q-p'leri aynı grafik üzerinde 2 ve 3 boyutlu olarak karşılaştırılmıştır. Grafiklerde kısmi boşalma olayının daha net görülmesi için belirli bir eşik değeri seçilmiştir. Seçilen eşik değerlerinin pC büyüklükleri parantez içerisinde belirtilmiştir.

İlk olarak manyetik alanın olmadığı durumlara ait n-q-p grafikleri elde edilmiştir. Daha sonra sistemde silindir mıknatıslar varlığında veriler elde edilmiştir. Bu iki duruma ait grafikler farklı elektrot ve kap açıklıkları için incelenmiştir. N-q-p analizi kısmında kap açıklığı yerine yatay açıklık, elektrot açıklığı için ise düşey açıklık ifadesi kullanılmıştır.

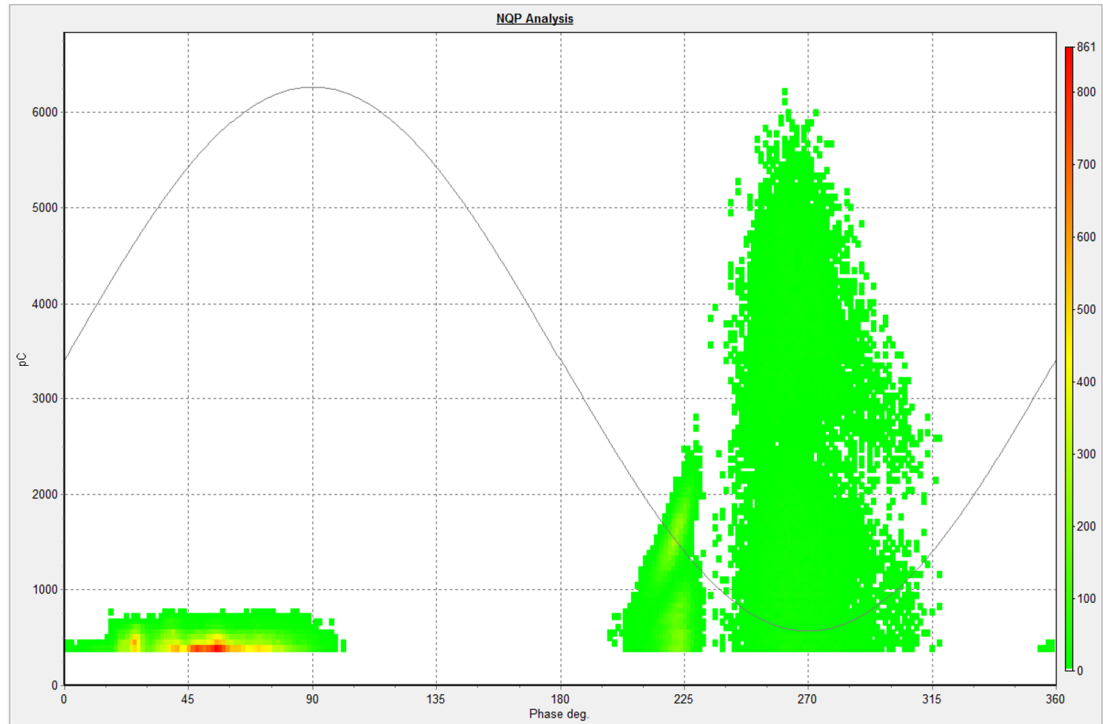


Şekil 4.14 : Manyetik alan yok, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 10 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (385 pC).

Manyetik alanın olmadığı durumda, elektrot açıklığı 30 mm ve kap açıklığı 10 mm iken deney sonucu elde edilen 2 boyutlu n-q-p grafiği Şekil 4.14'te görülmektedir. Bu grafikte x eksenini faz derecelerini göstermektedir. Y eksenini ise kısmi boşalmanın genliğini pC cinsinden belirtmektedir. Son olarak yeşil-kırmızı çizgi ise gerçekleşen boşalma darbelerinin sayısını vermektedir.

Şekil 4.14'teki grafikte negatif yarı dalgada yaklaşık 215° - 285° faz aralığında bir yığılma görülmektedir. Kısmi boşalma sinyalleri en çok bu faz aralığında etkilidir ve pC değerleri büyüktür. Aynı zamanda pozitif yarı dalgada da yaklaşık 30° - 100° faz aralığında 700 pC civarında bir yığılma görülmektedir. Seçilen yatay ve düşey açıklıklar için bu grafikte görülen en büyük pC değeri yaklaşık 3300 pC dur.

Manyetik alansız durumda n-q-p deneyi yapılarak n-q-p grafiği elde edildikten sonra aynı yatay ve düşey açıklık değerlerinde bu sefer silindir mıknatıslarla oluşturulan manyetik alan varlığında n-q-p deneyi gerçekleştirilmiştir. Manyetik alan varlığında, düşey açıklık 30 mm ve yatay açıklık 10 mm iken gerçekleştirilen n-q-p deneyine ait grafik Şekil 4.15'te görülmektedir.

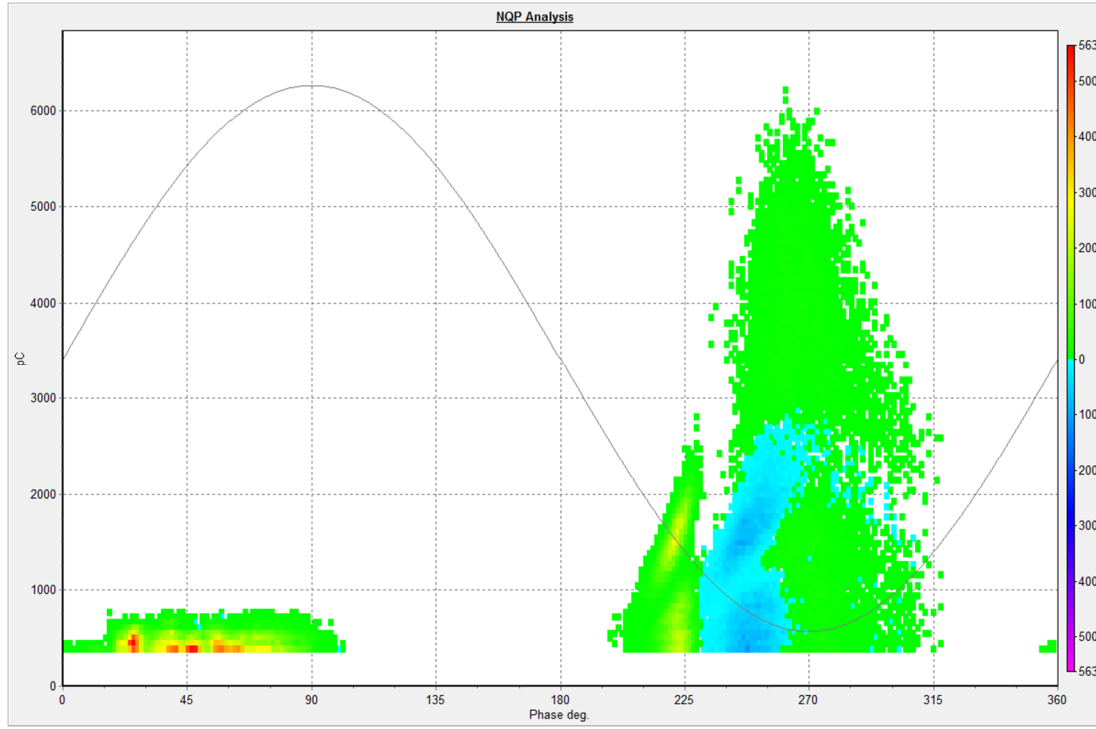


Şekil 4.15 : Manyetik alan var, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 10 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (385 pC).

Şekil 4.15 incelendiğinde Şekil 4.14 ile n-q-p dağılımlarında farklar görülmektedir. Öncelikle manyetik alan varlığının faz açılarında oldukça büyük bir genişlemeye

neden olduğu belirlenmiştir. Manyetik alan yokken yaklaşık 215° - 285° civarında olan yığılma, manyetik alan varlığında yaklaşık 205° - 300° ye genişlemiştir. Ayrıca boşalma genliklerine bakıldığında manyetik alanın olmadığı durumda en büyük pC değeri negatif yarı dalgada yaklaşık 3300 pC iken, manyetik alan etkisiyle bu değer 6000 pC civarına yükselmiştir. Benzer etkiler pozitif yarı dalgada da görülmektedir. Pozitif yarı dalgada da bir önceki duruma göre yığılma olan faz açıları genişlemiştir ve pC değerlerinde artmalar gözlenmiştir.

Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te aynı açıklıklardaki manyetik alanlı ve alansız durumlara ait n-q-p grafikleri KB ölçüm cihazının yazılımında bulunan seçeneklerden aynı grafik üzerinde 2 boyutlu grafikte gösterilmiştir (Şekil 4.16).

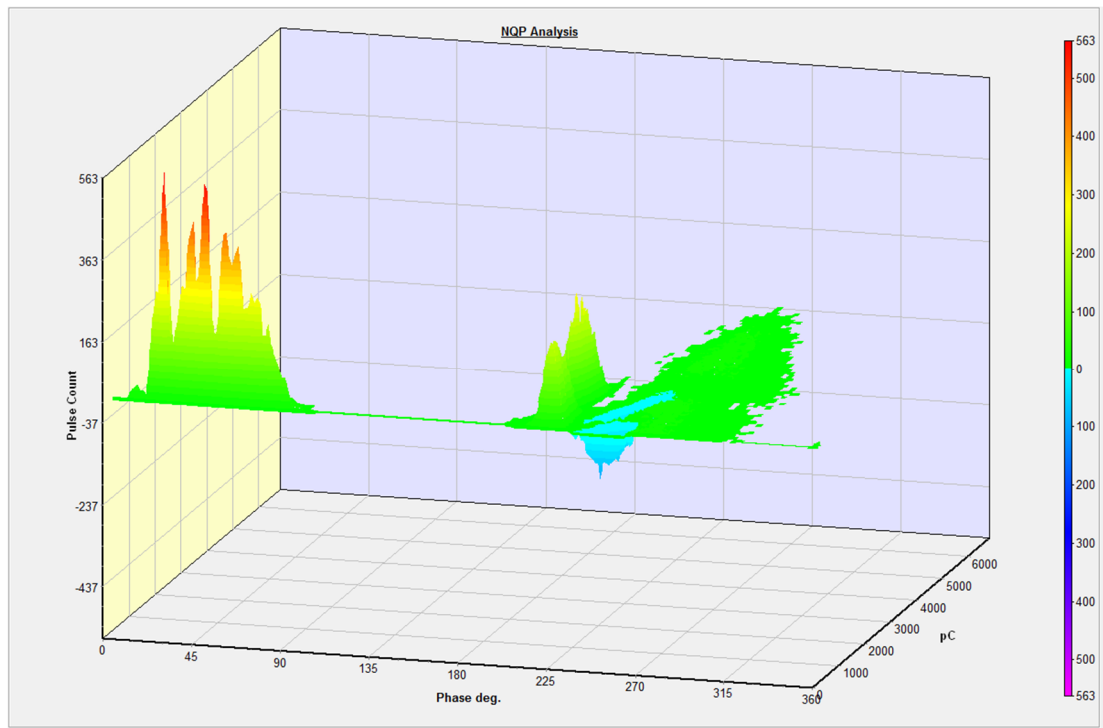


Şekil 4.16 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 10 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (385 pC).

Manyetik alanın olduğu durum ile olmadığı durum n-q-p'leri aynı grafikte incelendiğinde manyetik alanın etkisi daha açık bir şekilde görülmektedir. Burada manyetik alanlı durum n-q-p'si yeşil-kırmızı, manyetik alansız durum n-q-p'si ise mavi-mor renk aralığında görülmektedir. Şekil 4.16'da manyetik alan varlığının negatif yarı dalgada yığılmaları 180° ve 315° faz açılarına doğru kaydırması ve genişlettiği, manyetik alanın boşalma genliğini önemli ölçüde arttırdığı belirlenmiştir. Manyetik alanın pozitif yarı dalgada da fazda kaymaya ve

genişlemeye neden olduğu aynı zamanda boşalma genliğini arttırdığı aynı grafik üzerinde daha net görülmektedir.

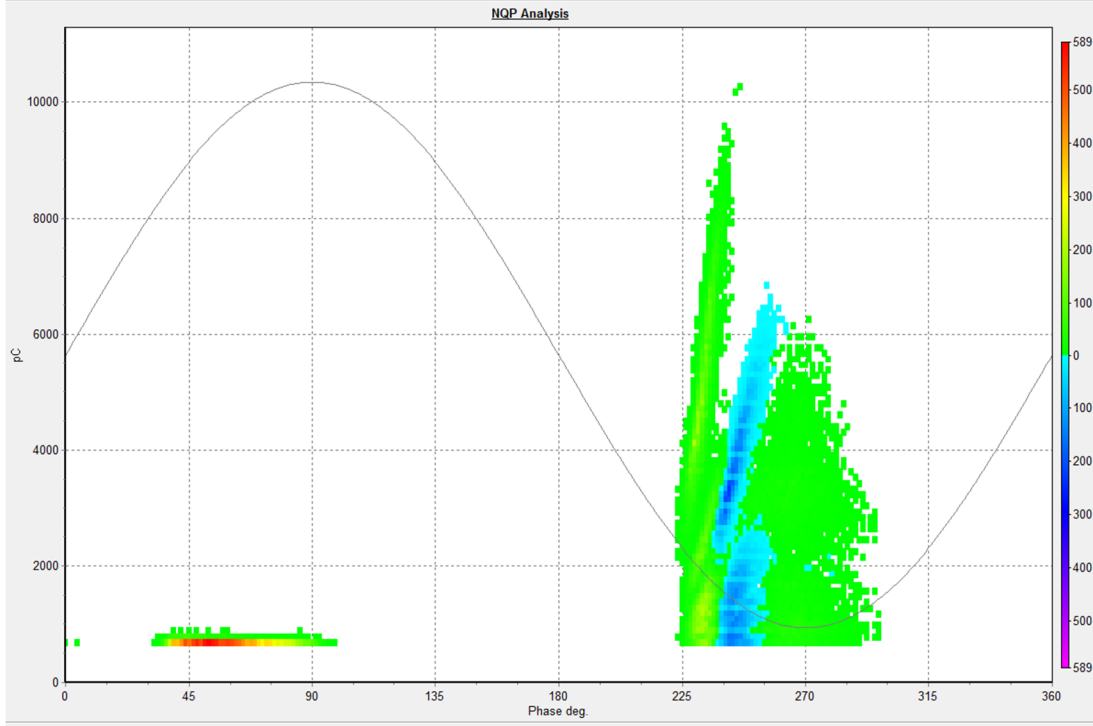
2 boyutlu n-q-p grafiğine ek olarak KB ölçüm cihazının özelliğinden 3 boyutlu n-q-p grafiği de elde edilebilmektedir. 3 boyutlu n-q-p ile manyetik alandaki kısmi boşalma darbe sayısındaki farklar görülmektedir. Özellikle manyetik alanın etkin olduğu durumda pozitif yarı dalgadaki boşalma darbe sayısı manyetik alanın olmadığı duruma kıyasla oldukça fazladır. Kısmi boşalmanın genliği ise 3 boyutlu şeklinde de görüldüğü gibi manyetik alan etkisinde daha büyüktür. Faz açılarındaki genişleme ise yine elde edilen 3 boyutlu grafikte görülmektedir (Şekil 4.17).



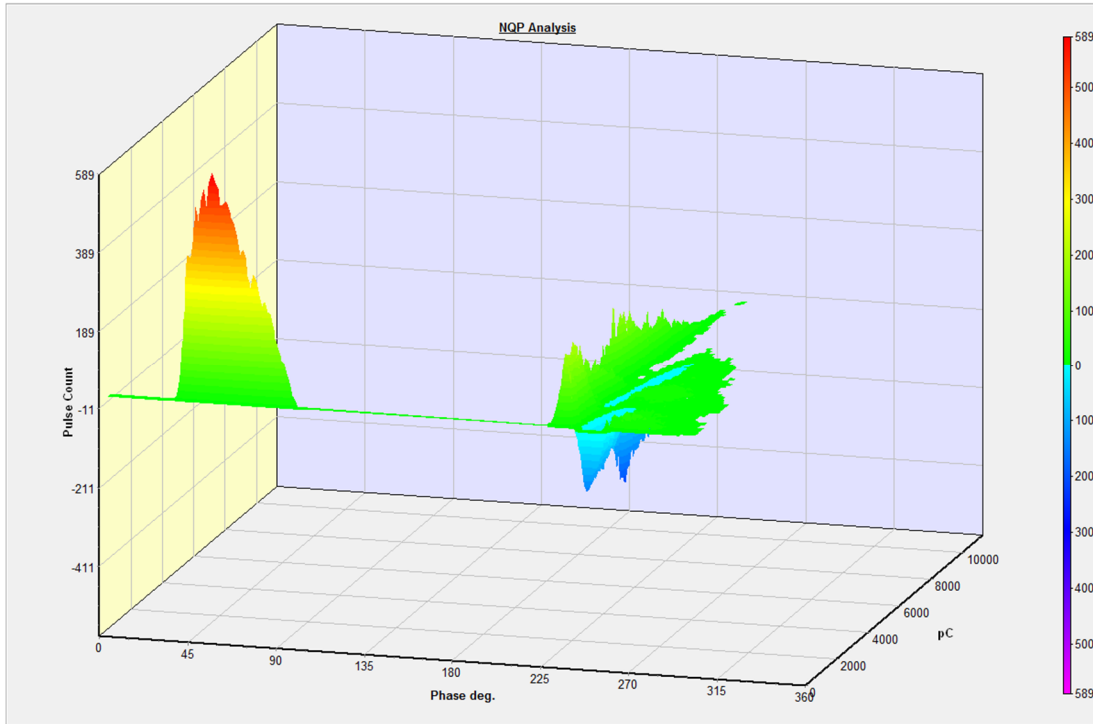
Şekil 4.17 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 10 mm durumu için 3 boyutlu n-q-p grafiği (385 pC).

İlk n-q-p deneyleri gerçekleştirildikten sonra 30 mm elektrot açıklığı sabit tutularak kap açıklığı 15 mm, 20 mm, 25 mm ve 30 mm değerlerine sırasıyla getirilmiştir. Önce manyetik alansız durumda n-q-p deneyleri gerçekleştirilmiştir ve veriler kaydedilmiştir. Daha sonra aynı açıklıklarda bu sefer silindir mıknatıslar varlığında n-q-p deneyleri gerçekleştirilmiştir ve verileri kaydedilmiştir. Benzer durumlar 35 mm ve 40 mm elektrot açıklıkları için de gerçekleştirilmiştir. Toplamda on beş 2 boyutlu ve on beş 3 boyutlu n-q-p deney verisi manyetik alanlı ve alansız durumlar için aynı grafik üzerinde elde edilmiştir. Elde edilen n-q-p verileri grafiklerle verilmiştir.

Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da silindir mıknatıslarla oluşturulan manyetik alanın etkisi 30 mm elektrot açıklığı ve 15 mm kap açıklığı için görülmektedir.

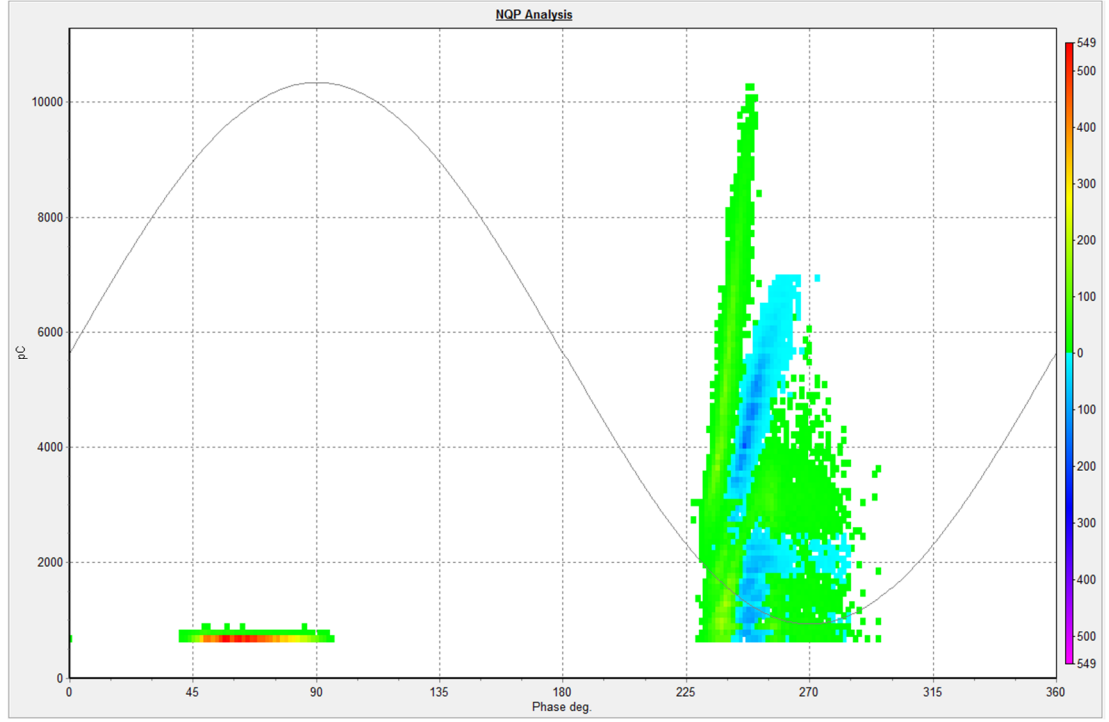


Şekil 4.18 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 15 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (684 pC).

