



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



DOKTORA TEZİ

**TRANSFORMATÖRLERDE KISMİ BOŞALMANIN ÖLÇÜMÜ VE
KONUMUNUN BELİRLENMESİ İÇİN YENİ BİR YÖNTEM
GELİŞTİRİLMESİ**

Kaan GÜLNİHAR

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

**DANIŞMAN
Prof. Dr. Mukden UĞUR**

Haziran, 2017

İSTANBUL


Bu çalışma 5.06.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliğı Anabilim Dalı, Elektrik-Elektronik Mühendisliğı Programında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi


Prof. Dr. Mukden UĞUR (Başışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ
İstanbul Teknik Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Fakültesi


Prof. Dr. Aydın AKAN
İzmir Katip Çelebi Üniversitesi
Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi


Prof. Dr. Fırat KAÇAR
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Doç. Dr. Emel ÖNAL
İstanbul Teknik Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Fakültesi



20.04.2016 tarihli resmi gazetede yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Doktora öğrenimim süresince tüm çalışmalarında bana göstermiş olduğu destek ve yardımlarından, tükenmez sabrından ve göstermiş olduğu doğru yol haritasından ötürü çok değerli hocam sayın Prof. Dr. Mukden UĞUR'a, bu çalışmanın ortaya çıkmasında tecrübe ve birikimleri ile büyük katkıları olan değerli hocalarım sayın Prof. Dr. Aydın AKAN ve sayın Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ'ye teşekkür ederim. Çalışmalarım sürecinde bana düşünce ve bilgileri ile yardımcı olan İstanbul Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden sayın Dr. Cengiz Polat UZUNOĞLU'na teşekkür ederim.

Ayrıca doktora çalışmamda ihtiyaç duyduğum bazı ölçümler için yardımcı olan TÜBİTAK UME, Güç ve Enerji Laboratuvarı'ndan sayın Hüseyin ÇAYCI'ya, RF ve Mikrodalga Laboratuvarı'ndan sayın Dr. Murat CELEP'e ve EMC Laboratuvarı'ndan sayın Mehmet ÇINAR'a teşekkür ederim.

Müge, Deniz ve İpek'e... Sizlerin desteği olmadan bitmezdi.

Haziran, 2017

Kaan GÜLNİHAR

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
TABLO LİSTESİ	ix
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	x
ÖZET.....	xii
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KISIMLAR	4
2.1. KISMİ BOŞALMA	4
2.1.1. Kısmi Boşalmanın Tanımı	4
2.1.2. Kısmi Boşalma Sonucu Ortaya Çıkan Fiziksel Etkiler	6
2.1.3. Kısmi Boşalmanın Transformatörlere Verdiği Zararlar.....	9
2.1.4. Kısmi Boşalmanın Elektriksel Modeli	11
2.1.5. Kısmi Boşalma Ölçüm Yöntemleri.....	16
2.1.5.1. Elektriksel Yöntemler	16
2.1.5.2. Elektriksel Olmayan Yöntemler	22
2.2. NOKTASAL BİR KAYNAK İÇİN KONUM BELİRLEME YÖNTEMLERİ.....	25
2.2.1. Triangulation	25
2.2.2. Trilateration.....	26
2.2.3. Hiperbolik Konum Belirleme Yöntemi - Multilateration	28
3. MALZEME VE YÖNTEM	33
3.1. ELEKTROMANYETİK KISMİ BOŞALMA ALGILAYICISI TASARIMI	33
3.1.1. Bilgisayar Kullanılarak Yapılan Analizler.....	37
3.1.2. Algılayıcının Yapımı.....	61
3.2. YÜKSEK GERİLİM İLE KISMİ BOŞALMA OLUŞTURULMASI İÇİN DENEY DÜZENEGİ.....	64
3.2.1. Alan İntegrasyonu ile Kısmi Boşalma Değerinin Bulunması	67

3.3.	ELEKTROMANYETİK KISMİ BOŞALMA ALGILAYICI DENEY DÜZENİĞİ	69
3.4.	KISMİ BOŞALMA KAYNAĞININ KONUMUNUN ÜÇ BOYUTLU KESTİRİMİ	72
3.4.1.	Üç Boyutlu Hiperbolik Konum Kestirim Algoritmasının Geliştirilmesi ..	72
3.4.1.1.	<i>Enerji Seviyesi Yöntemi</i>	77
3.4.2.	Konum Belirleme İçin Laboratuvar Ortamında Kurulan Deney DüzenİĞİ.....	79
4.	BULGULAR	84
4.1.	ELEKTROMANYETİK KISMİ BOŞALMA ALGILAYICININ VECTOR NETWORK ANALYZER İLE ÖLÇÜM SONUÇLARI.....	85
4.2.	YÜKSEK GERİLİM İLE ÜRETİLEN KISMİ BOŞALMA İŞARETLERİNİ ALGILAMA SONUÇLARI	88
4.3.	KONUM BELİRLEME DENEYİ SONUÇLARI.....	106
5.	TARTIŞMA VE SONUÇ	128
	KAYNAKLAR	130
	ÖZGEÇMİŞ.....	137

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Kısmi boşalma türleri.	5
Şekil 2.2: 1995-2007 yılları arasında ortaya çıkan güç transformatörü arıza kaynakları.	9
Şekil 2.3: Kısmi boşalma nedeniyle transformatörlerde oluşan bozulmalar.	10
Şekil 2.4: Kısmi boşalmanın elektriksel modeli.	11
Şekil 2.5: Kısmi boşalma sonrası eşdeğer devre.	13
Şekil 2.6: Kuplaj kapasitesi eklenen ölçme devresi.	13
Şekil 2.7: C_k ve C_t için akım dalga şekilleri.	14
Şekil 2.8: Kısmi boşalmanın elektriksel ölçümü.	16
Şekil 2.9: Kısmi boşalma sonrası ölçüm devresinin eşdeğer modeli.	17
Şekil 2.10: Kısmi boşalma sonucu R direnci üzerinde oluşan gerilim.	18
Şekil 2.11: Kısmi boşalma ölçümü için Z_m 'nin iki farklı bağlantı yöntemi.	19
Şekil 2.12: Kısmi boşalma işareti (a) ve frekans spektrumu (b).	20
Şekil 2.13: Kısmi boşalmaya bağlı elde edilen örnek bir ϕ - q - n diyagramı.	21
Şekil 2.14: ϕ - q - n diyagramı ve faza bağlı görünür yük ilişkisi.	22
Şekil 2.15: Bir güç transformatöründen farklı tarihlerde alınan yağ örneğindeki gaz değişimi.	24
Şekil 2.16: Triangulation yöntemi.	25
Şekil 2.17: Trilateration yöntemi.	27
Şekil 2.18: Multilateration yöntemi ve zaman farklarına bağlı ortaya çıkan hiperbolik eğriler.	29
Şekil 2.19: İşaret kaynağı ve 3 adet algılayıcının 2 boyutlu uzayda gösterimi.	29
Şekil 3.1: Düzlemsel spiral geniş bantlı anten türleri.	34
Şekil 3.2: Karesel Arşimed düzlem spiral algılayıcı tasarımı.	36
Şekil 3.3: Metal kutu içine yerleştirilen düzlem spiral algılayıcı yapısının yanal kesiti.	37
Şekil 3.4: FEM analizi için tetrahedral elemanlar ile ağa bölünmüş örnek bir yapı.	38