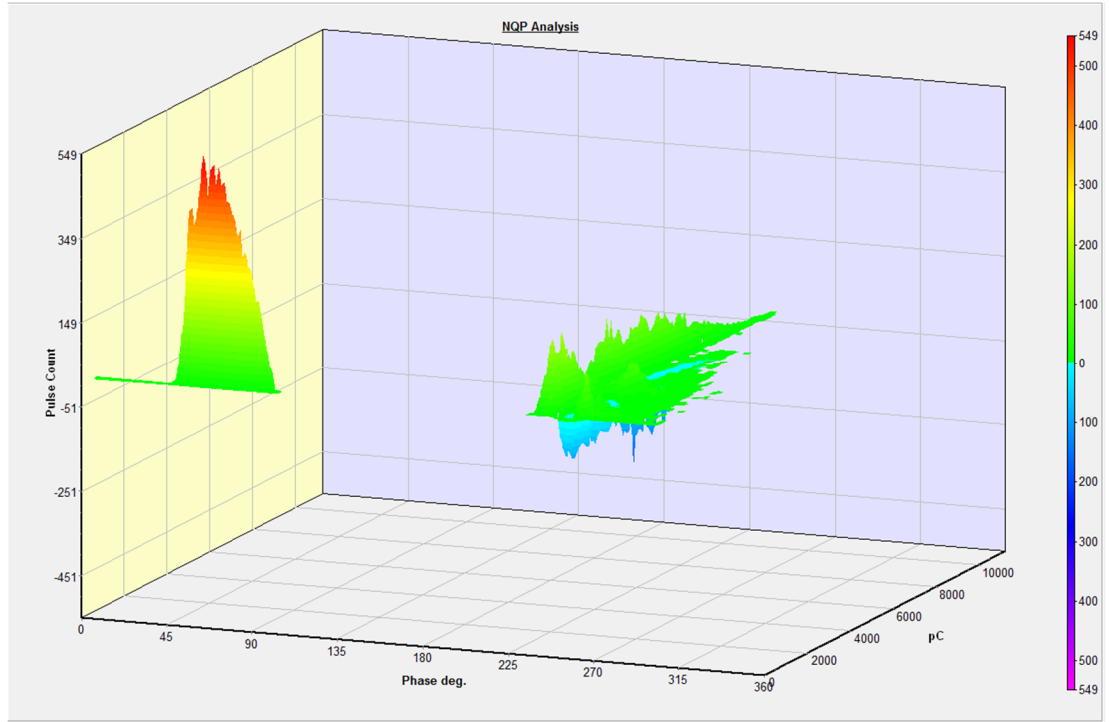


Şekil 4.19 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 15 mm durumu için 3 boyutlu n-q-p grafiği (684 pC).

Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de silindir mıknatıslarla oluşturulan manyetik alanın etkisi 30 mm elektrot açıklığı ve 20 mm kap açıklığı için görülmektedir.

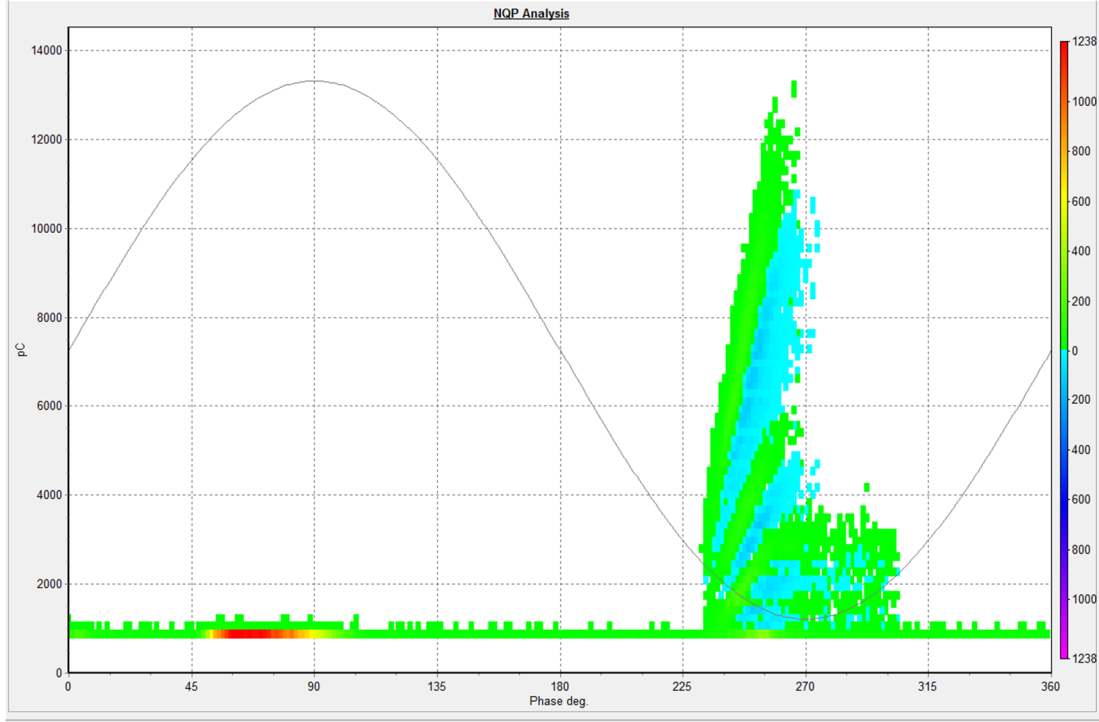


Şekil 4.20 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 20 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (684 pC).

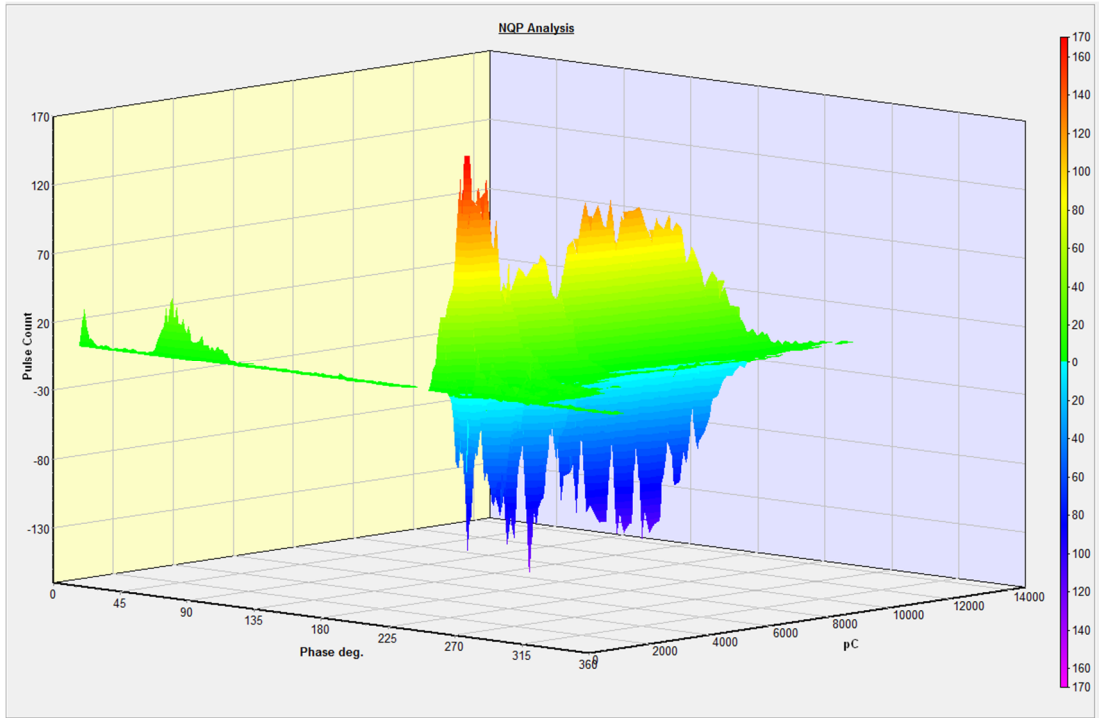


Şekil 4.21 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 20 mm için 3 boyutlu n-q-p grafiği (684 pC).

Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te silindirik mıknatıslarla oluşturulan manyetik alanın etkisi 30 mm elektrot açıklığı ve 25 mm kap açıklığı için görülmektedir.

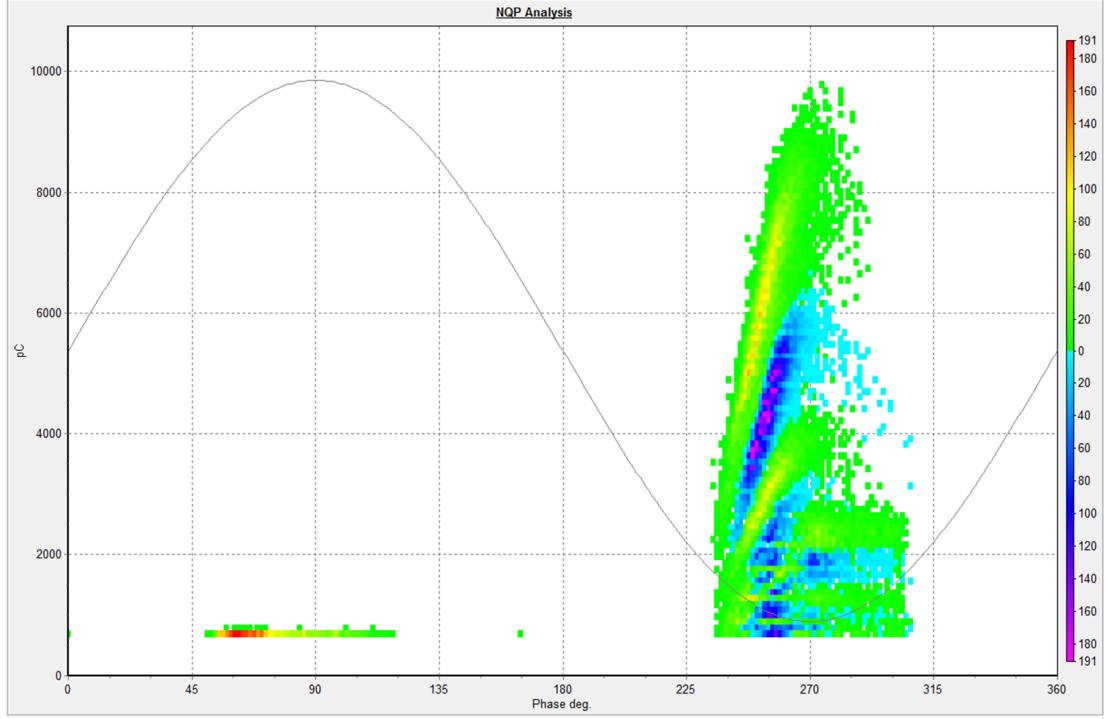


Şekil 4.22 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 25 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (689 pC).

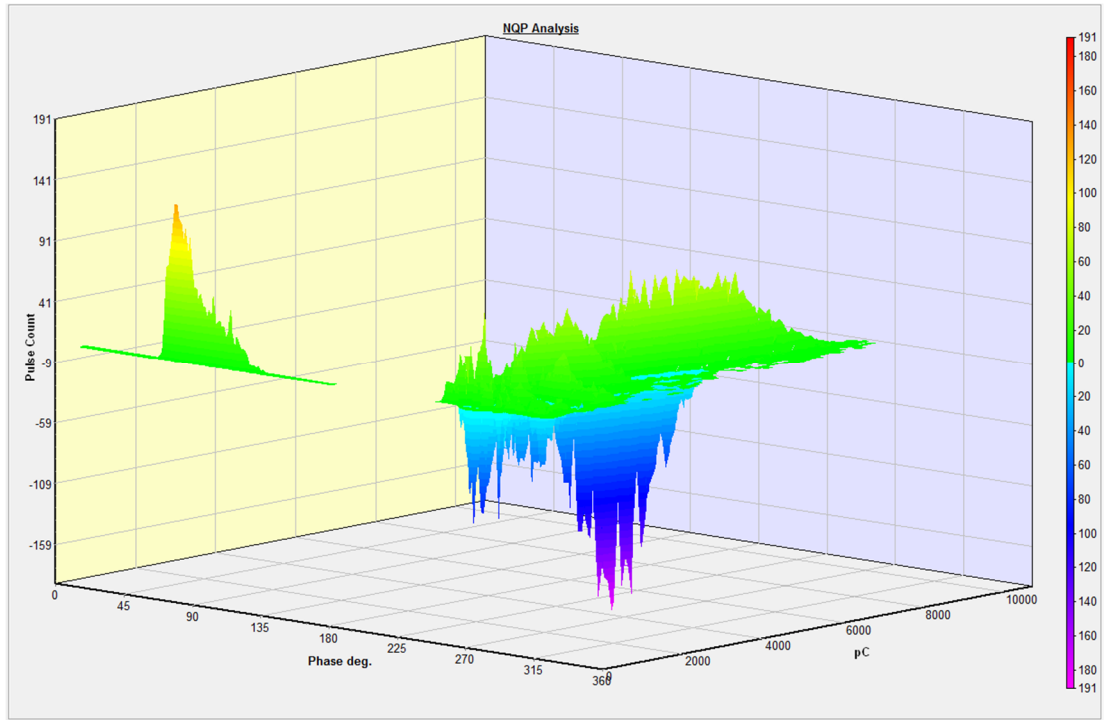


Şekil 4.23 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 25 mm durumu için 3 boyutlu n-q-p grafiği (1040 pC).

Şekil 4.24 ve Şekil 4.25’de silindir mıknatıslarla oluşturulan manyetik alanın etkisi 30 mm elektrot açıklığı ve 30 mm kap açıklığı için görülmektedir.

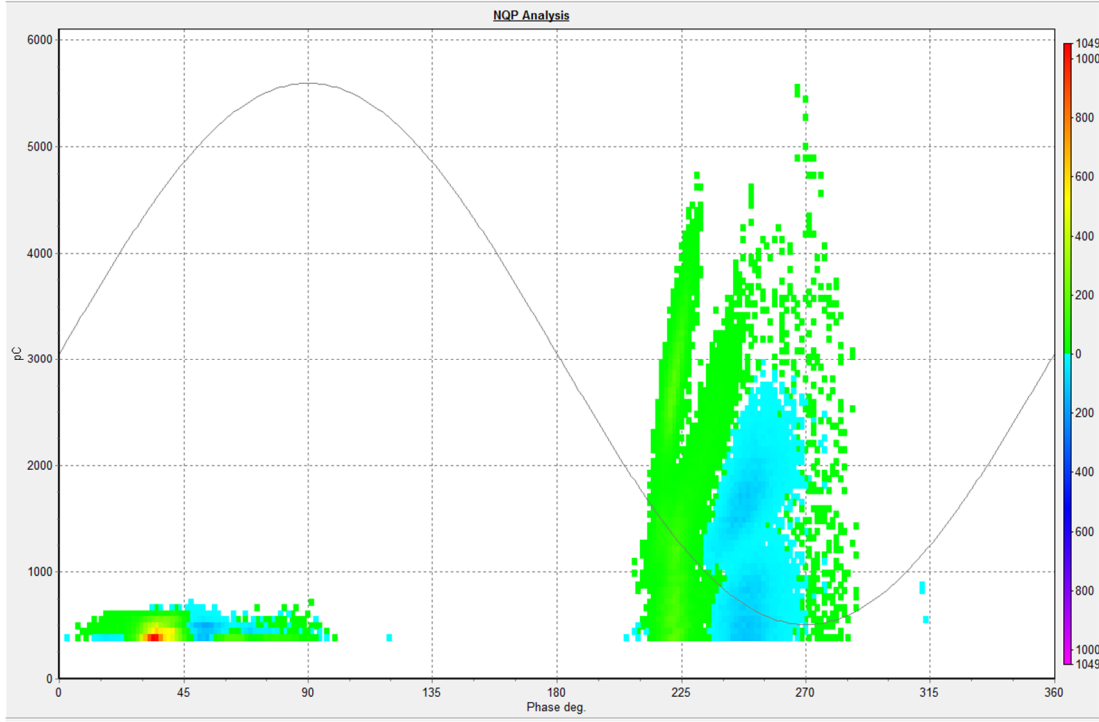


Şekil 4.24 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 30 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (684 pC).

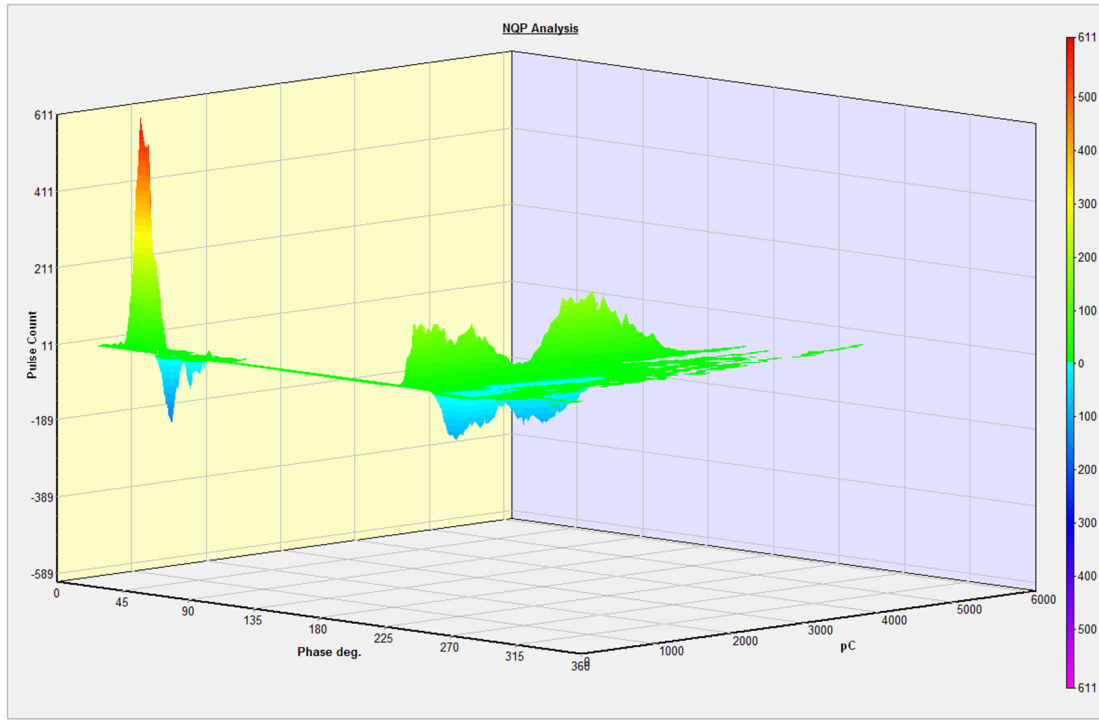


Şekil 4.25 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 30 mm durumu için 3 boyutlu n-q-p grafiği (684 pC).

Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de silindir mıknatıslarla oluşturulan manyetik alanın etkisi 35 mm elektrot açıklığı ve 10 mm kap açıklığı için görülmektedir.

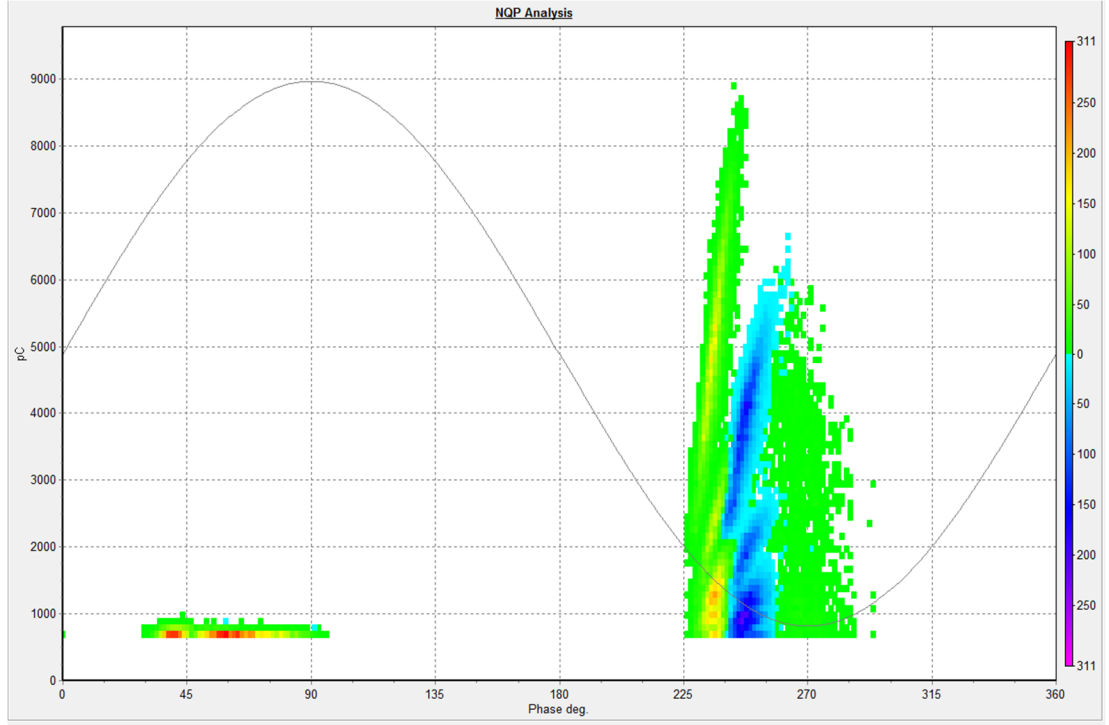


Şekil 4.26 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 35 mm, yatay açıklık 10 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (385 pC).

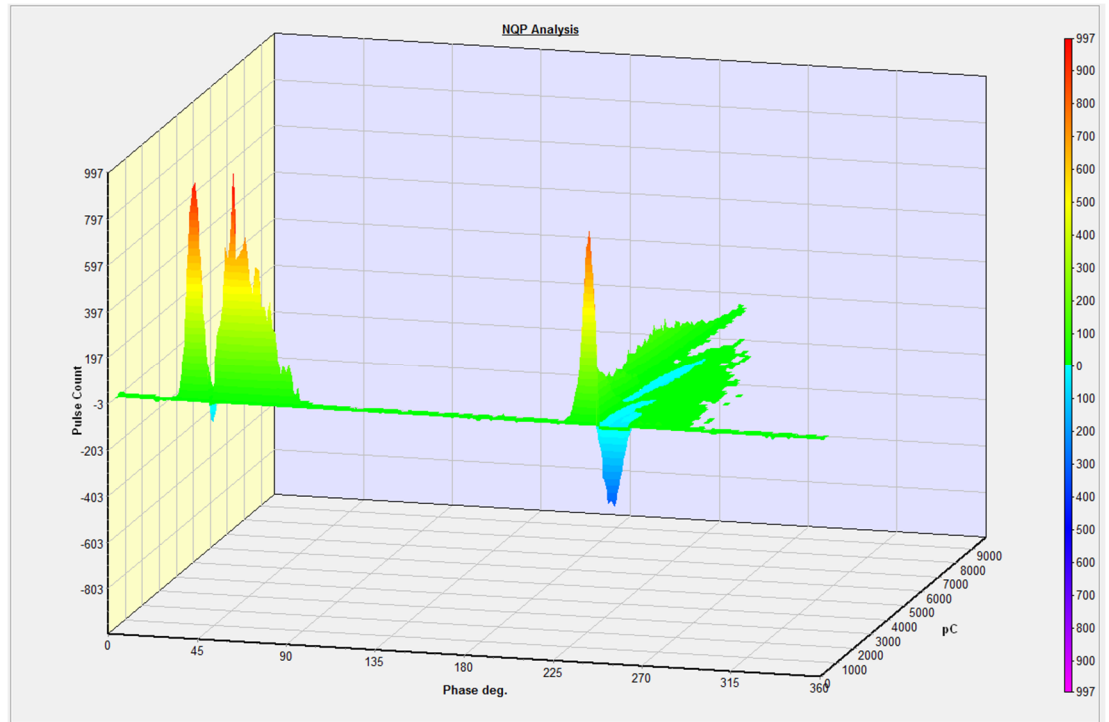


Şekil 4.27 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 35 mm, yatay açıklık 10 mm durumu için 3 boyutlu n-q-p grafiği (440 pC).

Şekil 4.28 ve Şekil 4.29’da silindir mıknatıslarla oluşturulan manyetik alanın etkisi 35 mm elektrot açıklığı ve 15 mm kap açıklığı için görülmektedir.

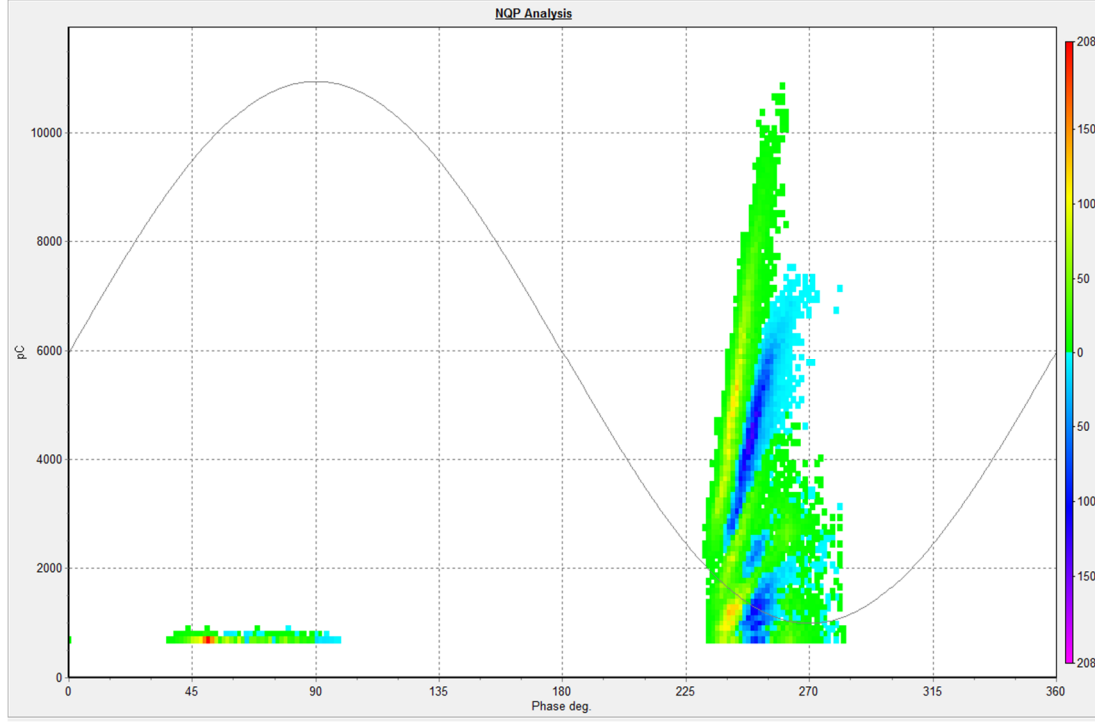


Şekil 4.28 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 35 mm, yatay açıklık 15 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (684 pC).

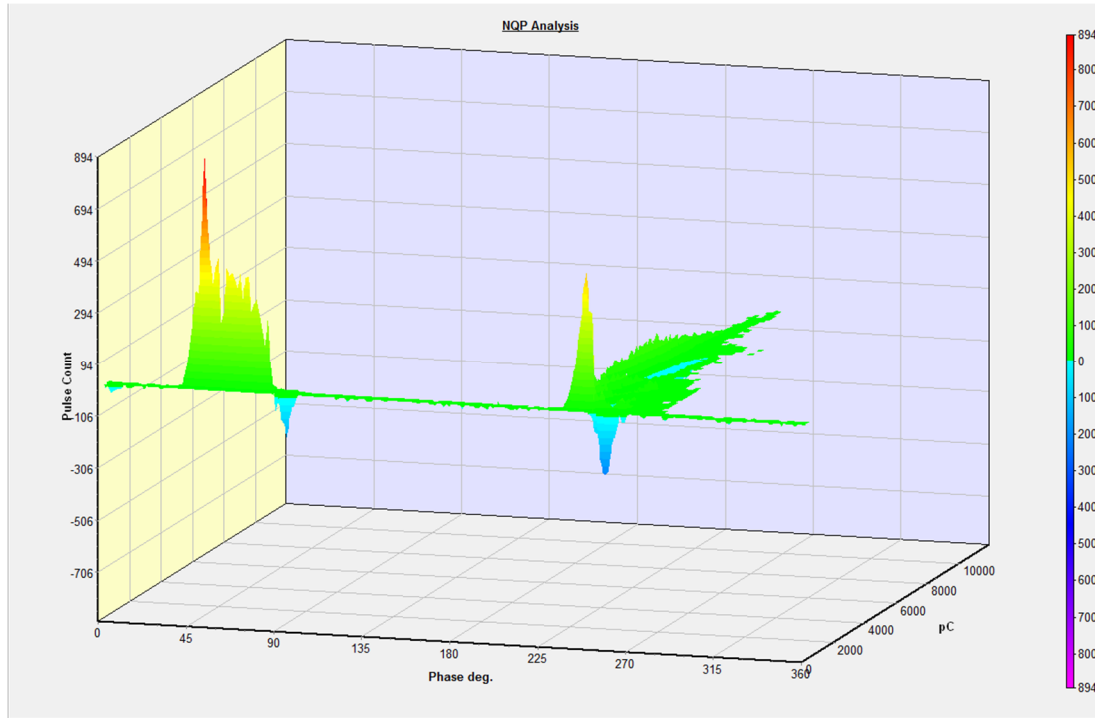


Şekil 4.29 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 35 mm, yatay açıklık 15 mm durumu için 3 boyutlu n-q-p grafiği (489 pC).

Şekil 4.30 ve Şekil 4.31’de silindir mıknatıslarla oluşturulan manyetik alanın etkisi 35 mm elektrot açıklığı ve 20 mm kap açıklığı için görülmektedir.

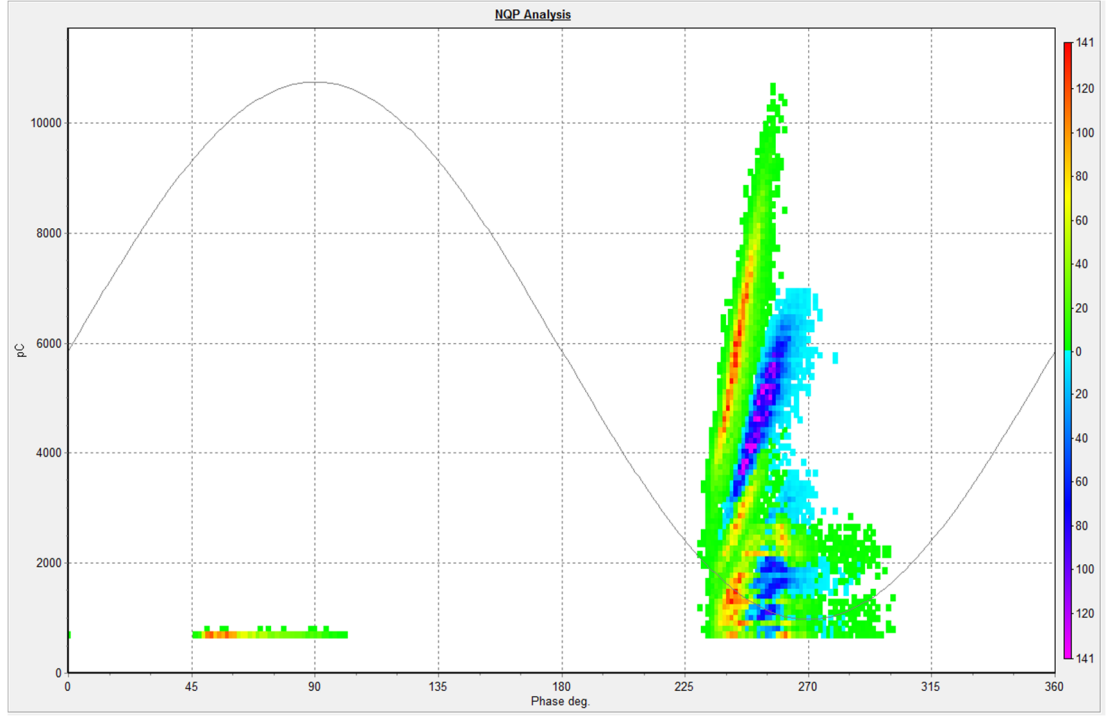


Şekil 4.30 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 35 mm, yatay açıklık 20 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (684 pC).

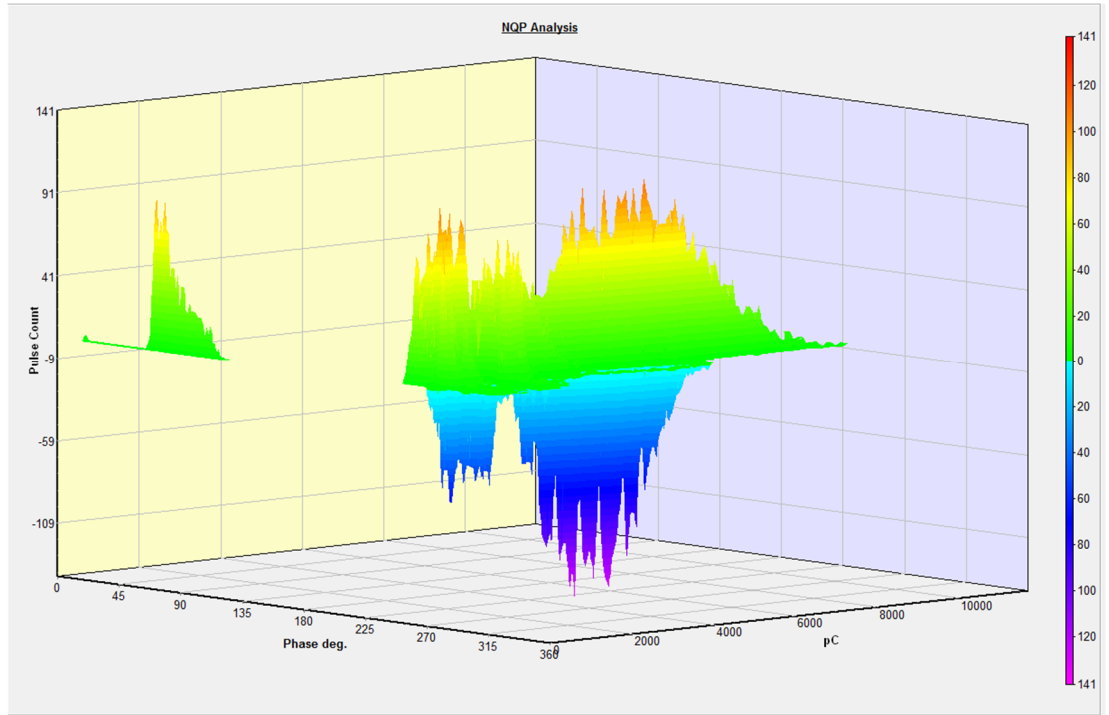


Şekil 4.31 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 35 mm, yatay açıklık 20 mm durumu için 3 boyutlu n-q-p grafiği (489 pC).

Şekil 4.32 ve Şekil 4.33’de silindir mıknatıslarla oluşturulan manyetik alanın etkisi 35 mm elektrot açıklığı ve 25 mm kap açıklığı için görülmektedir.

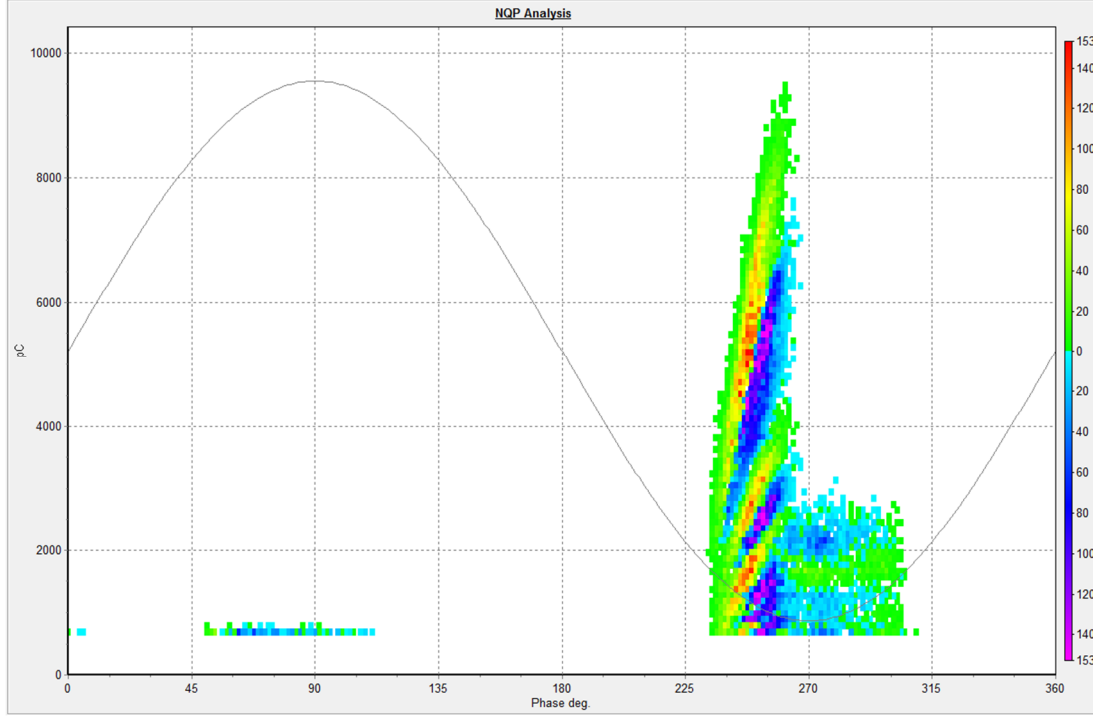


Şekil 4.32 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 35 mm, yatay açıklık 25 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (684 pC).

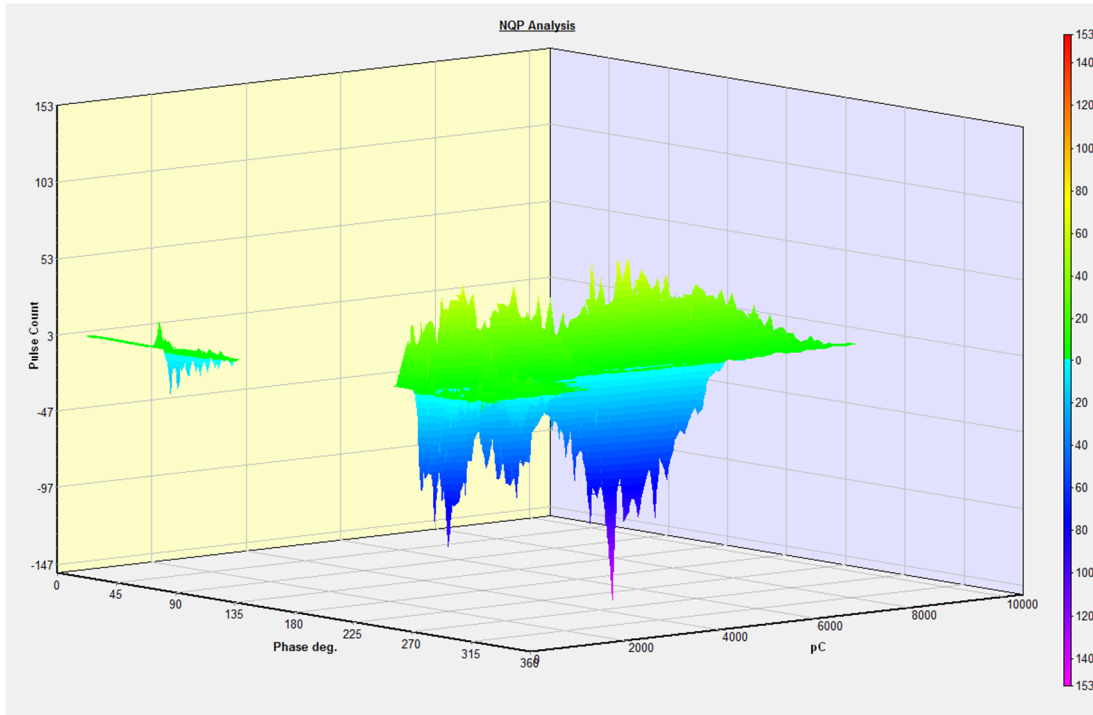


Şekil 4.33 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 35 mm, yatay açıklık 25 mm durumu için 3 boyutlu n-q-p grafiği (684 pC).