Şekil 3.5: Gerçekleştirilen HFSS analizlerinde algılayıcı kol genişliğine bağlı modeller.....	40
Şekil 3.6: Metal kutu içine yerleşimin kesitine bağlı HFSS analiz parametreleri.	40
Şekil 3.7: Gerçekleştirilen HFSS analizlerinde dolgu malzemesi kalınlığına bağlı modeller.	41
Şekil 3.8: Analiz modelleri: $p = 10$ mm (sabit), $w = 1, 2, 3, 4, 5$ mm (değişken).	43
Şekil 3.9: Analiz modelleri: $w = 3$ mm (sabit), $p = 0, 5, 10, 15, 20$ mm (değişken).	44
Şekil 3.10: Yayınım deseni: $p = 10$ mm (sabit), $w = 1, 2, 3, 4, 5$ mm (değişken).	50
Şekil 3.11: Yayınım deseni: $w = 3$ mm (sabit), $p = 0, 5, 10, 15, 20$ mm (değişken).	51
Şekil 3.12: Yansıma kaybı: $p = 10$ mm (sabit), $w = 1, 2, 3, 4, 5$ mm (değişken).	52
Şekil 3.13: Yansıma kaybı: $w = 3$ mm (sabit), $p = 0, 5, 10, 15, 20$ mm (değişken).	53
Şekil 3.14: Duran dalga oranı: $p = 10$ mm (sabit), $w = 1, 2, 3, 4, 5$ mm (değişken).	54
Şekil 3.15: Duran dalga oranı: $w = 3$ mm (sabit), $p = 0, 5, 10, 15, 20$ mm (değişken).	55
Şekil 3.16: Kapı empedansı (gerçek bileşen): $p = 10$ mm (sabit), $w = 1, 2, 3, 4, 5$ mm (değişken).	56
Şekil 3.17: Kapı empedansı (gerçek bileşen): $w = 3$ mm (sabit), $p = 0, 5, 10, 15, 20$ mm (değişken).	57
Şekil 3.18: Kapı empedansı (sanal bileşen): $p = 10$ mm (sabit), $w = 1, 2, 3, 4, 5$ mm (değişken).	58
Şekil 3.19: Kapı empedansı (sanal bileşen): $w = 3$ mm (sabit), $p = 0, 5, 10, 15, 20$ mm (değişken).	59
Şekil 3.20: Seçilen analiz modeli: $w = 3$ mm , $p = 10$ mm.....	60
Şekil 3.21: Baskılı devre çizim programı (Eagle) ile yapılan algılayıcı tasarımı.	61
Şekil 3.22: Üretilen algılayıcı baskılı devresi (solda), SMA konnektörü montajı ile (sağda).	62
Şekil 3.23: Polistiren dolgu plakası (solda), Ferrit soğurma plakası (sağda).	62
Şekil 3.24: EM KB algılayıcı için tasarımı yapılan metal kutu.	63
Şekil 3.25: Üretilen EM KB algılayıcı metal kutusu.	63
Şekil 3.26: Yapım aşaması tamamlanan bir EM KB algılayıcı.	64
Şekil 3.27: Yüksek gerilim altında kısmi boşalma oluşturma düzeneği.	65
Şekil 3.28: Kısmi boşalma oluşturma ve ölçme düzeneğinin bileşenleri.	66
Şekil 3.29: Deney düzeneği ile kayıt edilen yüksek gerilim işareti ve kısmi boşalma darbeleri.	67

Şekil 3.30: Deney düzeneği ile kayıt edilen örnek bir kısmi boşalma darbesi.	68
Şekil 3.31: Zamana bağlı olarak değişen bir darbe işareti için alan integrasyonu.....	68
Şekil 3.32: Kısmi boşalma ile oluşan elektromanyetik dalga yayılımını yakalama düzeneği.	70
Şekil 3.33: Ölçümlerde kullanılan YF kuvvetlendirici.	70
Şekil 3.34: Laboratuvar ortamında kurulan deney düzeneği.	71
Şekil 3.35: Algılama performans testi için kullanılan FRS cihazı.....	72
Şekil 3.36: KB kaynağı ve 4 adet EM KB algılayıcının 3 boyutlu uzayda gösterimi.	73
Şekil 3.37: KB kaynağı konum kestirimi için geliştirilen algoritma.	76
Şekil 3.38: 4 adet EM KB algılayıcı ile yakalanan örnek bir EM KB işareti.	77
Şekil 3.39: Örnek EM KB işareti için toplam enerji eğrileri ve bulunan enerji aşım seviyeleri.....	78
Şekil 3.40: Konum belirleme için laboratuvar ortamında kurulan deney düzeneği.	79
Şekil 3.41: EM KB işareti benzetimcisi.	80
Şekil 3.42: Üçayak üzerine yerleştirilmiş, YF kuvvetlendirici bağlı bir EM KB algılayıcı.	81
Şekil 3.43: EM KB algılayıcıların çıkışlarında kullanılan YF kuvvetlendirici ve kazanç eğrisi.	82
Şekil 3.44: Ölçümlerde kullanılan 4-kanallı osiloskop ve Matlab ile işaret işleme.	82
Şekil 4.1: Vector Network Analyzer ile EM KB algılayıcısının ölçümü.	85
Şekil 4.2: Yansıma kaybı parametresinin benzetim ve ölçüm karşılaştırması.	86
Şekil 4.3: Duran dalga oranı parametresinin benzetim ve ölçüm karşılaştırması.....	87
Şekil 4.4: EM KB algılayıcı ile yakalanan işaret (“Field Reference Source” tarafından yayılan).	89
Şekil 4.5: “Field Reference Source” cihazının TÜBİTAK UME EMC Laboratuvarında ölçümü.	89
Şekil 4.6: R_m ölçüm direnci üzerindeki işaret (hesaplanan KB seviyesi: 77.5 pC).....	91
Şekil 4.7: EM KB algılayıcı ile yakalanan işaret (77.5 pC için).	91
Şekil 4.8: R_m ölçüm direnci üzerindeki işaret (hesaplanan KB seviyesi: 92.1 pC).....	92
Şekil 4.9: EM KB algılayıcı ile yakalanan işaret (92.1 pC için).	92
Şekil 4.10: R_m ölçüm direnci üzerindeki işaret (hesaplanan KB seviyesi: 104.5 pC).....	93
Şekil 4.11: EM KB algılayıcı ile yakalanan işaret (104.5 pC için).	93

Şekil 4.12: R_m ölçüm direnci üzerindeki işaret (hesaplanan KB seviyesi: 131.8 pC).....	94
Şekil 4.13: EM KB algılayıcı ile yakalanan işaret (131.8 pC için).	94
Şekil 4.14: R_m ölçüm direnci üzerindeki işaret (hesaplanan KB seviyesi: 143.4 pC).....	95
Şekil 4.15: EM KB algılayıcı ile yakalanan işaret (143.4 pC için).	95
Şekil 4.16: R_m ölçüm direnci üzerindeki işaret (hesaplanan KB seviyesi: 215.2 pC).....	96
Şekil 4.17: EM KB algılayıcı ile yakalanan işaret (215.2 pC için).	96
Şekil 4.18: R_m ölçüm direnci üzerindeki işaret (hesaplanan KB seviyesi: 1643.1 pC).....	97
Şekil 4.19: EM KB algılayıcı ile yakalanan işaret (1643.1 pC için).	97
Şekil 4.20: R_m ölçüm direnci üzerindeki işaret (hesaplanan KB seviyesi: 2390.7 pC).....	98
Şekil 4.21: EM KB algılayıcı ile yakalanan işaret (2390.7 pC için).	98
Şekil 4.22: Sivri uç - düzlem elektrot düzeneğinin pozitif ve negatif periyotlardaki davranışı.....	99
Şekil 4.23: R_m ölçüm direnci üzerindeki işaretler (negatif KB darbeleri, zaman domeni).	101
Şekil 4.24: R_m ölçüm direnci üzerindeki işaretler (negatif ve pozitif KB darbeleri, zaman domeni).....	101
Şekil 4.25: R_m ölçüm direnci üzerindeki işaretler (negatif KB darbeleri, frekans domeni).....	102
Şekil 4.26: R_m ölçüm direnci üzerindeki işaretler (negatif ve pozitif KB darbeleri, frekans domeni).....	102
Şekil 4.27: EM KB algılayıcı ile yakalanan işaretler (negatif KB darbeleri, zaman domeni)...	103
Şekil 4.28: EM KB algılayıcı ile yakalanan işaretler (negatif ve pozitif KB darbeleri, zaman domeni).....	103
Şekil 4.29: EM KB algılayıcı ile yakalanan işaretler (negatif KB darbeleri, frekans domeni).	104
Şekil 4.30: EM KB algılayıcı ile yakalanan işaretler (negatif ve pozitif KB darbeleri, frekans domeni).....	104
Şekil 4.31: KB seviyesi ile EM KB işaretlerinin toplam enerjisi arasındaki ilişki.....	105
Şekil 4.32: EM KB algılayıcı ile alınan işaret (EM KB benzetimcisi tarafından yayılan).	106
Şekil 4.33: Konum belirleme deneyi için tanımlanan 160 adet ölçüm noktası.	107
Şekil 4.34: Toplam enerji aşma seviyesi: %0.5 – %5 aralığı için elde edilen başarımların puanı....	108
Şekil 4.35: Toplam enerji aşma seviyesi: %1 – %2 aralığı için elde edilen başarımların puanı.	109
Şekil 4.36: 1 - 9 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.....	110

Şekil 4.37: 10 - 18 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.....	111
Şekil 4.38: 19 - 27 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.....	112
Şekil 4.39: 28 - 36 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.....	113
Şekil 4.40: 37 - 45 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.....	114
Şekil 4.41: 46 - 54 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.....	115
Şekil 4.42: 55 - 63 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.....	116
Şekil 4.43: 64 - 72 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.....	117
Şekil 4.44: 73 - 81 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.....	118
Şekil 4.45: 82 - 90 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.....	119
Şekil 4.46: 91 - 99 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.....	120
Şekil 4.47: 100 - 108 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.....	121
Şekil 4.48: 109 - 117 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.....	122
Şekil 4.49: 118 - 126 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.....	123
Şekil 4.50: 127 - 135 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.....	124
Şekil 4.51: 136 - 144 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.....	125
Şekil 4.52: 145 - 153 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.....	126
Şekil 4.53: 154 - 160 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.....	127

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1: Güç transformatörleri için kısmi boşalma seviyesi sınıflandırması.....	10
Tablo 2.2: Akustik basınç dalgasının farklı malzemelerdeki davranışı.	23
Tablo 2.3: Kısmi boşalma sonucu yağda en çok gözlenen çözünmüş gazlar.....	24
Tablo 3.1: HFSS analizleri sonucu anten parametreleri: $p = 10$ mm (sabit), $w = 1, 2, 3, 4, 5$ mm (değişken).	48
Tablo 3.2: HFSS analizleri sonucu anten parametreleri: $w = 3$ mm (sabit), $p = 0, 5, 10, 15, 20$ mm (değişken).	49
Tablo 3.3: EM KB algılayıcıların yerleşim koordinatları.	80
Tablo 4.1: Yansıma kaybı parametresinin benzetim ve ölçüm karşılaştırması.	86
Tablo 4.2: Duran dalga oranı parametresinin benzetim ve ölçüm karşılaştırması.	86
Tablo 4.3: KB seviyeleri ve oluşan EM KB işaretlerinin toplam enerjisi.....	105

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
ϕ	: Faz açısı
λ	: Dalga boyu
v	: Hız
τ	: Zaman sabiti
ω	: Açısal frekans
c	: Işık hızı
e	: Yayınım verimliliği
f	: Frekans
h	: Planck sabiti
i	: Elektrik akımı
n	: Konum numarası
q	: Elektriksel yük
t	: Zaman
C	: Kapasite
D	: Yönlülük
E	: Toplam enerji
G	: Kazanç
P	: Güç
R	: Direnç
S_{HKn}	: Hata kübü içinde bulunan konum sayısı
S_{TFn}	: Hata kübü dışında, transformatör içinde bulunan konum sayısı
U	: Yayınım yoğunluğu
V	: Gerilim
W	: Anlık enerji
Z	: Empedans

Kısaltmalar	Açıklama
ADC	: Analog to digital converter
AMD	: Advanced Micro Devices
BNC	: Bayonet Neill Concelman
BP	: Başarım puanı
DGA	: Dissolved gas analysis
EM	: Elektromanyetik
EMC	: Elektromagnetic compatibility
EMI	: Elektromagnetic interference
FEM	: Finite element method
FR	: Flame retardant
FRS	: Field reference source

GPIB	: General purpose interface bus
GPS	: Global positioning system
HFSS	: High frequency structural simulator
IEC	: International Electrotechnical Commission
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
KB	: Kısmi boşalma
PC	: Personal computer
PCB	: Printed circuit board
PPM	: Parts per million
RAM	: Random access memory
RF	: Radio frequency
RL	: Return loss
RMS	: Root mean square
SI	: International system of units
SMA	: Subminiature version a
TDOA	: Time difference of arrival
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
UME	: Ulusal Metroloji Enstitüsü
VNA	: Vector network analyzer
VSWR	: Voltage standing wave ratio
YF	: Yüksek frekans
YG	: Yüksek gerilim

ÖZET

DOKTORA TEZİ

TRANSFORMATÖRLERDE KİSMİ BOŞALMANIN ÖLÇÜMÜ VE KONUMUNUN BELİRLENMESİ İÇİN YENİ BİR YÖNTEM GELİŞTİRİLMESİ

Kaan GÜLNİHAR

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mukden UĞUR

Bu tezin amacı, transformatörlerde ortaya çıkabilen ve bozucu etkilere sahip olan kısmi boşalmaların ölçümü ve konumunun tesbiti için yeni bir yöntem ortaya koymaktır. İlk olarak kısmi boşalmanın tanımı ve fiziksel etkileri detaylı olarak verilmiştir. Daha sonra literatürde mevcut kısmi boşalma ölçüm yöntemleri ve noktasal bir işaret kaynağı için konum belirleme yöntemleri incelenmiştir.