Şekil 4.34 ve Şekil 4.35’de silindir mıknatıslarla oluşturulan manyetik alanın etkisi 35 mm elektrot açıklığı ve 30 mm kap açıklığı için görülmektedir.

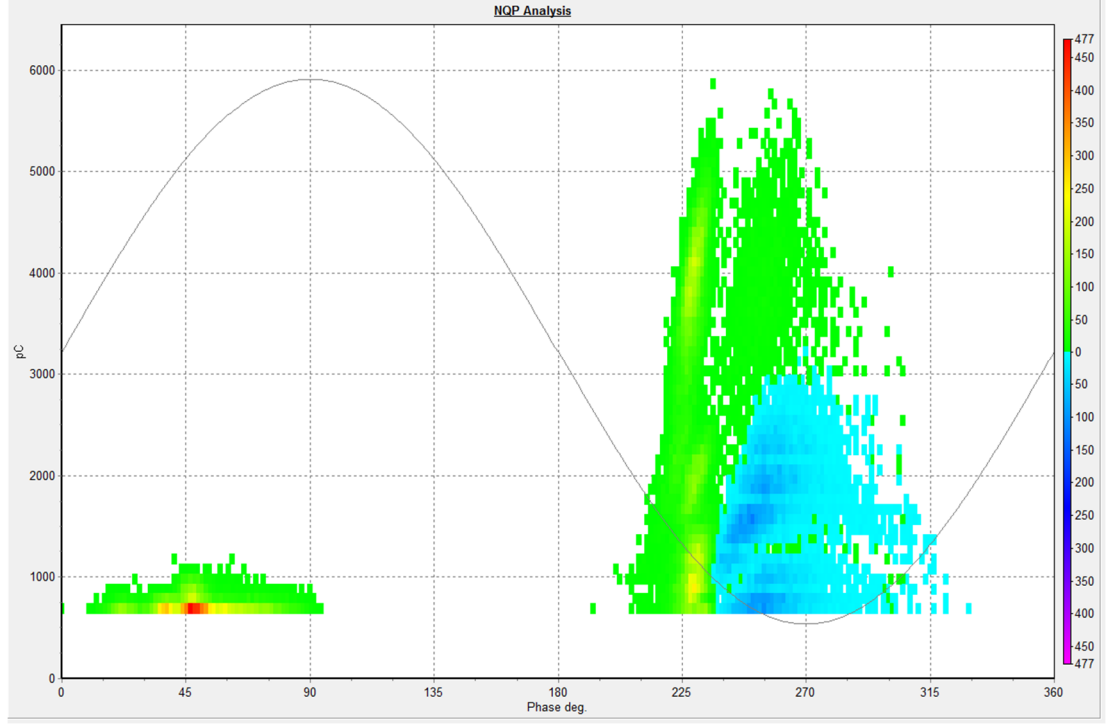


Şekil 4.34 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 35 mm, yatay açıklık 30 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (684 pC).

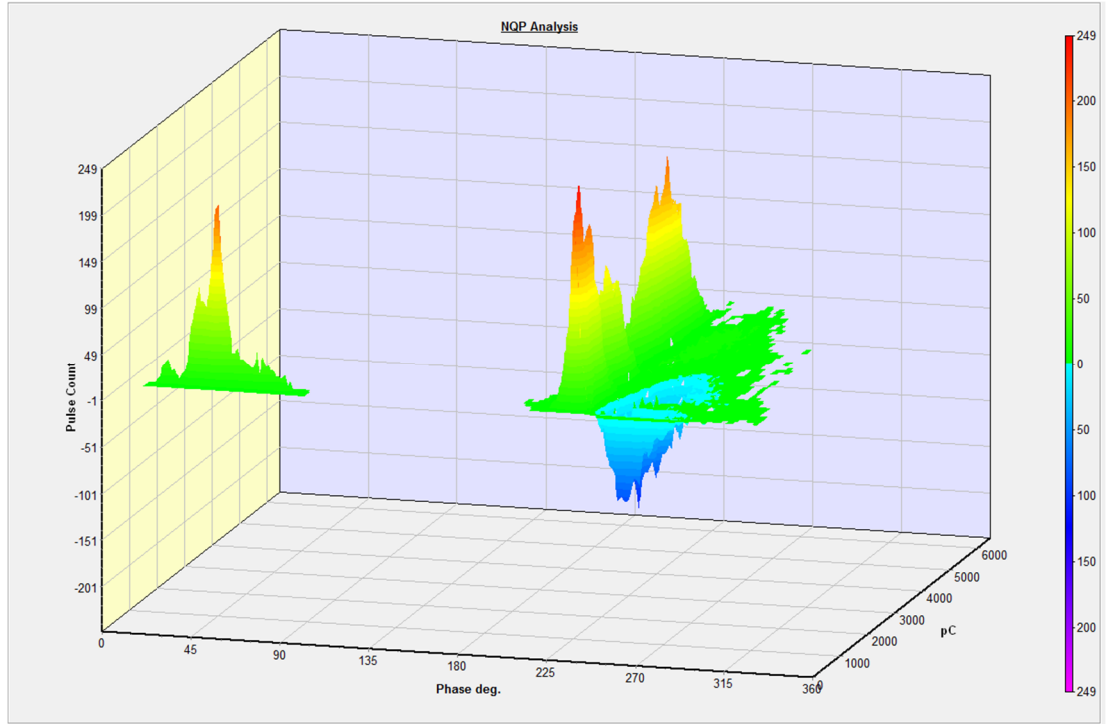


Şekil 4.35 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 35 mm, yatay açıklık 30 mm durumu için 3 boyutlu n-q-p grafiği (684 pC).

Şekil 4.36 ve Şekil 4.37’de silindir mıknatıslarla oluşturulan manyetik alanın etkisi 40 mm elektrot açıklığı ve 10 mm kap açıklığı için görülmektedir.

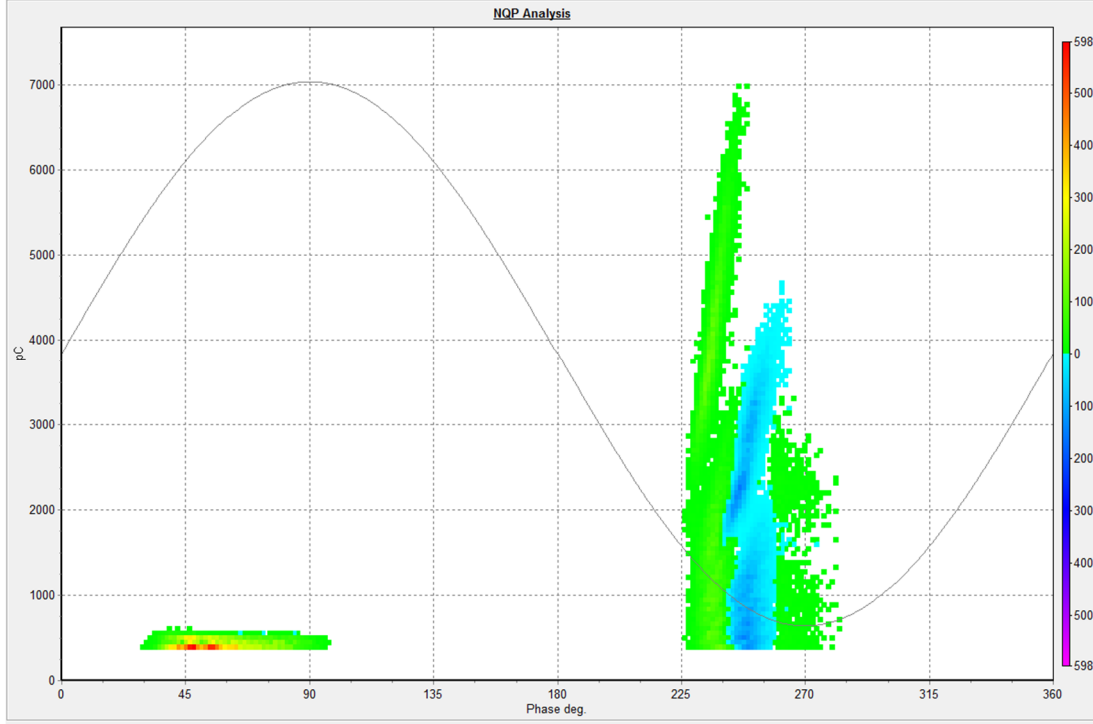


Şekil 4.36 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 40 mm, yatay açıklık 10 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (684 pC).

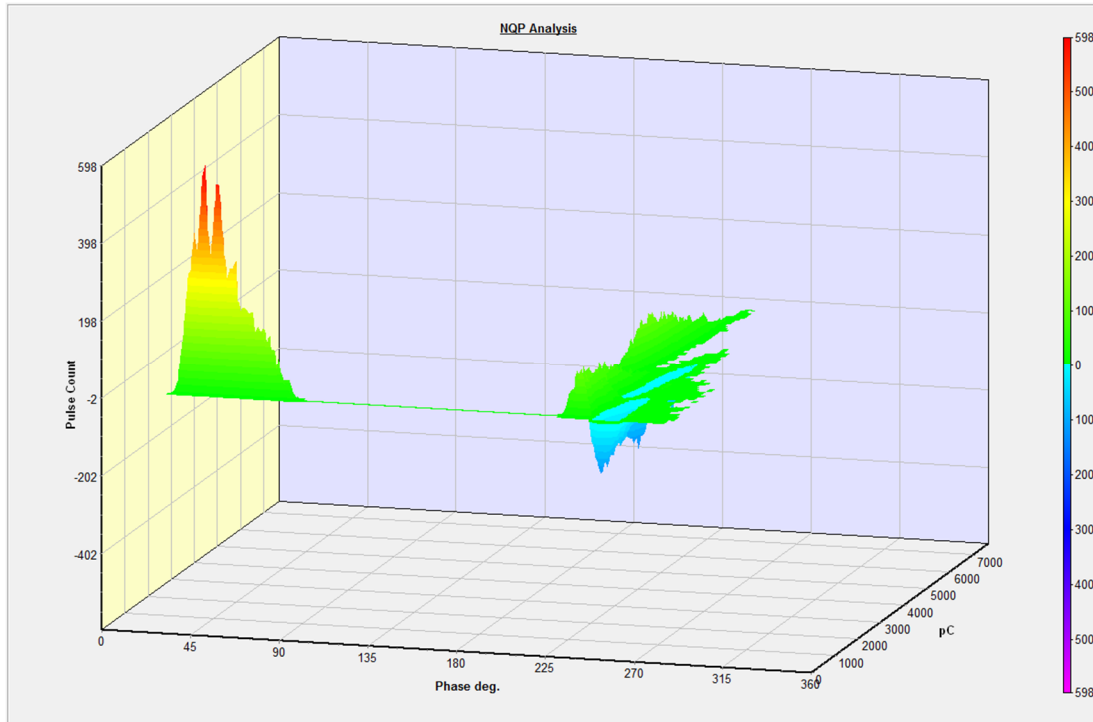


Şekil 4.37 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 40 mm, yatay açıklık 10 mm durumu için 3 boyutlu n-q-p grafiği (782 pC).

Şekil 4.38 ve Şekil 4.39’da silindir mıknatıslarla oluşturulan manyetik alanın etkisi 40 mm elektrot açıklığı ve 15 mm kap açıklığı için görülmektedir.

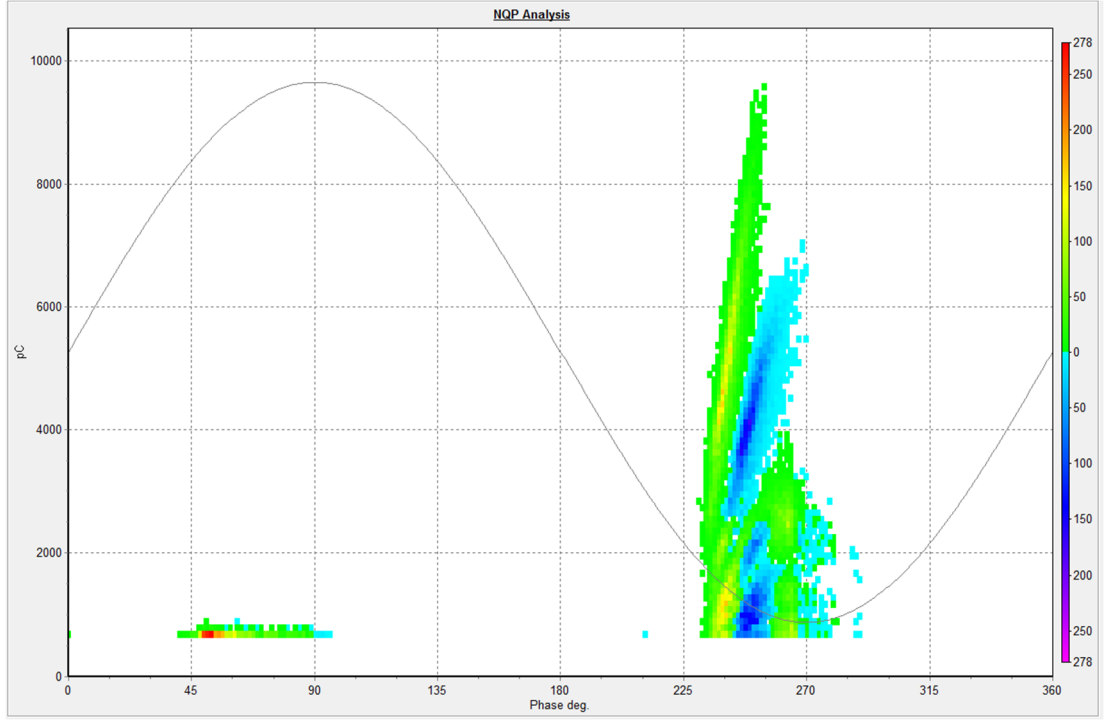


Şekil 4.38 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 40 mm, yatay açıklık 15 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (385 pC).

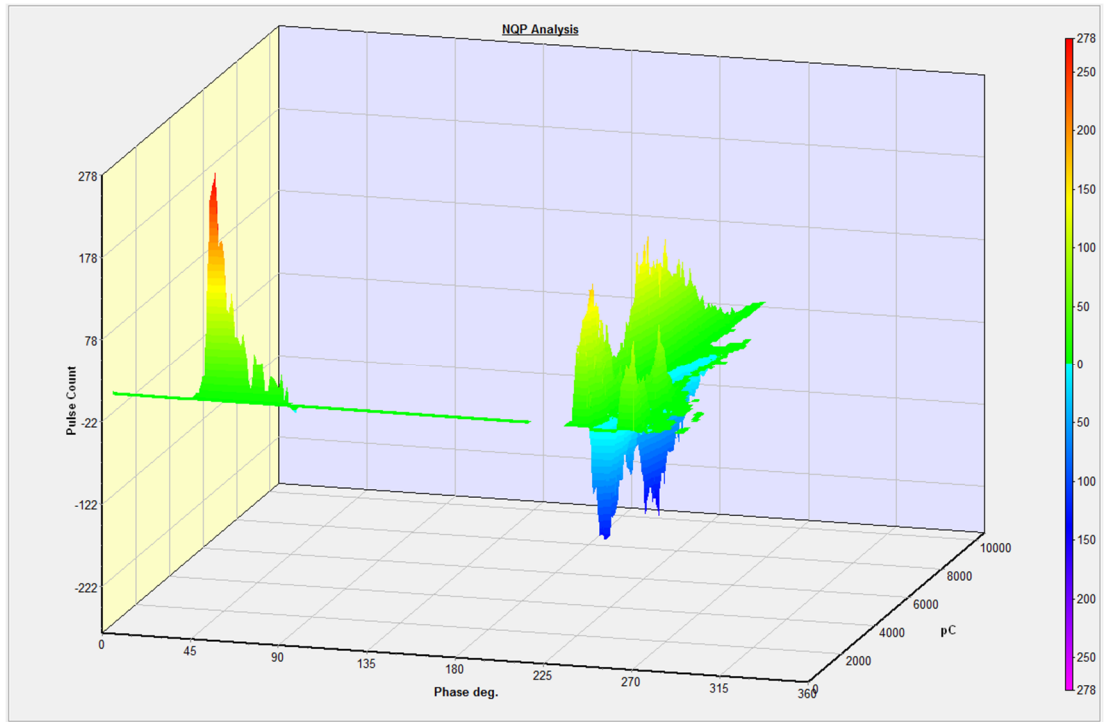


Şekil 4.39 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 40 mm, yatay açıklık 15 mm durumu için 3 boyutlu n-q-p grafiği (385 pC).

Şekil 4.40 ve Şekil 4.41’de silindir mıknatıslarla oluşturulan manyetik alanın etkisi 40 mm elektrot açıklığı ve 20 mm kap açıklığı için görülmektedir.

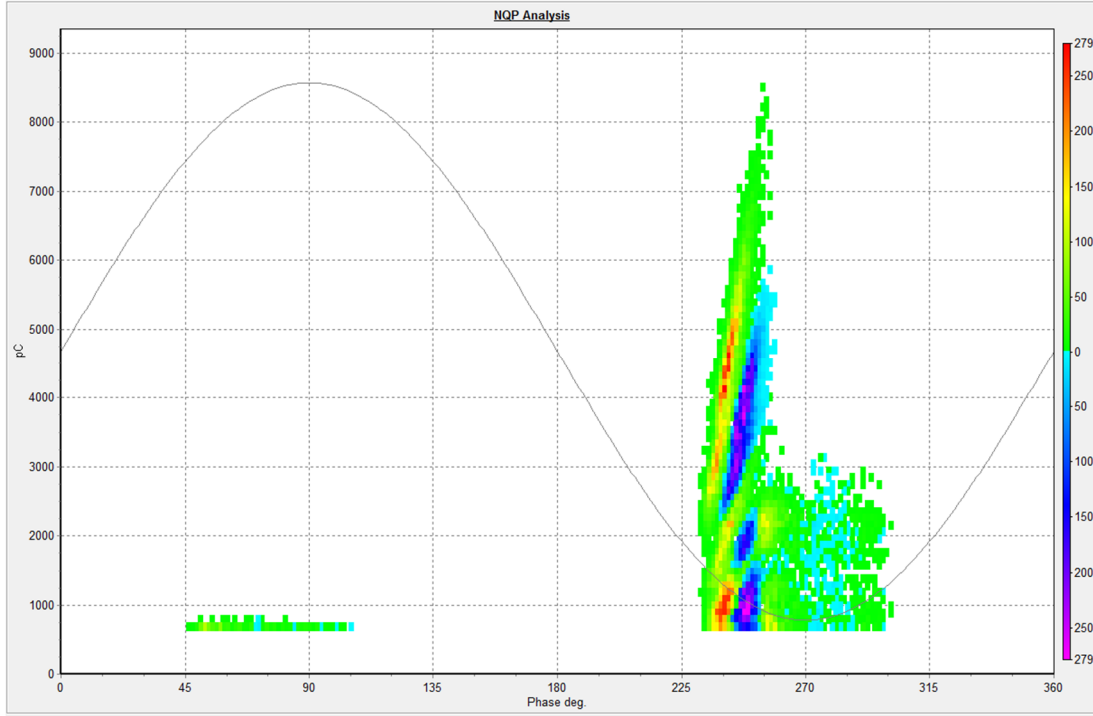


Şekil 4.40 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 40 mm, yatay açıklık 20 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (684 pC).