Tezin devamında, kısmi boşalma sonucu ortaya çıkan elektromanyetik dalga yayılımının algılanması için özel bir algılayıcının tasarımı ve yapımı gerçekleştirilmiştir. Yapımı gerçekleştirilen elektromanyetik kısmi boşalma algılayıcı kullanılarak, laboratuvar ortamında kontrollü bir şekilde üretilen kısmi boşalma işaretlerine bağlı olarak ortaya çıkan elektromanyetik dalga yayılımının tesbiti ve ölçümü üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Tezin bir sonraki aşamasında, kısmi boşalma kaynağının konumunun tesbiti için üç boyutlu konum kestirim algoritması geliştirilmiş ve dört adet algılayıcı kullanılarak kısmi boşalma kaynağının konumunun kestirimi için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Geliştirilen algılayıcı ve konum kestirim algoritmasının başarımları analiz edilmiştir.

Haziran 2017, 138 sayfa.

Anahtar kelimeler: Kısmi boşalma, elektromanyetik algılama, konum belirleme.

SUMMARY

Ph.D. THESIS

DEVELOPING A NOVEL METHOD FOR PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENT AND LOCATION IN TRANSFORMERS

Kaan GÜLNIHAR

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Science and Engineering

Department of Electrical and Electronic Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Mukden UĞUR

The main objective of this thesis is to define a new method which is able to measure and predict the location of partial discharges having harmful effects in transformers. Initially, definition and physical effects of partial discharges are given in detail. Then, current measurement techniques of partial discharges and current location techniques of point sources in literature are examined.

Afterwards, design and realization of a special detecting device which is able to sense of the electromagnetic waves propagating from partial discharge source are implemented. Experimental works are also performed to detect and measure of the electromagnetic propagation from partial discharges which are generated in a controlled manner in a laboratory environment by using developed electromagnetic partial discharge sensor.

A three dimensional location estimation algorithm for detecting the partial discharge source location is developed at the next stage of the thesis. Experimental works are also completed to estimate the location of partial discharge source by using four electromagnetic partial discharge sensors in a laboratory environment. Performance of the developed sensor and location estimation algorithm are analyzed.

June 2017, 138 pages.

Keywords: Partial discharge, electromagnetic detection, source location.

1. GİRİŞ

Kısmi boşalma (KB) elektrik enerjisinin üretiminde ve dağıtımında kullanılan transformatör, jeneratör, yüksek gerilim (YG) kabloları gibi sistemlerde gözlenen ve bozucu etkilere sahip oldukça zararlı bir oluşumdur. Bu nedenle üzerinde önemle durulan ve uzun yıllardır çalışılan bir konudur.

KB nedeniyle ortaya çıkan problemlerin gözlenmesi çok eski tarihlere dayanmaktadır. Fessenden [1] tarafından 1898 yılında yapılan deneysel çalışmalar, katı yalıtkanlar içindeki olası hava boşluklarının yalıtım açısından tehlikeli olabileceğini göstermiştir. 1903 yılında Perrine [2] yayınladığı çalışmasında, kablo izolasyonlarında meydana gelen problemlerin kaynağının bazen yalıtım malzemesi içindeki gaz dolu boşluklardan kaynaklandığını belirtmiştir. Gerek KB'nin gerekse tam boşalmanın temeli ile ilgili önemli bir çalışma Townsend [3] tarafından 1904 yılında sunulmuştur. Bu çalışmada, elektrik alan altında ivmelenerek belirli bir hıza ulaşan serbest iyonların çarpışması sonucu, dış yörüngelerindeki mevcut elektronlardan kopmalar olduğunu ve ortaya serbest elektronların ve yeni iyonize olmuş atomların çıktığını belirtmiştir.

1912 yılında Petersen [4], bağıl dielektrik katsayısı k olan bir yalıtım malzemesi içinde mevcut olan hava boşluklarının, yalıtım malzemesinin maruz kaldığı elektriksel zorlanmanın k katı kadar zorlanmaya maruz kalacağını göstermiş ve bu sebeple hava boşlukları içinde iyonizasyonun göreceli olarak çok daha düşük gerilim seviyelerinde olabileceğini belirtmiştir. 1915 yılında Peek [5] tarafından yapılan çalışmada, gazlarda gözlenen korona türündeki KB'lere benzer olayların yağ gibi sıvı yalıtkanlarda da gözlenebildiği belirtilmiştir. Yağ moleküllerinin bozunmaya uğrayarak çözünmüş gazların ortaya çıkışı ve bu gazlarda iyonizasyonun başlaması anlatılmıştır. Transformatör yağlarının elektriksel dayanımının nem ile bağlantısı da bu çalışmada ortaya konmuştur. 1919 yılında Dubsky [6], iki cam plaka arasındaki ince hava tabakasının elektriksel dayanımını ölçmüş ve elde ettiği sonuçlardan katı yalıtkanlardaki boşluklarda KB oluşumunun koşullarını göstermiştir.

Yapılan bu tür çalışmalar sonrasında yalıtım malzemesinin içine adeta hapsolmuş olan bu boşalma türünün ölçümü ve YG altında çalışan sistemlerde ortaya çıkan KB'lerin takibi önem kazanmıştır. Bunun sonucu olarak 1968 yılında KB ile ilgili uluslararası standart IEC 270'in ilk versiyonu yayınlanmıştır. 1981 yılında revizyonu yapılan standardın günümüzde halen aktif olan ve 2000 yılında yayınlanan üçüncü versiyonu IEC 60270:2000 kullanılmaktadır [7].

Elektrik enerjisinin iletiminde güç transformatörleri önemli bir yer tutmaktadır. KB'nin özellikle güç transformatörleri gibi büyük ve pahalı sistemlerin arızalanmasına ve servis ömrünün kısalmasına sebep olduğu bilinmektedir [8, 9]. Örnek olarak 380 kV/800 MVA gücündeki bir güç transformatörünün yaklaşık maliyeti 5.000.000\$ mertebesinde-dir. Ayrıca, arıza kaynaklı olarak ortaya çıkan enerji kesintilerinin gündelik hayata maddi etkisi de göz ardı edilemez boyutlardadır. Elektrik iletim ve dağıtım istasyonlarına yapılan yatırımın büyük kısmını güç transformatörlerinin oluşturduğu göz önüne alınırsa, transformatörlerde KB'lerin oluşumunun takip edilmesi, gerçek zamanlı olarak konumunun ve büyüklüğünün tesbit edilmesi, hem transformatörlerin korunması hem de enerji sisteminin sürekliliği açısından büyük önem taşımaktadır.

Üretimi tamamlanan bir güç transformatörünün ilgili tüm standartlara göre laboratuvar ortamında testleri yapılır. Genelde transformatörü talep eden müşterinin gözetiminde yapılan bu ölçümlere kabul testleri adı verilir [9]. Günümüzdeki mevcut sistem ve teknikler kullanılarak bir transformatörün kabul testleri sırasında IEC 60270'e göre KB seviyesi ölçülebilmektedir. Ancak bu ölçümler sadece KB'nin büyüklüğünü belirlemede, transformatör içindeki oluşum noktasının koordinatları tesbit edilememektedir [7, 10]. Geliştirilmiş olan akustik ölçüm yöntemleri ile belirli koşullarda sonuç alınabilmektedir fakat şebeke frekanslı çalışmaya bağlı olarak ortaya çıkan gövde, sargı, nüve titreşimleri ve yağ sirkülasyon pompalarının yarattığı akustik titreşimler bu tekniğin başarısını oldukça düşürmektedir [9, 11, 12]. Bunun dışında, nakliyesi yapılan ve kullanıma alınan yük altındaki (çalışmakta olan) transformatörde oluşan KB'lerin büyüklüğünün ve konumunun tesbiti zor bir işlemdir, çünkü transformatör enerji altındadır.

KB sonucunda bazı ölçülebilir fiziksel etkiler ortaya çıkmaktadır. Bu etkiler içinde en temel olanı ve ölçüm için kullanılanı elektriksel etkidir. Yüksek elektrik alanının ve bu alana bağlı olarak mevcut gaz boşluğu, yapısal bozukluk gibi noktalarda ortaya çıkan elektron ve iyon hareketlerinin kaynağı elbette elektriksel olacaktır. Dolayısı ile bu elektriksel kaynaktan çekilen akım üzerinde, oluşan KB'lerin mutlaka gözlenebilir bir etkisi olmalıdır. IEC 60270 standardı özetle bu fiziksel etkiye dayalı bir ölçüm yöntemini tanımlar [7, 13]. Elektriksel yükün SI birimi olan coulomb ile bağlantının kurulduğu ve günümüzde halen geçerli olan tek ölçüm yöntemidir.

Yukarıda belirtildiği gibi KB sonucu ortaya çıkan tek ölçülebilir fiziksel etki elektriksel değildir. Bunun yanında; ses, ısı, ışık, elektromanyetik (EM) yayılım gibi başka fiziksel etkiler de gözlemlenebilmektedir [14-16]. Bu tez çalışmasının kapsamı, KB'nin EM yayılım etkisi ve bu etkinin kullanımı ile güç transformatörlerinde KB'nin ölçümü ve konumunun belirlenmesi üzerinedir. Ayrıca, KB'nin ortaya çıkarttığı EM yayılım üzerinden coulomb birimi ile bir bağlantının kurulması da hedeflenmiştir. Bu amaçla öncelikle KB sonucu ortaya çıkan EM dalga yayılımını tesbit etmek için özel bir algılayıcının tasarımı, yapımı, testleri ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Yapımı gerçekleştirilen bu algılayıcı kullanılarak, YG altındaki elektrotlar arasında oluşturulan gerçek KB'lerin EM etkileri laboratuvar ortamında incelenmiş ve bazı sonuçlara ulaşılmıştır.

Tez çalışmasının devamında, yapımı gerçekleştirilen algılayıcılar kullanılarak KB'nin konumunun nasıl tesbit edilebileceği üzerine çalışılmıştır. Bu amaçla literatürdeki mevcut konum belirleme teknikleri incelenmiştir. Başka alanlarda uygulaması olan hiperbolik konum belirleme yöntemi (multilateration) ile, zaman farklarının bulunması için tez çalışması kapsamında geliştirilen enerji seviyesi yöntemi kullanılarak KB kaynağının konumunun belirlenmesi konusunda başarılı sonuçlar alınmıştır. Ortaya çıkan ölçüm yönteminde dört adet algılayıcının kullanılması yeterlidir. Yöntemin bir diğer avantajı ise, YG altındaki aktif devrelere herhangi bir bağlantı yapılması ihtiyacının olmamasıdır.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. KISMİ BOŞALMA

2.1.1. Kısmi Boşalmanın Tanımı

KB, iletkenler arasında yer alan yalıtım malzemeleri içinde ve sınırlı bir bölgede meydana gelen, iletkenler ile temas halinde olabilen ya da olmayabilen elektriksel boşalmalardır [7]. İlgili uluslararası IEC standardında verilen bu tanım, KB olayını genel hatları ile açıklamaktadır. Diğer bir tanımla KB, sınırlı bir bölgede oluşan elektrik alanının meydana getirdiği yük birikmesi sonucu, buna bağlı ani enerji salımlarıdır. Bu olayda tam bir elektriksel delinme gözlenmemekle birlikte, YG altındaki yalıtım malzemelerinin yıpranmasına ve uzun süreçte delinmesine neden olabilmektedir [11, 14].

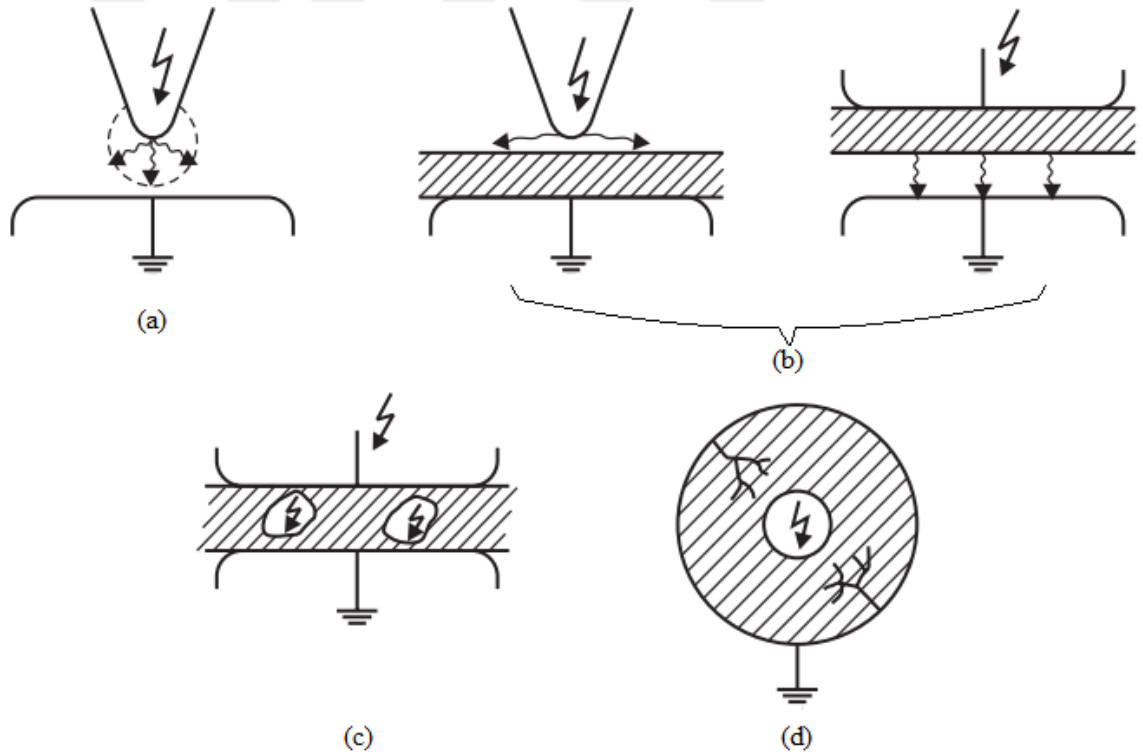
YG altında çalışan tüm sistemlerde, ortaya çıkan elektrik alanının da yüksek değerlerde olacağı öngörülebilir. Yüksek değerde elektrik alanının olduğu bir bölgedeki yalıtkan malzemenin elektriksel olarak zorlanacağı da kesindir. Elektromekanik cihazların üretim ve kullanım sürecinde yaşanan hatalar sonucunda, yalıtım amaçlı malzemelerde fiziksel kusurlar ortaya çıkabilmektedir. Kusurlu üretilen ya da sonradan kusur oluşan noktalarda yüksek elektrik alanına bağlı olarak elektrik yükü birikir [15, 16]. Oluşan bu yükler, rastgele değişkenlere bağlı olarak ani enerji salımları yapar.