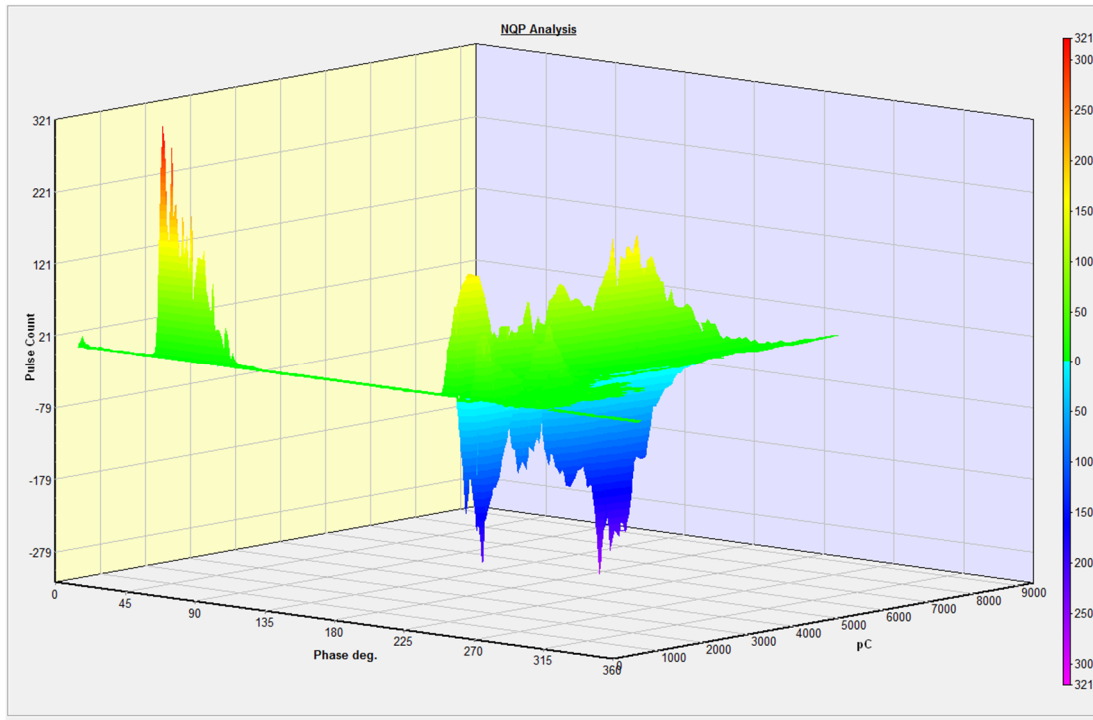


Şekil 4.41 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 40 mm, yatay açıklık 20 mm durumu için 3 boyutlu n-q-p grafiği (684 pC).

Şekil 4.42 ve Şekil 4.43’de silindir mıknatıslarla oluşturulan manyetik alanın etkisi 40 mm elektrot açıklığı ve 25 mm kap açıklığı için görülmektedir.

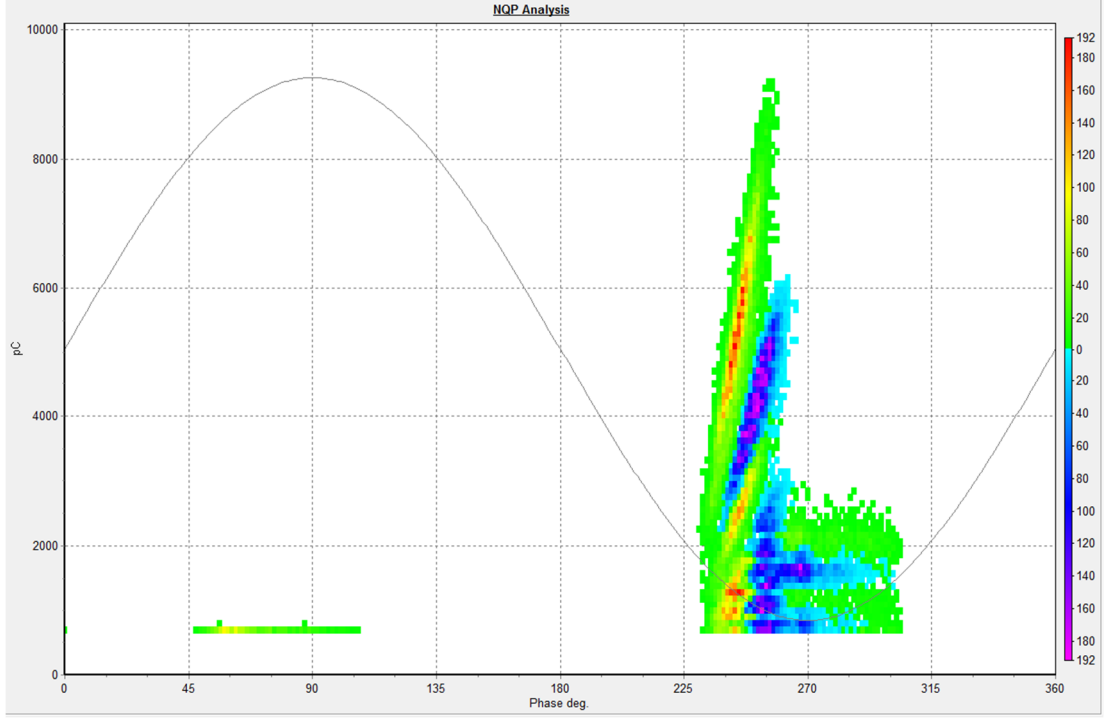


Şekil 4.42 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 40 mm, yatay açıklık 25 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (684 pC).

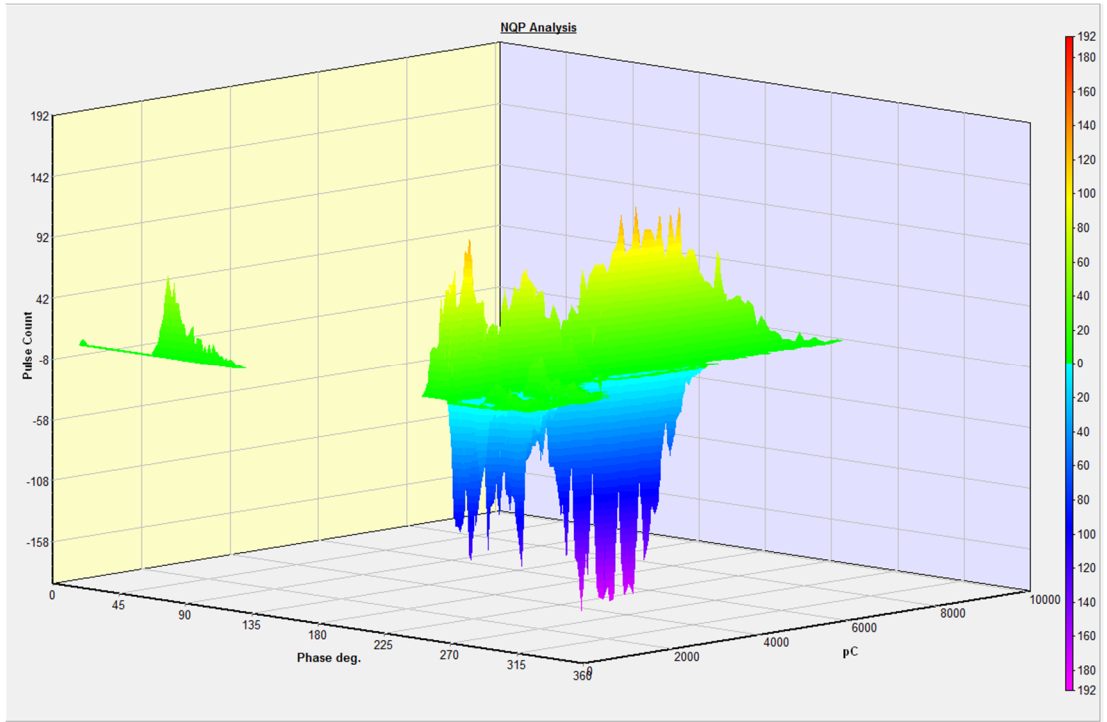


Şekil 4.43 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 40 mm, yatay açıklık 25 mm durumu için 3 boyutlu n-q-p grafiği (586 pC).

Şekil 4.44 ve Şekil 4.45’de silindir mıknatıslarla oluşturulan manyetik alanın etkisi 40 mm elektrot açıklığı ve 30 mm kap açıklığı için görülmektedir.



Şekil 4.44 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 40 mm, yatay açıklık 30 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (684 pC).



Şekil 4.45 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 40 mm, yatay açıklık 30 mm durumu için 3 boyutlu n-q-p grafiği (684 pC).

Silindir mıknatıslarla oluşturulan manyetik alanların, aynı açıklıklarda manyetik alansız durumlardaki n-q-p verilerine etkileri on beş grafikte verilmiştir. Bu grafiklerin hepsi incelendiğinde silindir mıknatıslar arası açıklığın en küçük olduğu durumlarda manyetik akı yoğunluğu en büyük olduğu için n-q-p verilerine en büyük etkiler 10 mm kap açıklıklarında görülmüştür. Kap açıklığı yani silindirler arası mesafenin en büyük olduğu 30 mm durumlarında manyetik akı yoğunluğu en küçük olduğu için manyetik alansız durumdaki n-q-p verilerine etkiler en az olmuştur.

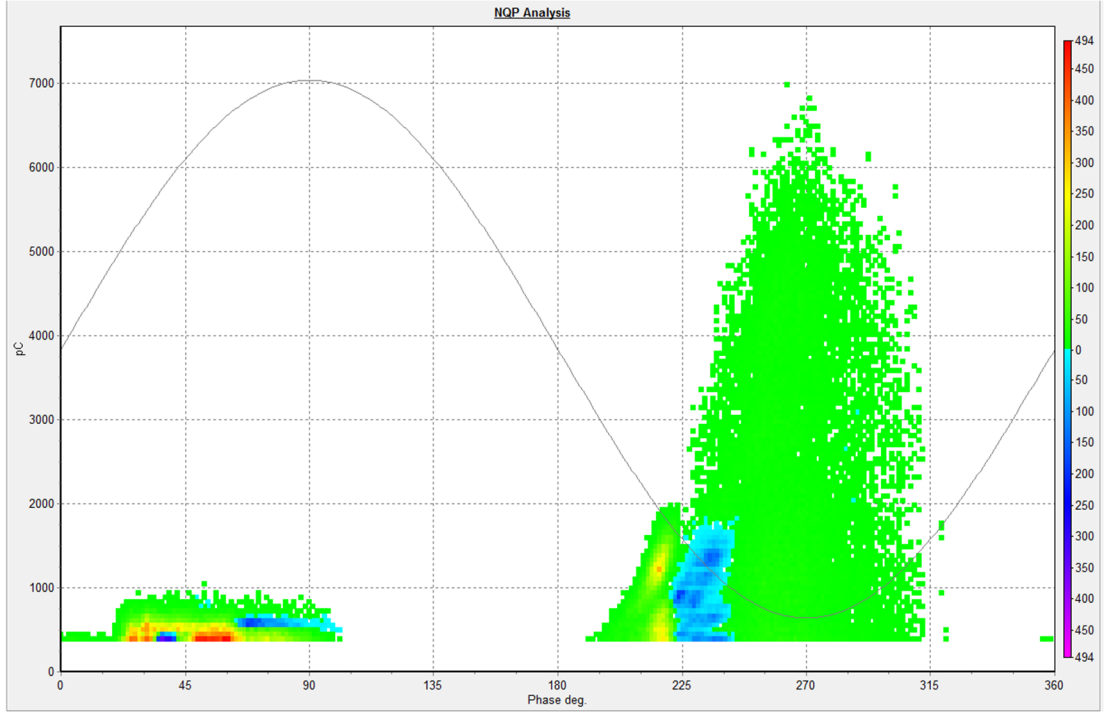
Grafiklerin hepsinde üç temel konuda değişimler görülmektedir. Bunlardan ilki manyetik alansız durumdaki n-q-p grafiklerinde görülen fazlardaki yığılmaların manyetik alan etkisiyle genişlemesidir. Manyetik akı yoğunluğu ne kadar büyükse fazlardaki kaymalar ve genişlemeler o kadar büyük olmuştur. Manyetik alan varlığı hemen hemen bütün grafiklerde yığılmaları özellikle sol tarafa doğru kaydırmıştır. Bu kaymalar en çok negatif yarı dalgada görülmüştür.

Manyetik alan varlığının etkilediği ikinci önemli kısım ise boşalmanın genliğidir. Manyetik alansız durumda elde edilen n-q-p verileri ile manyetik alanlı durumdaki n-q-p verileri kıyaslandığında boşalma genliği değerlerinde özellikle negatif yarı dalgalarda yükselmeler görülmüştür. Manyetik akı yoğunluğunun en büyük olduğu 10 mm kap açıklığı durumu için etki en büyüktür. Açıklıklar değiştikçe boşalmanın genliğine olan etki de değişmiştir. Boşalma genliğindeki artmalar ayrıca pozitif yarı dalgada da belirlenmiştir.

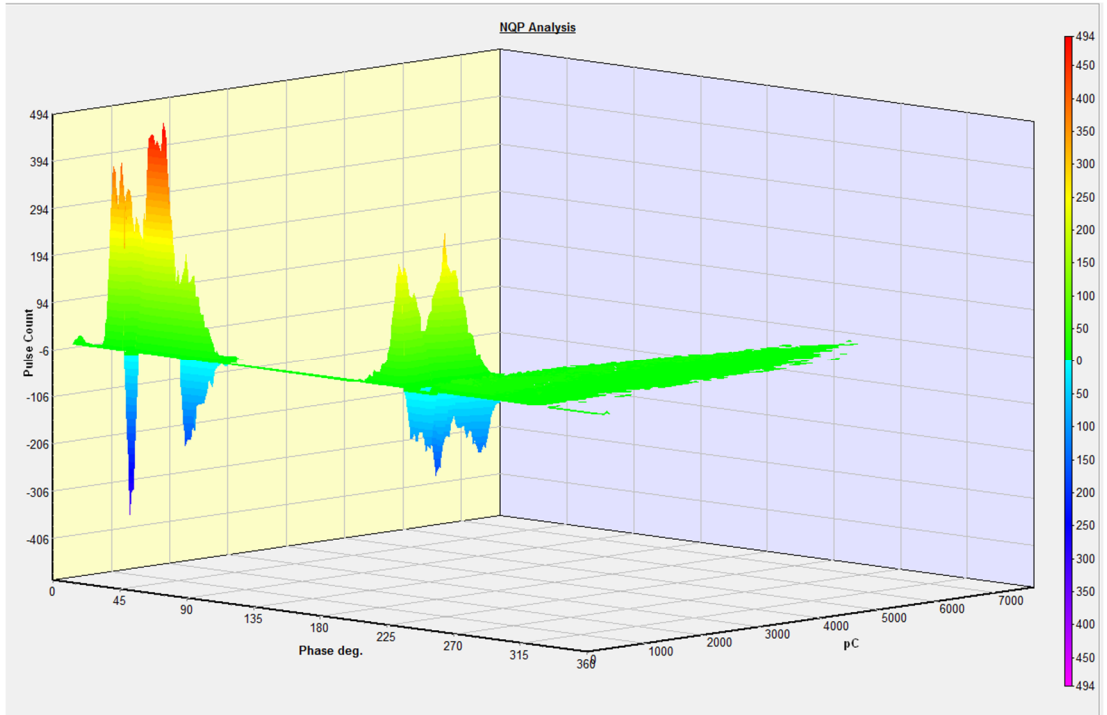
Manyetik alanın varlığı boşalma (darbe) sayısı üzerinde de etkili olmuştur. Özellikle 3 boyutlu n-q-p grafiklerinde bu daha iyi görülmektedir. Pozitif yarı dalgada boşalma sayısında manyetik alan varlığıyla birlikte artmalar belirlenmiştir. Negatif yarı dalgalarda manyetik alan etkisiyle fazlardaki yığılmalarda kaymalar gerçekleşmiştir. Bu kaymaların yığılmaları taşıdığı fazlardaki boşalma sayılarında manyetik alanın baskın olduğu görülmektedir. Kayma öncesindeki fazlarda ise manyetik alansız durumun boşalma sayıları daha yoğun olarak 3 boyutlu grafiklerde gözlemlenmiştir.

Silindir mıknatıslarla oluşturulan manyetik alanlı n-q-p grafikleri ile manyetik alansız durumdaki n-q-p grafiklerinin kıyaslanması gerçekleştirildikten sonra. Benzer n-q-p analizi bu sefer dikdörtgen mıknatıslar ile manyetik alansız durum arasında yapılmıştır. Bu n-q-p analizi sadece 30 mm elektrot açıklığı ve üç kap açıklığı için gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.46 ve Şekil 4.47’de dikdörtgen mıknatıslarla oluşturulan manyetik alanın etkisi 30 mm elektrot açıklığı ve 10 mm kap açıklığı için görülmektedir.

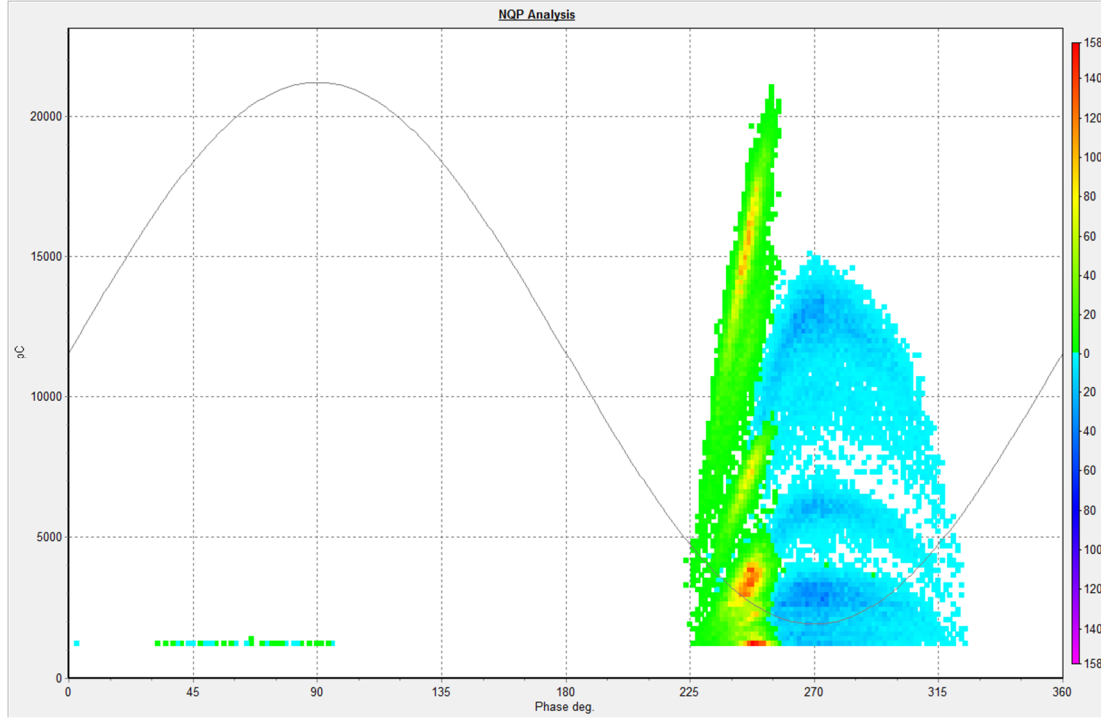


Şekil 4.46 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 10 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (385 pC).

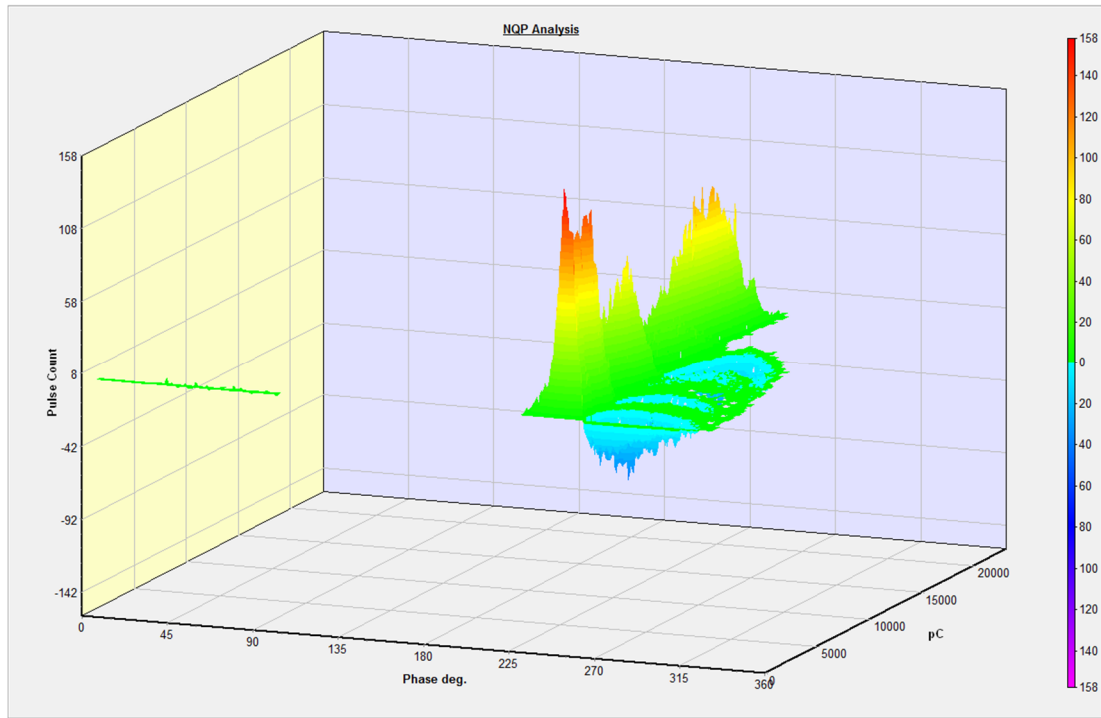


Şekil 4.47 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 10 mm durumu için 3 boyutlu n-q-p grafiği (385 pC).

Şekil 4.48 ve Şekil 4.49’da dikdörtgen mıknatıslarla oluşturulan manyetik alanın etkisi 30 mm elektrot açıklığı ve 20 mm kap açıklığı için görülmektedir.

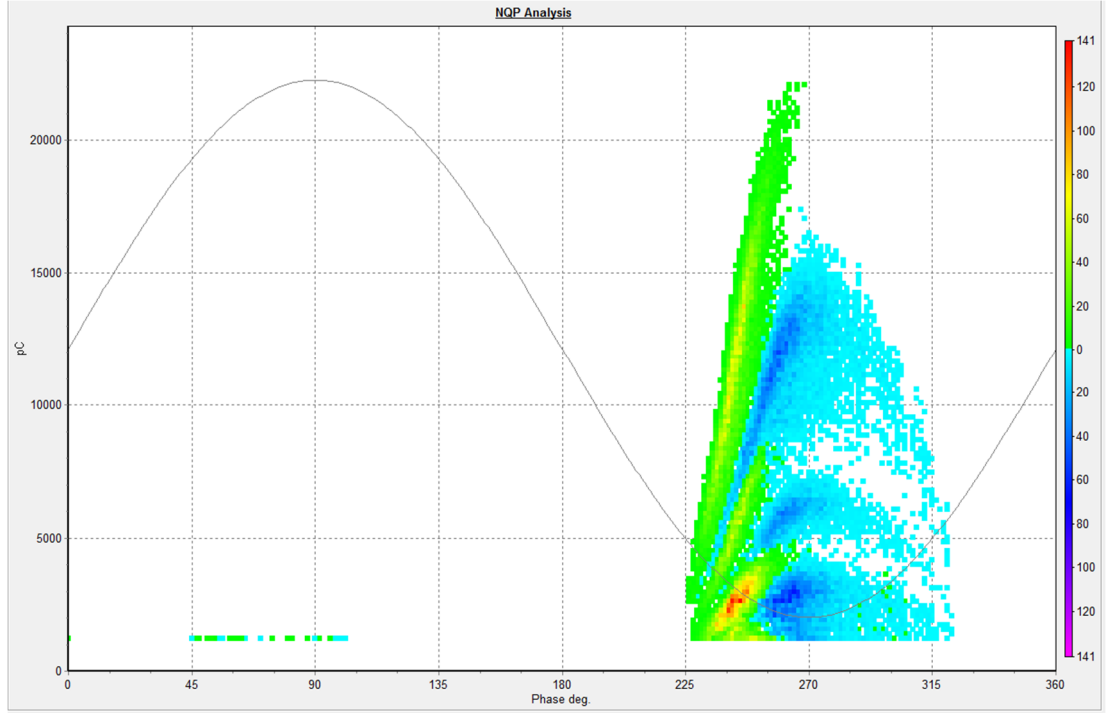


Şekil 4.48 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 20 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (1220 pC).

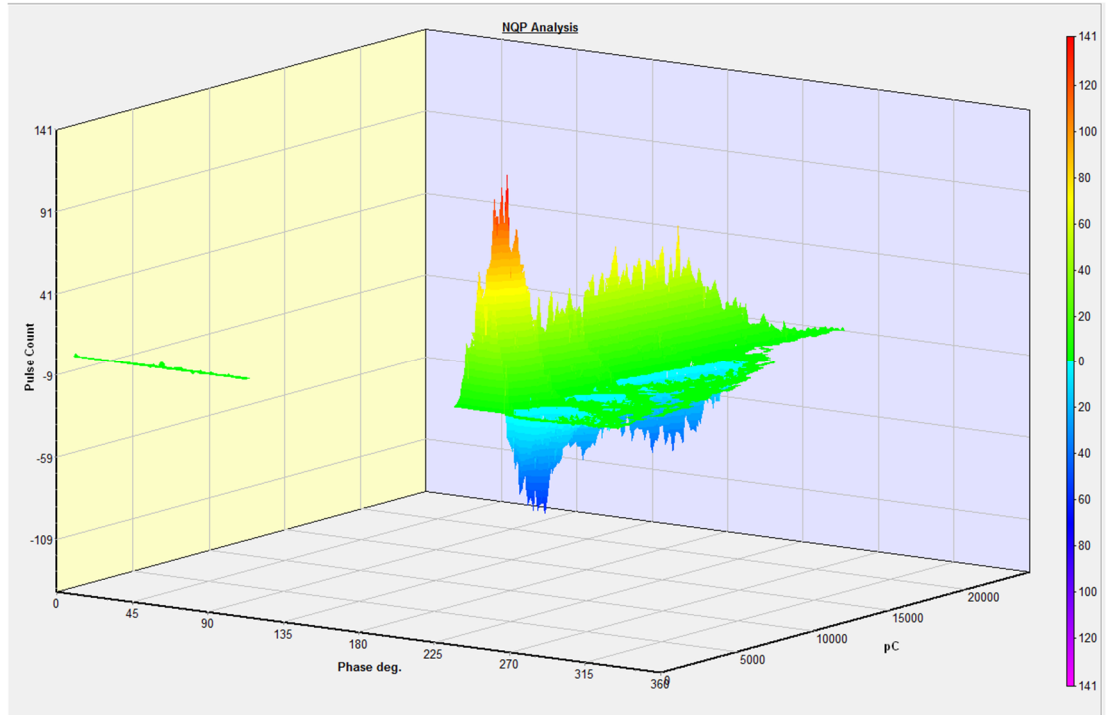


Şekil 4.49 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 20 mm durumu için 3 boyutlu n-q-p grafiği (1220 pC).

Şekil 4.50 ve Şekil 4.51’de dikdörtgen mıknatıslarla oluşturulan manyetik alanın etkisi 30 mm elektrot açıklığı ve 25 mm kap açıklığı için görülmektedir.



Şekil 4.50 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 25 mm durumu için 2 boyutlu n-q-p grafiği (1220 pC).



Şekil 4.51 : Manyetik alan varlığının etkisi, düşey açıklık 30 mm, yatay açıklık 25 mm durumu için 3 boyutlu n-q-p grafiği (1220 pC).

Dikdörtgen mıknatıslarla oluşturulan manyetik alan, manyetik alansız durumdaki n-q-p verilerine yine silindirik mıknatıslarla oluşturulan durumlardaki gibi üç kısımda etki etmiştir. Elde edilen grafiklerde yine manyetik alan varlığına ait veriler yeşil-kırmızı renk aralığında ve manyetik alanın olmadığı duruma ait n-q-p verileri ise mavi-mor renk aralığında görülmektedir. Manyetik alanın olmadığı durumda elde edilen n-q-p grafikleri ile dikdörtgen mıknatısların kullanıldığı durumda elde edilen n-q-p grafiklerinin kıyaslanması için elde edilen 2 ve 3 boyutlu grafikler incelendiğinde n-q-p verilerine en büyük etkiler özellikle 10 mm kap açıklığında görülmektedir. Bunun nedeni manyetik akı yoğunluğunun bu açıklıkta en büyük değere sahip olmasıdır. 20 mm ve 25 mm kap açıklıklarında dikdörtgen mıknatıslarla oluşturulan manyetik alanın n-q-p verileri üzerine etkisi 10 mm'deki duruma kıyasla daha azdır. Buna rağmen üç kap açıklığı değeri içinde elde edilen 2 ve 3 boyutlu grafikler incelendiğinde manyetik alan varlığında fazlarda kaymalar ve genişlemeler, boşalma genliklerinde ve sayılarında artışlar görülmüştür. Dikdörtgen mıknatıslarla oluşturulan manyetik alan özellikle negatif yarı dalgada değişimlere neden olmuştur. Elde edilen grafiklerde negatif yarı dalgalar incelendiğinde boşalma veri yığılmalarının sol taraftaki fazlara doğru kaydığı ve genliklerinin manyetik akı yoğunluğuna bağlı olarak arttığı belirlenmiştir. Ayrıca hem pozitif hem negatif yarı dalgalarda boşalma sayılarında artışlar 3 boyutlu grafiklerde görülmüştür.

Gerçekleştirilen n-q-p analizi ile manyetik alan varlığının boşalma sinyalinin n-q-p (faz, boşalma genliği ve boşalma sayısı) verilerine etki ettiği bulunmuştur. Manyetik akı yoğunluğunun en büyük değerleri için yani kap açıklığının en küçük olduğu değerler için n-q-p verileri üzerine etkiler de en fazla olmuştur.

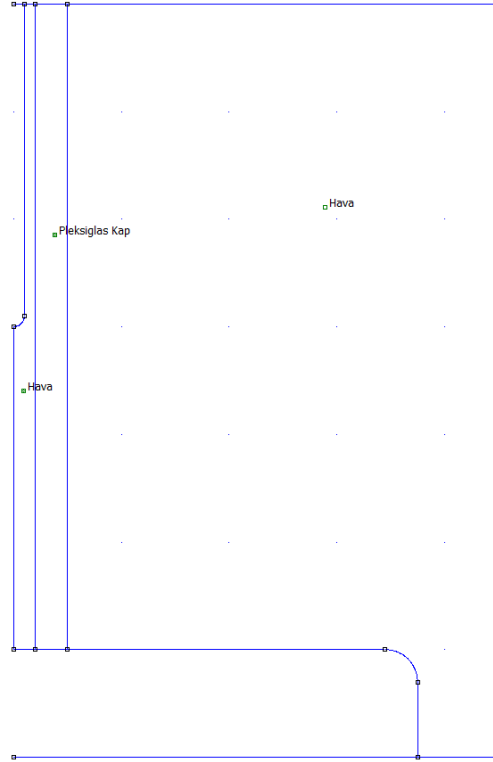
N-q-p analizi tamamlandıktan sonra sonlu elemanlar analizine geçilmiştir.

4.3 Sonlu Elemanlar Analizi

Sonlu elemanlar yöntemi birçok mühendislik problemine çözüm üreten etkili hesaplama yöntemlerinden biridir. Bilgisayar yardımıyla FEMM (Finite Element Method Magnetics) programı kullanılarak elektromanyetik problemler çözülebilmekte ve analiz edilebilmektedir. Alan dağılımlarının incelenmesinde önemli bir program olan FEMM, gerçekleştirilen deneylerde hem elektrik alan hem de manyetik alan durumlarının incelenmesinde ayrı ayrı kullanılmıştır.

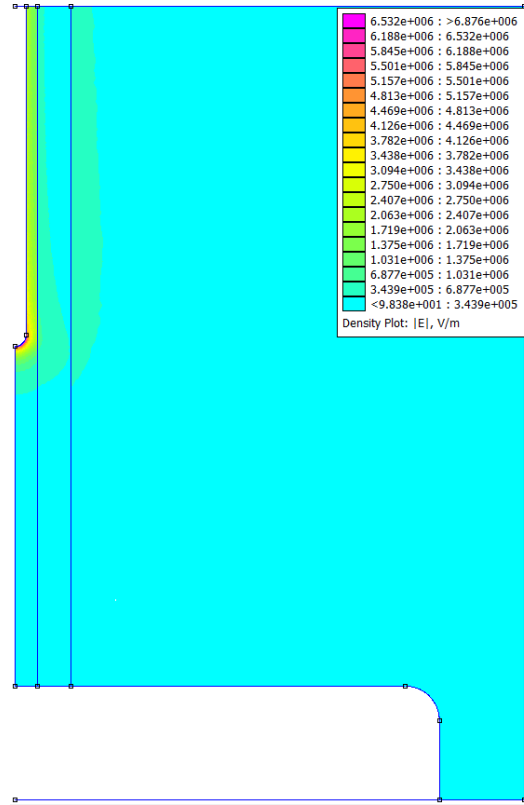
4.3.1 Elektrik alan analizi

Deneylerde 30 mm, 35 mm ve 40 mm elektrot açıklıkları ile 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm ve 30 mm kap açıklıkları manyetik alanlı ve alansız durumlar için kullanılmıştır. Gerçekleştirilen deneylerde çubuk-düzlem elektrot sisteminde manyetik alanın olmadığı durumda sadece elektrik alan vardır. Bu durumu incelemek için öncelikle seçilen bir kap ve elektrot açıklığı değeri için çubuk-düzlem elektrot sistemi, içerisinde bulunduğu pleksiglas kap ile FEMM programında modellenmiştir (Şekil 4.52). Şekil 4.52, elektrot açıklığı 30 mm, (dış) kap açıklığı 10 mm durumu için çizilmiştir. FEMM programında çubuk elektrot için 10 kV gerilim, alt elektrot için ise 0 V gerilim değerleri seçilmiştir. Çizim için eksenel simetri kullanılmıştır. Bağıl dielektrik sabiti pleksiglas kap için $\epsilon_r = 2.8$, kapta yalıtkan olarak bulunan hava için $\epsilon_r = 1$ alınmıştır. Pleksiglas kap 3 mm kalınlığındadır. FEMM programı tanımlanan bölgeleri üçgen elemanlara bölerek elektrik alan hesabını gerçekleştirmiştir. Program sayesinde maksimum elektrik alan şiddeti (E_{max}) ve alan dağılımı bulunmuştur.



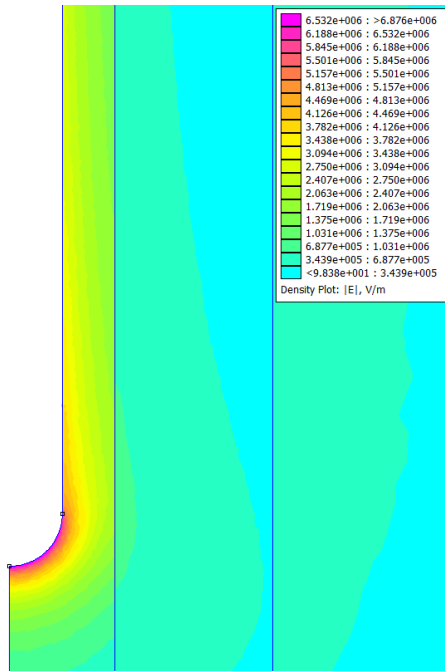
Şekil 4.52 : Elektrot açıklığı 30 mm, kap açıklığı 10 mm durumu için çizilen çubuk-düzlem elektrot sistemi.

Şekil 4.53’de, Şekil 4.52’de modellenen sistem için elektrik alan dağılımı görülmektedir.



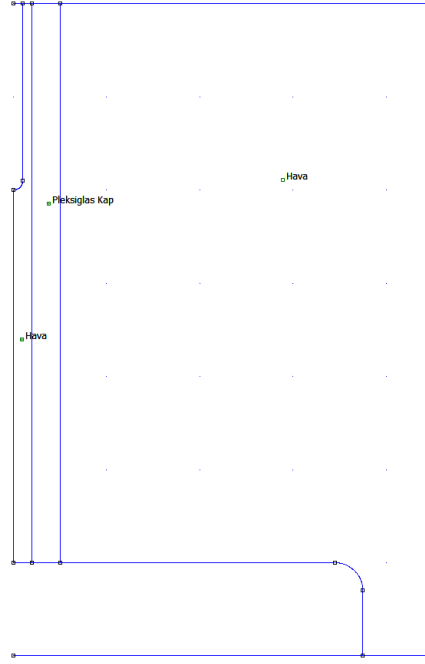
Şekil 4.53 : Çubuk-düzlem elektrot sisteminde 30 mm elektrot açıklığı, 10 mm kap açıklığı durumu için elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.53 incelendiğinde en büyük elektrik alanın çubuk elektrotun uç kısmında olduğu görülmektedir. Çubuk elektrot üzerindeki elektik alan dağılımının daha net görülmesi için uç kısmına yaklaşılmıştır (Şekil 4.54).



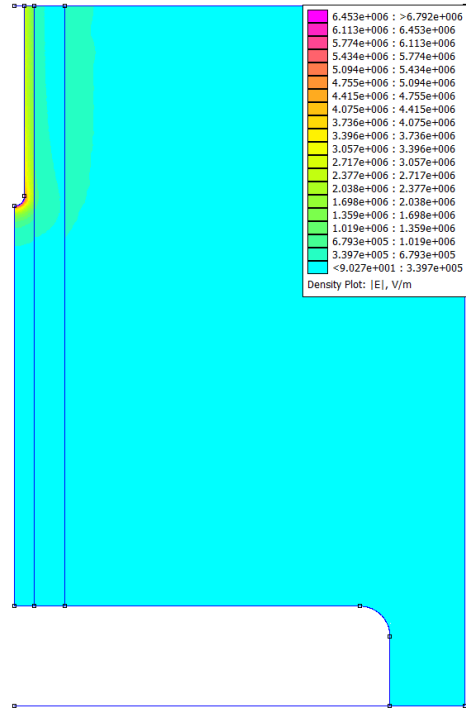
Şekil 4.54 : Şekil 4.53'deki çubuk elektrodun yaklaşılmış şekli.

Bir diğer çizilen modelde elektrot açıklığı 40 mm'ye getirilmiştir. Kap açıklığı yine 10 mm de sabit tutulmuştur (Şekil 4.55).



Şekil 4.55 : Elektrot açıklığı 40 mm, kap açıklığı 10 mm durumu için çizilen çubuk-düzlem elektrot sistemi.

Şekil 4.56'da, Şekil 4.55'de modellenen sistem için elektrik alan dağılımı görülmektedir.



Şekil 4.56 : Çubuk-düzlem elektrot sisteminde 40 mm elektrot açıklığı, 10 mm kap açıklığı durumu için elektrik alan dağılımı.

FEMM programında elektrik alan araştırılması için iki farklı açıklık durumu seçilmiştir. Bu açıklar için şekiller çizilerek elektrik alan dağılımları ve E_{max} değerleri bulunmuştur. İncelenen iki durum için programdan bulunan E_{max} değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 : FEMM programında çizilen şekiller için bulunan E_{max} değerleri.

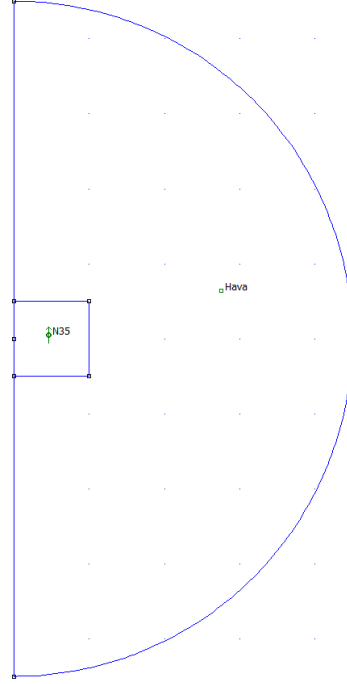
Açıklık Durumu	Maksimum elektrik alan şiddeti E_{max} (V/m)
Elektrot Açıklığı 30 mm Kap Açıklığı 10 mm	6.876e+006
Elektrot Açıklığı 40 mm Kap Açıklığı 10 mm	6.792e+006

Çizelge 4.2 incelendiğinde aynı kap açıklığında, elektrot açıklığı arttıkça maksimum elektrik alan şiddetinde azalma görülmüştür. Buna göre elektrot açıklığı arttıkça alandaki zorlanma azalmış yorumu yapılabilir. Elektrot açıklığı arttıkça elektrik alan şiddeti azaldığı için kısmi boşalmaların bir önceki durumdan daha büyük bir gerilim değerinde başlaması beklenir. Yapılan deneylerde elektrot açıklığı arttıkça KB başlangıç geriliminin hem manyetik alansız hem de manyetik alanlı durumlarda arttığı görülmüştür. FEMM programıyla yapılan analiz deneylerde elde edilen sonuçları desteklemektedir.