KB, YG ile çalışan cihaz, eleman ve sistemlerin tümünde kullanılmakta olan yalıtım malzemelerinde, sınırlı bölgede oluşmak ve iletkenler arası devreyi tamamlamamak koşulu ile görülebilir [11]. İletkenler arasında devrenin tamamlandığı durumda, KB'den tam boşalma durumuna geçilmesi söz konusudur.

KB'nin oluşabileceği yalıtım malzemesi katı, sıvı, gaz veya bunların kombinasyonu şeklinde bir yapıda olabilir. Yalıtım sisteminin ve YG altındaki iletkenlerin şekil, yerleşim gibi özelliklerine bağlı olarak dört farklı şekilde KB oluşumu gözlenebilir [15]. Şekil 2.1'de bu oluşum türleri verilmiştir. Bunlar;

- (a) Gaz yalıtımlı sistemlerde YG altındaki iletkenlerin sivri, keskin bölgelerinde oluşan, düzgün olmayan elektrik alan dağılımı sonucu gözlenebilen korona tipi KB oluşumları,
- (b) Yalıtım malzemelerinin yüzeylerinde ve farklı türde yalıtım malzemelerinin (katı-katı, katı-gaz gibi) birleşim bölgelerinde gözlenebilen KB oluşumları,
- (c) Katı ya da gaz yalıtım malzemelerinin içindeki boşluklarda gözlenebilen KB oluşumları,
- (d) Katı yalıtım malzemelerinin sivri iletken noktaları ile sürekli düzgün olmayan elektrik alan dağılımına maruz kalması sonucu oluşan KB ve buna bağlı boşalma kanalları ile ağaçlanma oluşumları,

şeklinde özetlenebilir.



Şekil 2.1: Kısmi boşalma türleri.

KB'nin tanımlanmasında elektrik yükünün SI birimi olan coulomb kullanılır ve $1C = 6.24151 \times 10^{18}$ adet elektron yüküne eşittir [14]. Bu değer çok büyük olup gerçek uygulamalarda picocoulomb ($1 \text{ pC} = 10^{-12} \text{ C}$) kullanılır. Bu da 6,241,510 adet elektron yüküne eşittir.

2.1.2. Kısmi Boşalma Sonucu Ortaya Çıkan Fiziksel Etkiler

Yüksek elektrik alan altında zorlanan yalıtım malzemesinin belirli bir noktasında oluşan elektriksel yük birikimi, ani enerji salımları ile akım darbeleri oluşturmakta ve KB ortaya çıkmaktadır. Bu darbelerin süreleri genellikle 1 μ s'nin altındadır [17-19]. Fiziksel olarak bakıldığında bu süreçte, enerji bir noktadan başka bir noktaya aktarılmakta ve aynı zamanda enerji form değiştirmektedir. Oluşan fiziksel etkiler;

- elektriksel akım darbeleri,
- dielektrik kayıpları,
- elektromanyetik yayılım,
- ses (akustik),
- ısı,
- ışık,
- kimyasal reaksiyonlar (gaz),

şeklinde sıralanabilir [9, 10, 14, 16, 20].

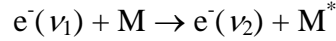
KB sonucunda ortaya enerji kazanmış serbest elektronlar, pozitif ve negatif yüklü iyonlar ve fotonlar çıkmaktadır. Bu serbest parçacıklar boşalma kanalının sonundaki yüzeye çarptığında (bu yüzey, parçacığın yüküne göre kanalın iki tarafından biridir) yüzeyde moleküler düzeyde bozunmaya neden olmaktadır. Çünkü herhangi bir türdeki serbest parçacık (elektron, foton ya da iyon), yalıtım malzemesinin yapısını oluşturan moleküler bağları koparacak enerji düzeyine erişebilir. Bu bağ kopması ile yeni serbest parçacıklar oluşabilir [14].

Boşalma kanalının sonunda yüzeye çarpan pozitif ya da negatif yüklü iyon ile etkileşim iki şekilde olabilmektedir [14]. Bunlar; yalıtım malzemesinin yüzeyindeki moleküllerin en dış yörüngesindeki elektronlar ile elektronik etkileşim ya da malzemenin yüzeyindeki kafes yapısında mevcut iyonlar ile sıkı (mekanik) etkileşim şeklindedir.

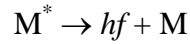
Bir serbest elektronun yalıtım malzemesinin moleküllerine çarpması sonucu ortaya çıkacak etkileşim, elektronun enerjisine ve yüzeyi oluşturan moleküler yapının durumuna bağlıdır [14].

Yüksek enerjili bir elektronun nötr durumdaki (yükülü olmayan) moleküllerine çarpması sonucunda dört farklı etkileşim ortaya çıkabilir [14]:

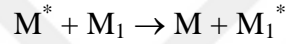
- (i) v_1 hızındaki bir elektron, M molekülü ile çarpıştığında kinetik enerjisinin bir kısmını moleküle aktarır fakat moleküle eklenmez, daha düşük v_2 hızı ile hareketine devam eder;



uyarılan (ekstra enerji kazanan) molekül M^* bir foton yayar (f : ışınım frekansı, h : Planck sabiti);



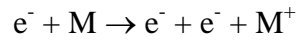
ya da enerjisini başka bir molekül ile çarpışarak kaybeder;



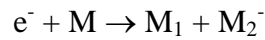
- (ii) Bir elektron bir molekül ile çarpışır ve eklenerek negatif iyon oluşturur;



- (iii) Yeterli enerjiye sahip bir elektron bir molekül ile çarpışır ve bir elektron kopararak sistemdeki serbest elektron sayısını artırır ve bir pozitif iyon oluşturur;

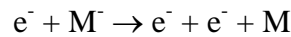


- (iv) Bir elektron bir moleküle çarpışarak ona eklenir ve ayrılmaya neden olarak yükülü ve nötr iki ayrı alt tür molekül oluşturur;

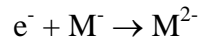


Benzer şekilde, bir elektronun nötr olmayan bir molekül ile (pozitif ya da negatif iyon) çarpışması sonucunda üç farklı etkileşim ortaya çıkabilir [14]:

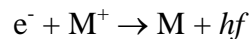
- (i) Bir elektron bir negatif iyon ile çarpışır bir elektron kopararak sistemdeki serbest elektron sayısını artırır ve bir nötr molekül oluşturur;



- (ii) Bir elektron bir negatif iyon ile çarpışır ve eklenerek negatif yükünü artırır;

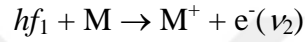
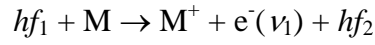


- (iii) Bir elektron bir pozitif iyon ile çarpışır ve eklenerek onu nötr hale getirirken olası bir artan enerji ile foton yayımlanır;

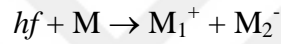


Yüksek enerjili bir elektron için geçerli olan bu çarpışma türlerine benzer olarak bir fotonun bir nötr molekül ile çarpışması sonucunda dört farklı etkileşim ortaya çıkabilir [14]:

- (i) Bir foton bir molekül ile çarpışır ve oluşan enerji transferi molekülden elektron kopararak fotoiyonizasyona neden olur. Fotonun enerjisi iyonizasyon enerjisinden yüksek olduğu durumda aradaki enerji farkı, serbest elektrona ek olarak, daha az enerjili bir foton yayımına neden olur. Diğer bir ihtimal de kopan elektronun kinetik enerjisinde artış ortaya çıkar;



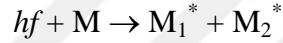
- (ii) Molekül iki ayrı iyon türüne ayrılır;



- (iii) Molekül nötr ve iyonik iki ayrı alt türüne ve bir serbest elektrona ayrılır;

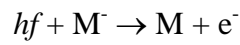


- (iv) Molekül uyarılmış alt türlere ayrılır;

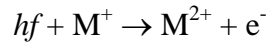


Benzer şekilde, bir fotonun nötr olmayan bir molekül ile (pozitif ya da negatif iyon) çarpışması sonucunda dört farklı etkileşim ortaya çıkabilir [14]:

- (i) Çarpışma sonucu negatif iyondan elektron kopar ve serbest hale gelir, molekül ise nötr hale dönüşür;



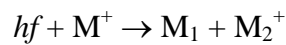
- (ii) Çarpışma sonucu pozitif iyondan elektron kopar ve serbest hale gelir, iyonun pozitifliği artar;



- (iii) Çarpışma sonucu negatif iyon nötr ve yüklü alt türlere dönüşür;



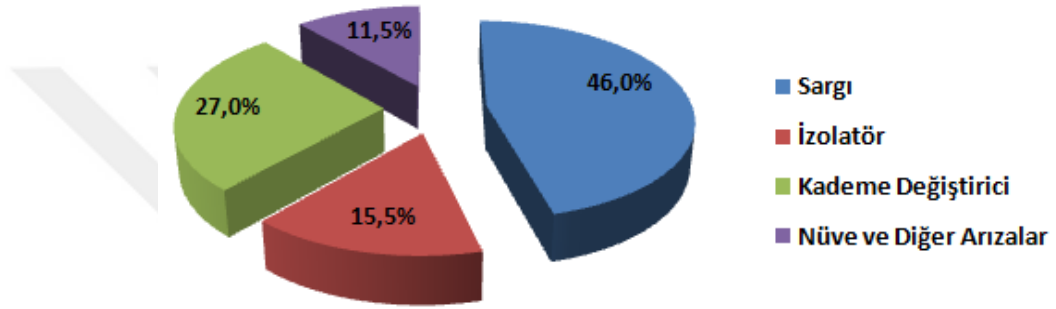
- (iv) Çarpışma sonucu pozitif iyon nötr ve yüklü alt türlere dönüşür;



KB esnasında, yukarıda verilen bütün etkileşim ihtimalleri; elektron, foton, iyon ve moleküllerin enerjilerine bağlı olarak kaotik bir şekilde meydana gelir.

2.1.3. Kısmi Boşalmanın Transformatörlere Verdiği Zararlar

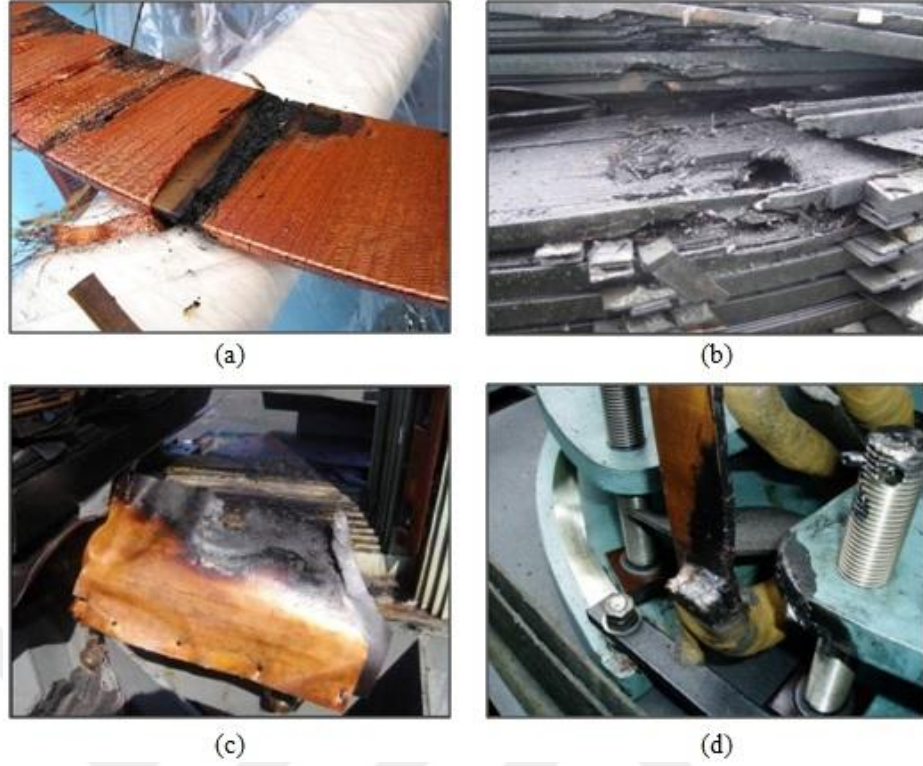
Elektrik enerjisinin dağıtımında güç transformatörleri önemli bir yer tutmaktadır. Dağıtım şebekesine yapılan yatırımın önemli bir kısmı güç transformatörlerine harcanmaktadır [9, 21]. Gerek ülkemizde gerekse diğer ülkelerde her yıl güç transformatörü arızaları ile karşılaşmakta ve ortaya çıkan mali tablo çok yüksek rakamlara ulaşmaktadır. Şekil 2.2’de 1995 ile 2007 yılları arasında ülkemizde arızalanan toplam 240 adet güç transformatörünün arıza kaynakları istatistiği görülmektedir [22].



Şekil 2.2: 1995-2007 yılları arasında ortaya çıkan güç transformatörü arıza kaynakları.

KB'nin bozucu etkileri genellikle uzun süreler sonra (birkaç yıl) ortaya çıkar. Yavaş yavaş artan bu etkilerin geri alınabilmesi söz konusu değildir [11, 21]. Bu nedenle sürekli ölçümlerle takip edilmesi gerekmektedir. Şekil 2.3’de transformatörlerde görülen KB kaynaklı bozulmalara örnekler görülmektedir [23]. (a) ve (b)’de sargılarda oluşmuş KB kaynaklı arızalar, (c)’de bakır bir bağlantı hattında gözlenen bozulma ve (d)’de sargı bağlantı ucunda oluşmuş KB sonucu bozulma gösterilmiştir.

KB sürekli artış eğiliminde olan fiziksel bir olaydır. Belirli bir U_n geriliminde q seviyesinde KB gözleendiği durumda, U_n gerilimi sabit tutulsa bile yalıtım malzemesinin bozulmasından ötürü KB seviyesinde uzun vadede artış olacaktır [11, 24]. Fakat bu artışın hızı; U_n geriliminin seviyesine, malzemenin türüne, ortam koşullarına (sıcaklık, nem, basınç) ve daha birçok etkene bağlıdır [14, 25].



Şekil 2.3: Kısmi boşalma nedeniyle transformatörlerde oluşan bozulmalar.

Yukarıda da ifade edildiği gibi KB olayı ile ilgili olarak oluşan yalıtım bozulmaları çok yavaş ilerleyen uzun bir sürecin sonunda gerçekleşmektedir. Belirli bir düzeyden sonra elektron hareketleri çığ gibi büyüyecek ve tam boşalma olayı ile malzemenin delinmesi söz konusu olacaktır. Transformatörlerde yalıtım malzemelerinin delinmesi ile yanma, patlama gibi istenmeyen sonuçlar ortaya çıkmaktadır. İşletme güvencesi ve ömür yönünden transformatörün KB'siz olması gereklidir [21].