4.3.2 Manyetik alan analizi

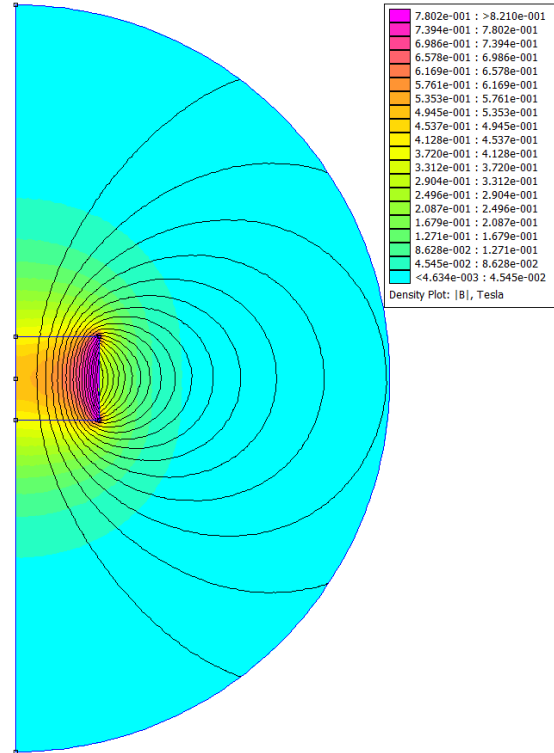
Elektrik alanla ilgili analiz gerçekleştirildikten sonra manyetik alan analizine geçilmiştir. FEMM programında elektrik ve manyetik alan ayrı ayrı incelenebilmektedir. Gerçekleştirilen deneylerde manyetik alan silindir ve dikdörtgen mıknatıslar kullanılarak oluşturulmuştur. Önce silindir mıknatıslarla ilgili manyetik alan dağılımı incelenmiştir. Silindir mıknatıslar deneylerde Şekil 3.21’deki gibi kullanılmıştır. FEMM programında silindir mıknatıslar Şekil 3.21’deki konumlarında modellenemediği için bu mıknatıslardan biri FEMM programında ekselel geometride tekli olarak çizilmiştir (Şekil 4.57). Silindir mıknatısın çapı 20 mm kalınlığı 10 mm’dir. Mıknatıs hava ortamında çizilmiştir. Silindir mıknatıs N35

sınıfına aittir. Mıknatısın N ve S kutuplarından konumundan dolayı manyetizasyon yönü 90° seçilmiştir.



Şekil 4.57 : Neodyum silindir mıknatısa ait çizilen model.

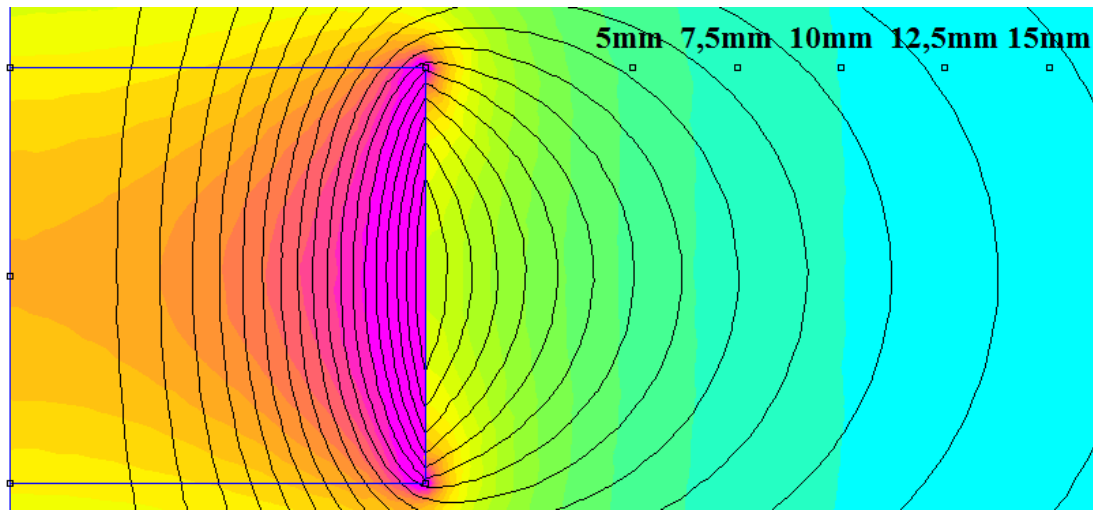
Şekil 4.58’de, Şekil 4.57’de çizilen silindir mıknatıs için manyetik alan dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 4.58 : Neodyum silindir mıknatısa ait alan dağılımı.

Şekil 4.58 incelendiğinde manyetik akı yoğunluğu değerinin mıknatısın yüzeyinden uzaklaştıkça büyük ölçüde azaldığı belirlenmiştir. Manyetik akı yoğunluğu değeri mıknatıs yüzeyinde maksimumdur.

Gerçekleştirilen deneylerde silindir mıknatıslar beş açıklık için kullanılmıştır. Bu beş açıklığın yarısı olan mesafeler noktalar halinde tek mıknatıs için Şekil 4.59’da görülmektedir. Şekil 4.59’da görülen noktalar deneylerde kullanılan çubuk elektrodun uç kısımları düşünülerek konumlandırılmıştır. Deneylerde üzerine yüksek alternatif gerilim uygulanan çubuk elektrodun uç kısmı tek mıknatıs tarafından bakıldığında Şekil 4.59’daki noktalarda bulunmaktadır.



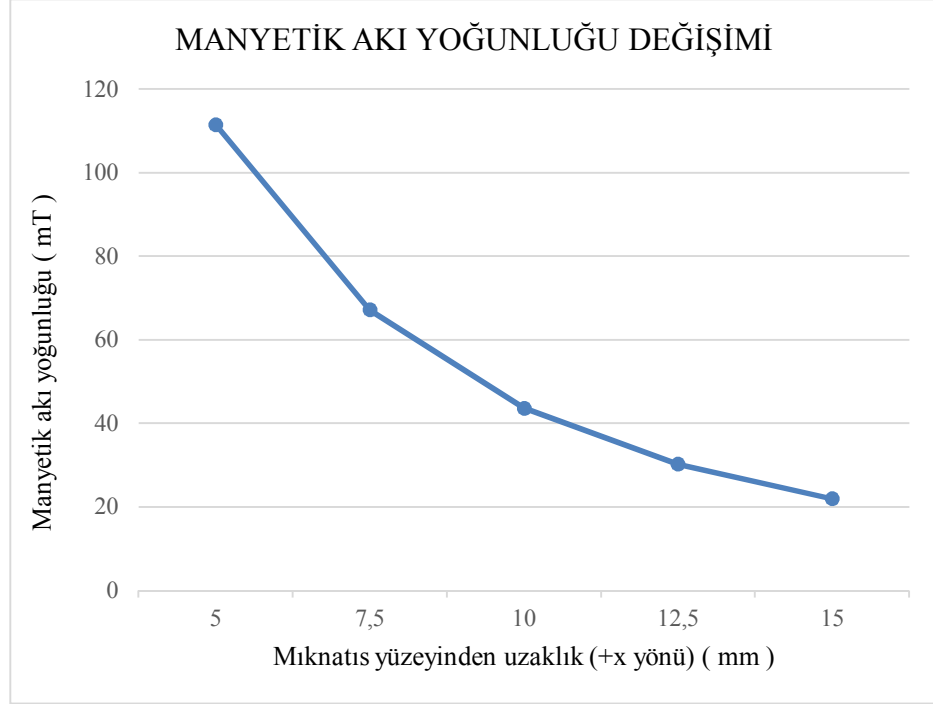
Şekil 4.59 : Neodyum silindir mıknatısına ait beş noktada alan dağılımı.

Şekil 4.59’da görülen beş noktaya ait manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti değerleri FEMM programından bulunmuştur (Çizelge 4.3).

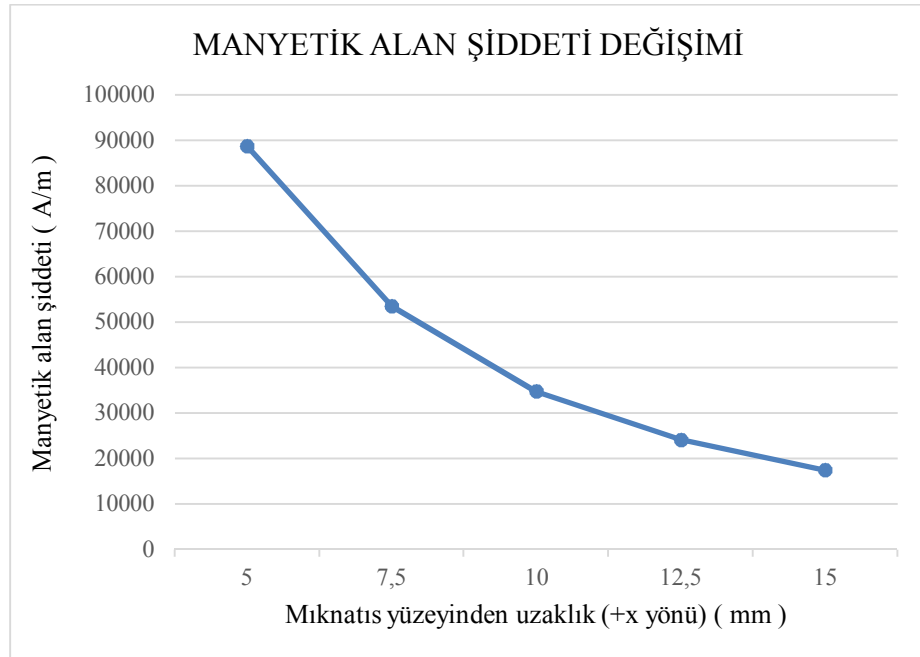
Çizelge 4.3 : FEMM programından beş nokta için bulunan B ve H değerleri.

Mıknatıs yüzeyinden uzaklık (+x yönü)	Manyetik akı yoğunluğu B (mT)	Manyetik alan şiddeti H (A/m)
5 mm	111,5	88723,4
7,5 mm	67,2	53487,1
10 mm	43,7	34755,2
12,5 mm	30,3	24137,6
15 mm	22	17469,1

Tek silindir mıknatısın yüzeyinden +x yönündeki uzaklıkta bulunan beş noktaya ait programdan elde edilen manyetik akı yoğunluğu ve alan şiddeti değerleri Çizelge 4.3’de verilmiştir. Mıknatısın yüzeyinden uzaklaşıldıkça B ve H değerlerinin oldukça azaldığı burada değerlerle de görülmektedir. Bu değişimin daha net görülebilmesi için Çizelge 4.3’deki verilerle Şekil 4.60 ve Şekil 4.61 çizilmiştir.

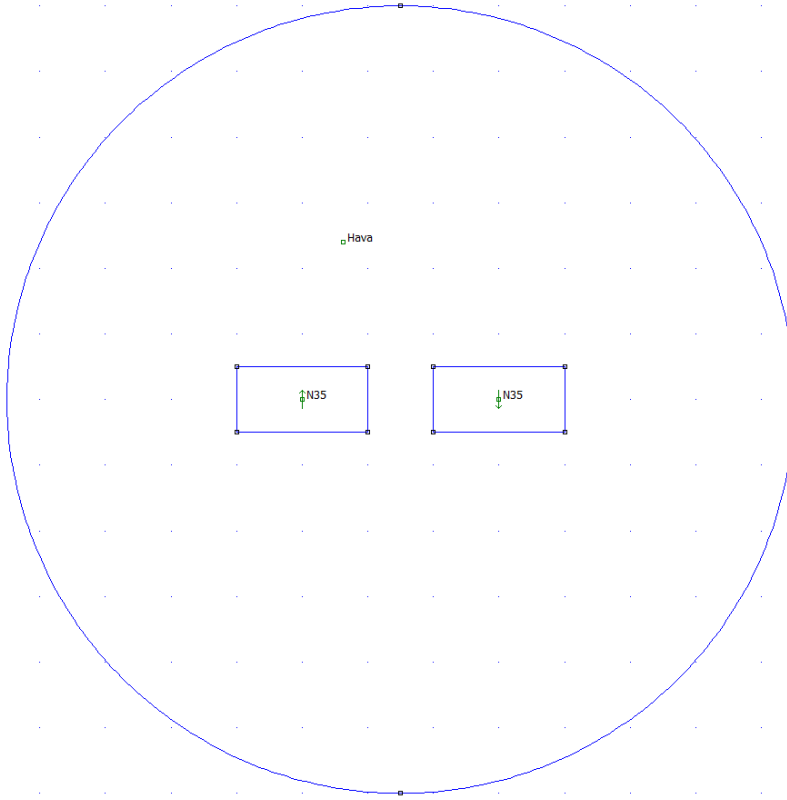


Şekil 4.60 : Silindir mıknatıs yüzeyinden uzakta bulunan beş noktada B değişimi.



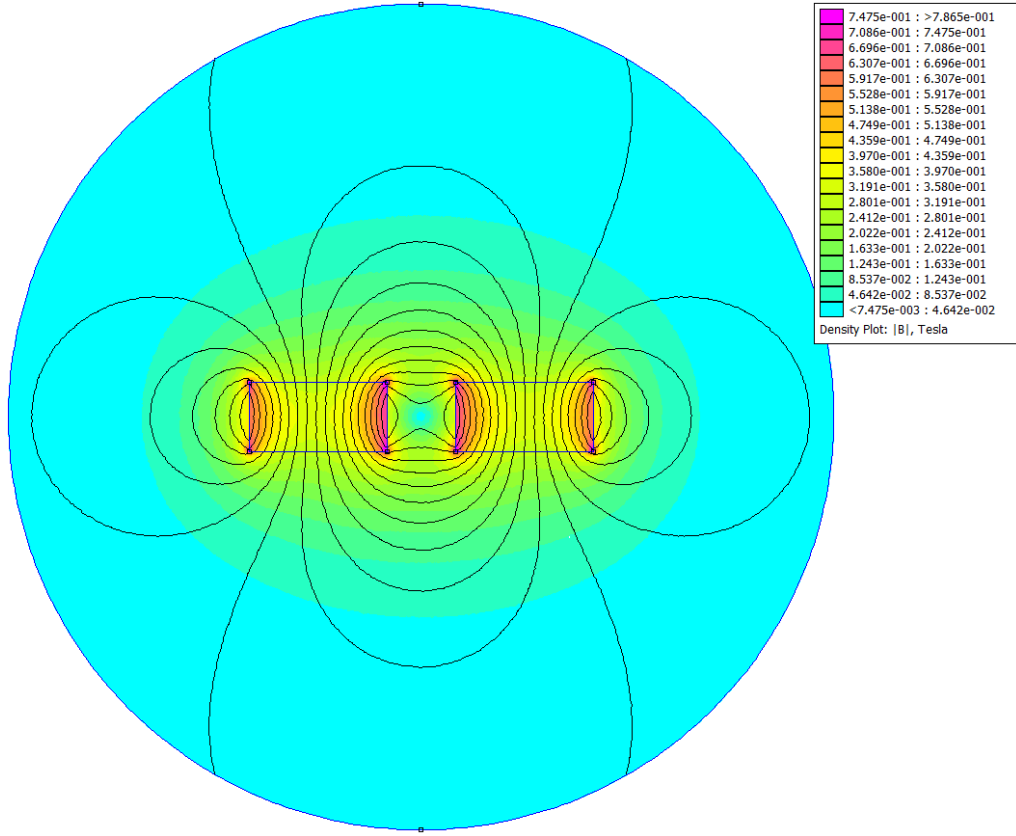
Şekil 4.61 : Silindir mıknatıs yüzeyinden uzakta bulunan beş noktada H değişimi.

Silindir mıknatısla ilgili analiz yapıldıktan sonra dikdörtgen mıknatıslara geçilmiştir. Neodyum dikdörtgen mıknatıslar deneylerde tek elektrot açıklığında (30 mm) ve üç kap açıklığında (10 mm, 20 mm ve 25 mm) kullanılmıştır. Deneylerde dikdörtgen mıknatıslar Şekil 3.23'deki gibi konumlandırılmıştır. Bu konumlandırma için FEMM programında problem tipi olarak düzlemsel seçilmiştir. Düzlemsel problem tipinde iki mıknatıs da FEMM programında modellenenbilmektedir. Bir dikdörtgen mıknatısın boyu 40 mm, eni 20 mm ve kalınlığı 10 mm'dir. Derinlik 40 mm olarak problem kısmına yazılmıştır. Dikdörtgen mıknatıslar da N35 sınıfına aittir. Dikdörtgen mıknatıslar kap üzerinde hava ortamındadır. Dikdörtgen mıknatıslar arası açıklığın 10 mm olduğu durum için ilk çizim gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.62).

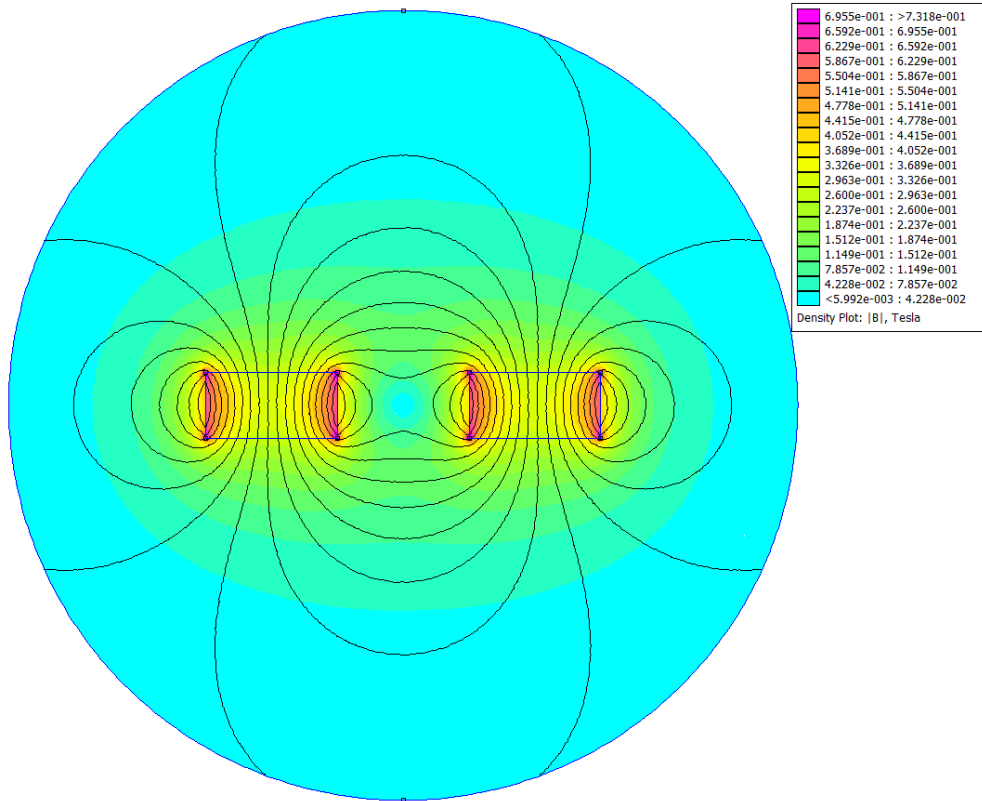


Şekil 4.62 : İki dikdörtgen mıknatıs için FEMM programında yapılan çizim (mıknatıslar arası mesafe 10 mm).

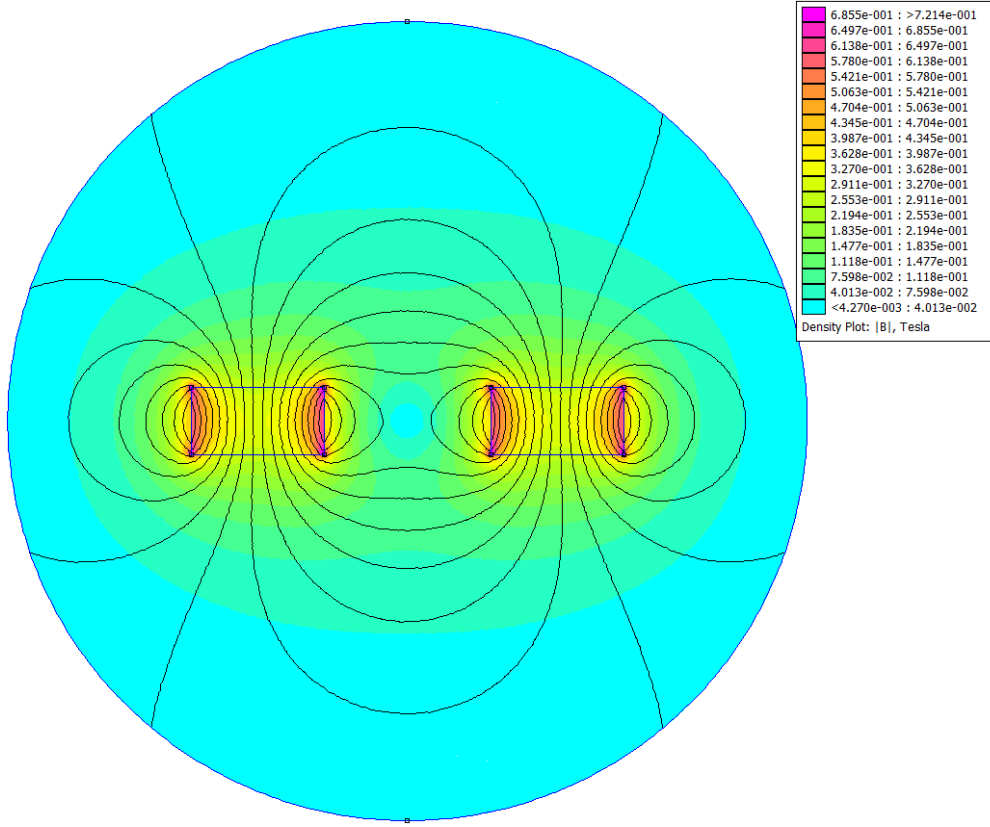
Şekil 4.63'te, Şekil 4.62'de görülen çizime ait FEMM programından bulunan alan dağılımı görülmektedir. Program daha önceden tanımlanan bölgeleri üçgen elemanlara bölerek alan hesabını gerçekleştirmiştir. 10 mm açıklığındaki analiz gerçekleştirildikten sonra 20 mm ve 25 mm içinde benzer işlemler FEMM programında yapılmıştır. 20 mm ve 25 mm mıknatıs açıklıkları için bulunan alan dağılımları sırası ile Şekil 4.64 ve Şekil 4.65'te verilmiştir.



Şekil 4.63 : Dikdörtgen mıknatıslar için yapılan çizime ait manyetik alan dağılımı (mıknatıslar arası mesafe 10 mm).

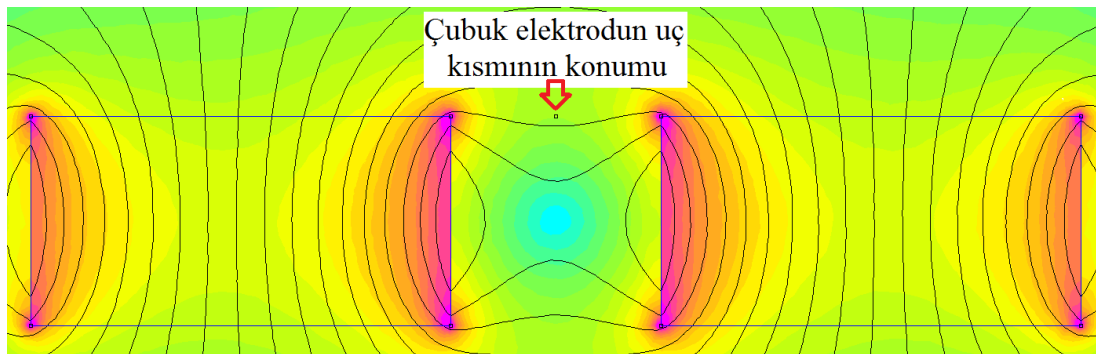


Şekil 4.64 : 20 mm mıknatıs açıklığına ait manyetik alan dağılımı.



Şekil 4.65 : 25 mm mıknatıs açıklığına ait manyetik alan dağılımı.

Dikdörtgen mıknatıslar için elde edilen üç alan dağılımına bakıldığında mıknatıslar arası mesafe arttıkça manyetik akı yoğunluğunda azalmalar görülmüştür. Bu durumun daha net belirlenmesi için çubuk elektrot ucuna nokta konulmuştur. Deneylerde kullanılan üç açıklık durumunda da çubuk elektrodun uç kısmı mıknatıslar arası mesafede tam ortada Şekil 4.66'daki gibi konumlandırılmıştır. Çubuk elektrot ucunun bulunduğu yere FEMM programında üç açıklık içinde nokta konulmuş ve bu noktadaki B ve H değerleri program yardımıyla bulunmuştur (Çizelge 4.4).

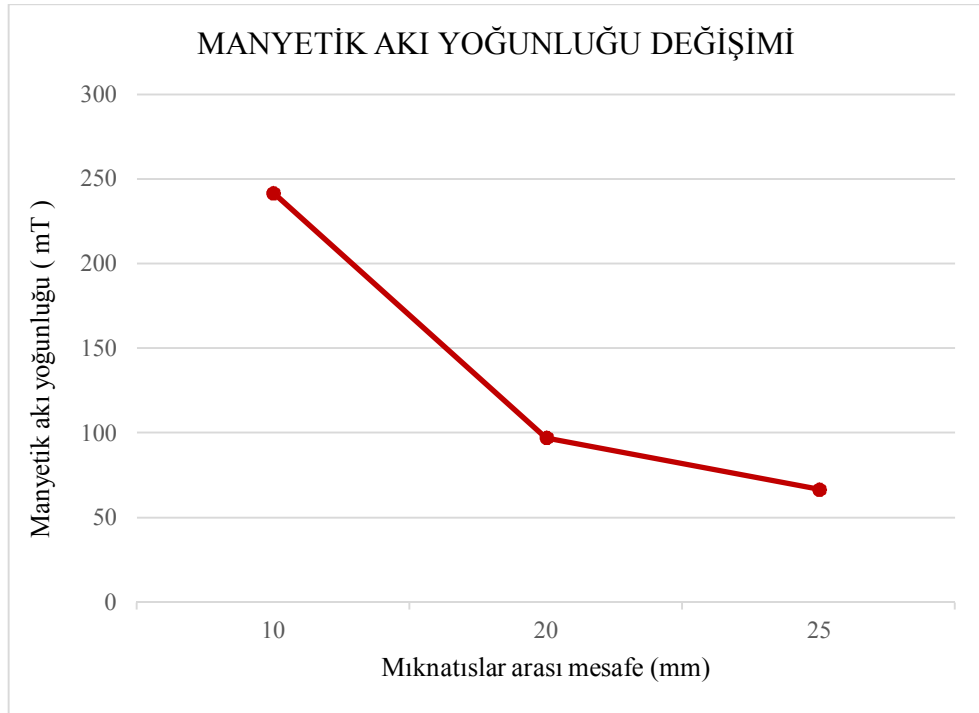


Şekil 4.66 : Dikdörtgen mıknatıslarda çubuk elektrodun uç kısmının konumu.

Çizelge 4.4 : FEMM programında dikdörtgen mıknatısların ortasındaki elektrot ucu için bulunan B ve H değerleri.

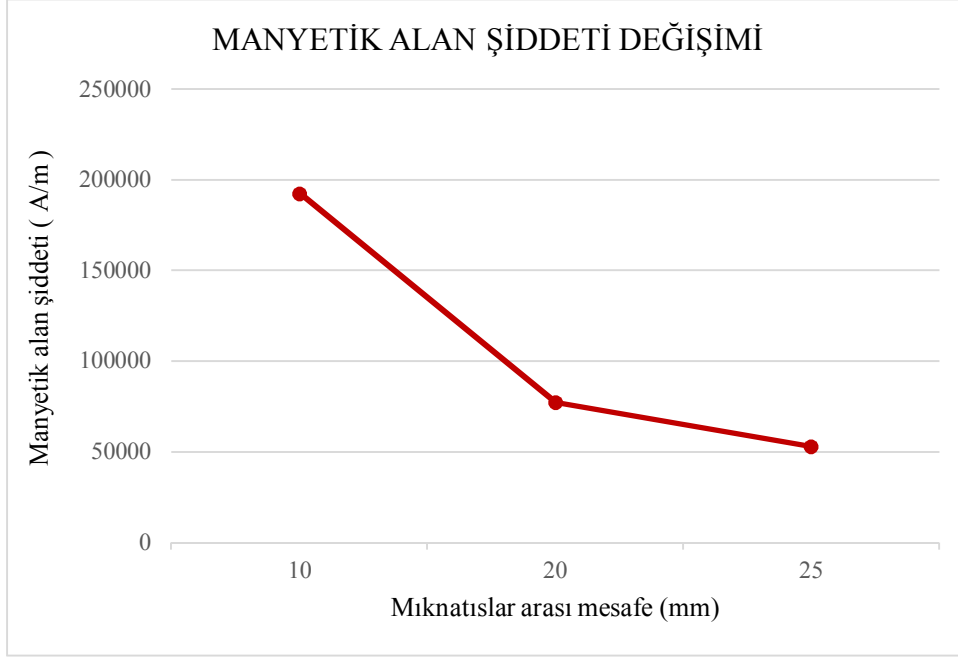
Mıknatıslar arası mesafe	Manyetik akı yoğunluğu B (mT)	Manyetik alan şiddeti H (A/m)
10 mm	242	192776
20 mm	97,3	77396
25 mm	66,8	53168,7

Çizelge 4.4 incelendiğinde manyetik akı yoğunluğu ve alan şiddeti değerlerinin mıknatıslar arası mesafe arttıkça azaldığı görülmektedir. Dikdörtgen mıknatıslar için FEMM programıyla bulunan değerler ile Çizelge 3.5'te daha önce Gaussmetre yardımıyla bulunan manyetik akı yoğunluğu değerleri benzerlik göstermektedir. Çizelge 4.4'de elde edilen değerlerdeki değişimin daha net görülmesi için Şekil 4.67 ve Şekil 4.68 elde edilmiştir.



Şekil 4.67 : Neodyum dikdörtgen mıknatıslar arası üç uzaklık durumu için manyetik akı yoğunluğu değişimi.

FEMM modellemelerinde üç açıklık değeri alınmasının nedeni dikdörtgen mıknatısların deneylerde sadece 10 mm, 20 mm ve 25 mm açıklıklarında kullanılmasıdır. Şekil 4.67 ve Şekil 4.68'de bu üç durum için çizilmiştir.



Şekil 4.68 : Neodyum dikdörtgen mıknatıslar arası üç uzaklık durumu için manyetik alan şiddeti değişimi.

Analizler sonucu hem silindir hem de dikdörtgen mıknatıslar arasındaki mesafe arttıkça manyetik akı yoğunluğunun oldukça azaldığı görülmüştür. Bu nedenle deneylerde mıknatıslar arası küçük açıklıklarda çalışılmıştır. Manyetik akı yoğunluğunun en büyük değeri 10 mm açıklığı için elde edilmiştir. Bu değer silindir mıknatıslar için 180 mT, dikdörtgen mıknatıslarda ise 240 mT'dır (Çizelge 3.5). Manyetik akı yoğunluğunun en büyük olduğu değerlerde hem KB başlangıç geriliminin hem de n-q-p verilerinin en çok etkilendiği belirlenmiştir.

FEMM analizi sayesinde Neodyum mıknatıslarla oluşturulan manyetik alanların nasıl bir dağılıma sahip olduğu bulunmuştur. Ayrıca manyetik akı yoğunluğu ve alan şiddeti değerleri program sayesinde hesaplanmıştır. Kullanılan mıknatıs açıklıklarında görülen manyetik alan değişimleri deneylerde kullanılan silindir ve dikdörtgen mıknatıslar için bulunmuştur.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yüksek gerilim sistemlerinde önemli yere sahip olan kısmi boşalmalar konusu ile ilgili deneysel çalışmalar bu tezde gerçekleştirilmiştir. Manyetik alan varlığının kısmi boşalma sinyalleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu durumun incelenmesi için bir çubuk-düzlem elektrot sistemi seçilmiştir. 30 mm, 35 mm, 40 mm elektrot açıklıkları ve 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm kap açıklıkları bu elektrot sistemi için kullanılmıştır. Deneyde kullanılan elektrot sistemine yüksek alternatif gerilim, manyetik alanın olduğu ve olmadığı durumlar için bir varyak yardımıyla sıfırdan başlanıp artırılarak uygulanmıştır. Üretilen kısmi boşalma verileri bir kısmi boşalma ölçüm cihazı (Haefely DDX-9121) ve bilgisayar yardımıyla elde edilmiştir. Deneysel çalışmalarda manyetik alanın kısmi boşalma başlangıç gerilimine ve n-q-p değerlerine etkilerinin bulunması amaçlanmıştır.

Deney sonuçlarının analizinde ilk önce kısmi boşalmanın başlangıç gerilimi üzerinde durulmuştur. Manyetik alanlı ve alansız durumda alınan veriler kıyaslandığında, manyetik alanın kısmi boşalma başlangıç gerilimini düşürdüğü yapılan analizlerle belirlenmiştir. Bu etki manyetik akı yoğunluğunun büyük olduğu değerlerde daha fazla olmuştur. Farklı manyetik akı yoğunluklarındaki kısmi boşalma başlangıç gerilimindeki yüzde azalmalar da bulunmuştur. Ayrıca elektrot açıklığı arttıkça kısmi boşalma başlangıç geriliminin de arttığı elde edilen verilerden belirlenmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında gerçekleştirilen n-q-p deneylerinden elde edilen n-q-p grafikleri ile kısmi boşalma karakteristikleri analiz edilmiştir. Manyetik alanlı ve alansız durumlarda kısmi boşalma sinyalleri faz açıları, boşalma büyüklüğü ve boşalma sayıları bakımından ayrı ayrı ve aynı grafikler üzerinde kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamalardan manyetik alanın varlığının n-q-p verilerini oldukça etkilediği görülmüştür. Manyetik alan varlığında negatif ve pozitif yarı dalgaların faz açılarında kaymalar ve genişlemeler belirlenmiştir. Ayrıca manyetik alan varlığının boşalmaların büyüklüğünü ve gerçekleşen boşalma darbe sayılarını da arttırdığı bulunmuştur. Manyetik alanın güçlü olduğu durumlarda bu etkiler daha kuvvetli olmuştur.

Son olarak sonlu elemanlar yöntemine dayanan FEMM programı kullanılarak deneylerde kullanılan açıklık durumlarının elektrik ve manyetik alan dağılımlarını nasıl etkilediği bulunmuştur. Silindir mıknatıs yüzeyinden +x yönünde beş nokta için B ve H hesaplanmıştır. Dikdörtgen mıknatıslar üç açıklık durumu için deneylerde kullanıldığı koşullarda çizilerek B ve H değerleri program yardımıyla bulunmuştur. Neodyum silindir ve dikdörtgen mıknatısların yüzeyinden uzaklaştıkça manyetik akı yoğunluğu değerinin oldukça azaldığı yapılan analizde belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasında yüksek alternatif gerilim üretimi kumanda masasında bulunan bir varyak yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bunun yerine gerilimi ayarlanan değerde ve sürede, kademeli olarak kendisi arttırabilen bir sistem kullanılabilir. Bu durumda elektrot sistemine daha düzgün ve eşit değerlerde gerilim verileceği için artış oranı korunmuş olacaktır. Böylece kısmi boşalma başlangıç gerilimi değerlerinin daha rahat ve düzgün elde edilebilmesi mümkün olabilir.

Deneylerde çubuk-düzlem elektrot sistemi kullanılmıştır. Bu elektrot sistemine ek olarak farklı elektrotlar da kullanılarak benzer deneyler gerçekleştirilebilir. Bu sayede elektrot sistemleri arasında kıyaslamalar yapılabilir.

Manyetik alan üretimi Neodyum mıknatıslar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mıknatıslar yerine büyük manyetik alan değerlerine ulaşabilen bir bobin kullanılabilir. Bobine verilen akım izlenerek farklı akım değerlerinde üretilen manyetik alan değerlerinde benzer deneyler gerçekleştirilebilir.

Silindir mıknatıslar deneylerde kullanılan konumlarında ikili olarak FEMM programında çizilememektedir. Ayrıca elektrik ve manyetik alanın ikisi birden aynı sistemde FEMM programında modellenememektedir. FEMM programı yerine manyetik ve elektrik alanı bir arada inceleyebilecek bir program kullanılarak bu iki alan bir arada incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Phung, B. T., Blackburn, T. R., Peng G. D., Chang H. C. & Guan L. K.** (2005). Development of new partial discharge sensors for condition monitoring of power system equipment. *Australasian Universities Power Engineering Conference*, Hobart, 25 - 28 September.
- [2] **James, R. E., Blackburn, T. R. & Phung, B. T.** (1992). Optical fibre sensor for partial discharge detection and location in high-voltage power transformer. *Dielectric Materials, Measurements and Applications*, pp. 33–36.
- [3] **Ma, X., Zhou, C. & Kemp, I. J.** (2002). Interpretation of wavelet analysis and its application in partial discharge detection. *IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 9, no. 3, pp. 446-457, June.
- [4] **Hepburn, D. M., Stewart, B. G., Dissado, L. A. & Fothergil, J. C.** (2007). Magnetic field disturbance of partial discharge activity in a cone-plane gap. *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo*, pp 142-145, Nashville, America, Oct. 22 -24.
- [5] **Satish, L. & Zaengl, W. S.** (1994). Artificial neural networks for recognition of 3-d partial discharge patterns. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 1, pp. 265-275.
- [6] **Reid, A. J., Hepburn, D. M. & Stewart, B. G.** (2013). The influence of external magnetic fields on the partial discharge characteristics of voids. *Electrical Insulation Conference*, Canada.
- [7] **Hauschild, W. & Lemke, E.** (2014). *High-Voltage Test and Measuring Techniques*, Springer, Berlin.
- [8] **Sipocz, T., Skalny, J. & Veis, S.** (1977). The effect of the magnetic field on the positive corona discharge. *Czech. J. Phys. B* 27, pp. 418-421
- [9] **Moon, J., Lee, G. & Chung, S.** (1999). SO₂ and CO gas removal and discharge characteristics of a nonthermal plasma reactor in a crossed dc magnetic field. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, no. 5, pp. 1198-1204.
- [10] **Mi, J., Xu, D., Sun, Y., Du, S. & Chen, Y.** (2008). Influence of magnetic fields on negative corona discharge currents. *J. Electrostatics*, Vol. 66, pp. 457-462.
- [11] **Pekarek, S.** (2010). DC corona discharge ozone production enhanced by magnetic field. *European Phys. J. D*, Vol. 56, pp. 91–98.
- [12] **Tarifa, J. M. M., Conde, J. R., Robles, G. & Feito, J. S.** (2010). Influence of leakage magnetic fields on partial discharge activity in power transformers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 17, no. 6, pp. 1724-1730.

- [13] **Bhangaonkar, S., Kulkarni, S. V. & Shevgaonkar, R. K.** (2011). Study of the effects of alternating magnetic field on point-plane corona. *IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation*, 18(6):1813-1820.
- [14] **Li, X. L., Du, B. X., Xing, Y. Q., Li, J. & Jiang, J. P.** (2015). Effect of external magnetic fields on the breakdown and partial discharge characteristics of vegetable oil. *IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices*, Shanghai, China, November 20-23.
- [15] **Arora, R. & Mosch, W.** (2011). High Voltage and Electrical Insulation Engineering, IEEE Press, New Jersey.
- [16] **Kreuger F. H.** (1991). Industrial High Voltage -1, Delft University Press, Delft.
- [17] **Naidu, M. S. & Kamaraju V.** (1995). High Voltage Engineering, McGraw-Hill.
- [18] **Özkaya, M.** (2008). Yüksek Gerilim Tekniği, Cilt 1, İstanbul, Birsen Yayınevi.
- [19] **IEC Std 60270-2001.** High Voltage Test Techniques, Partial Discharge Measurements.
- [20] **Kreuger, F. H.** (1989). Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment, Butterworths, London.
- [21] **Illias, H., Yuan, T. S., Bakar, H. A. & Mokhlis, H.** (2012). Partial Discharge Patterns in High Voltage Insulation. *IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, Malaysia, December 2-5.
- [22] **Wadhwa C. L.** (2007). High Voltage Engineering, 2nd edn., New Delhi: New Age International.
- [23] **Kreuger F. H.** (1992). Industrial High Voltage -2, Delft University Press, Delft.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Uğur Aktepe
Doğum Tarihi ve Yeri : 1990 - İstanbul
E-posta : aktepeugr@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü

YAYINLAR:

- **Aktepe, U., Solak, M. A., Önal, E., Kalenderli, Ö.** (2014). Çok Düşük Frekanslı Yüksek Gerilim Üretilmesi ve Kontrolü. *Eleco Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, sf. 211-215, 27-29 Kasım.