Tablo 2.1: Güç transformatörleri için kısmi boşalma seviyesi sınıflandırması.

Sınıf	Kısmi boşalma seviyesi (pC)
Düşük seviye (bozulmasız)	10 – 100
Bozulma başlangıcı	< 500
Geri alınmaz düzeyde bozulma	1000 – 3000
İzolasyon yağının delinmesi	10000 - 100000

Üretimi gerçekleştirilen bir güç transformatörünün KB testlerinde başarılı olma kriteri; ölçülen KB seviyesinin $1.3U_m$ geriliminde 300 pC, $1.1U_m$ geriliminde ise 100 pC'yi aşmamasıdır [26]. Burada U_m transformatörün fazlar arası izin verilen en yüksek işletme gerilimini ifade etmektedir. Devreye alınıp çalışma hayatına başlayan bir güç

transformatörü için KB seviyelerinin sınıflandırması da yapılmıştır. Bu seviyeler Tablo 2.1’de görülmektedir [21].

2.1.4. Kısmi Boşalmanın Elektriksel Modeli

Şekil 2.4 (a)’da görüldüğü üzere içinde gaz dolu boşluk bulunan ve bağıl dielektrik katsayısı ϵ_r olan katı yalıtım malzemesinin üstünde ve altında elektrotlar yer aldığı bir durumda, bu yapıya gerilim uygulandığında gaz dolu boşluktaki elektriksel zorlanma, katı yalıtım malzemesinin diğer kısımlarındaki zorlanmanın ϵ_r ile çarpımı kadar fazla olacaktır [27]. Böyle bir deney nesnesindeki elektrik alan dağılımı kısmi kapasitanslar ile modellenebilir [11, 13, 15-17]. Boşluk kısmının kapasitesi C_c ile, elektrotlar ile boşluk arasındaki kapasiteler C_{b1} ve C_{b2} ile gösterilebilir. İki elektrot arasında ve boşluktan geçmeyen kapasiteler ise C_{a1} ve C_{a2} ile gösterilebilir. Bu durumda;

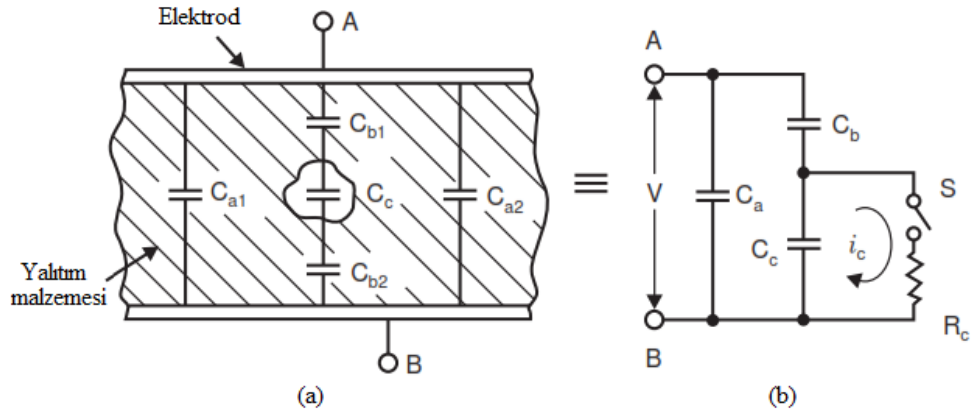
$$C_a = C_{a1} + C_{a2} \quad (2.1)$$

$$C_b = \frac{C_{b1}C_{b2}}{C_{b1}+C_{b2}} \quad (2.2)$$

olmaktadır. Gerçek sistemlerdeki geometrik boyutlar ve yapıların şekli nedeniyle bu kapasitansların arasında;

$$C_a \gg C_c \gg C_b \quad (2.3)$$

şeklinde bir eşitsizlik bulunmaktadır.



Şekil 2.4: Kısmi boşalmanın elektriksel modeli.
(a) içinde boşluk olan yalıtım (b) eşdeğer devre.

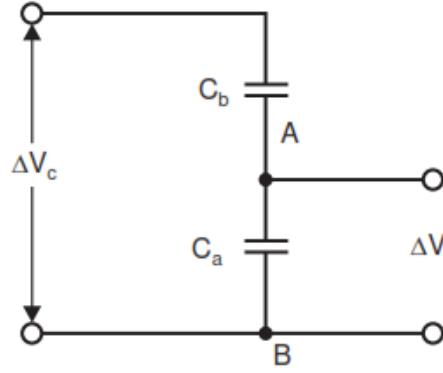
Uygulanan gerilim arttırıldıkça boşluktaki alan dağılımı, dielektrik katsayısı farkından dolayı daha da bozulacak ve gaz dolu boşluk KB kaynağı haline gelecektir. Alternatif gerilim uygulamasında, gerilimin yükselen kısmında ya da tepe noktasında ilk boşalma olayı gerçekleşecek ve boşluk içinde serbest elektronlar ile pozitif ve negatif yüklü iyonlar oluşarak boşluğun kenar yüzeylerinde elektrik dipoller meydana getirecektir [16]. Bu fiziksel olay sonucunda boşluktaki gerilim (modelde C_c kapasitansı üzerindeki gerilim) düşecektir. Alternatif gerilimin her yarı dalgasında süreç tekrarlanarak yeni KB olayları yaşanacaktır. Eğer doğru gerilim uygulanır ve arttırılırsa, belirli bir noktada bir ya da birkaç KB ortaya çıkar fakat gerilim sabit tutulursa, boşluğun yüzeyinde biriken yükler yalıtım malzemesinin molekülleri ile etkileşime girmediği ya da difüze olmadığı sürece KB oluşmaz [16].

KB Şekil 2.4 (b)'deki eşdeğer devre ile modellenebilir. Burada S anahtarı, boşluk kapasitansı C_c üzerine düşen V_c gerilimi tarafından kontrol edilmektedir. S anahtarı nanosaniyeler mertebesinde çok kısa bir süre kapalı kalmaktadır. R_c direnci boşalma süresini ve boşalma akımı $i_c(t)$ 'nin sonlu değerini modellemektedir. Bu boşalma akımı ölçülemez ve gaz boşalma mekanizmasından dolayı Dirac fonksiyonuna benzerdir [11, 28].

Şekil 2.4 (a)'daki deney nesnesine V geriliminin uygulandığı ve ardından A-B uçlarının gerilim kaynağından ayrıldığı varsayılırsa, bu durumda deney nesnesi V gerilimine şarj olacaktır. Eğer V_c gerilimi yeterli seviyeye ulaşırsa S anahtarı kapanır ve C_c boşluk kapasitesinden yayılan boşalma akımı $i_c(t)$ tüm sisteme;

$$\Delta q_c = C_c \Delta V_c \quad (2.4)$$

kadar elektrik yükü bırakır. Bu yük, yalıtım malzemesini modelleyen C_a ve C_b kapasitelerine aktarılır. Burada ΔV_c , boşluk kapasitesi üzerindeki V_c geriliminde oluşan gerilim düşümünü ifade eder. Ortaya çıkan Δq_c yükünün dağılımı esnasındaki eşdeğer devre Şekil 2.5'de görülmektedir.

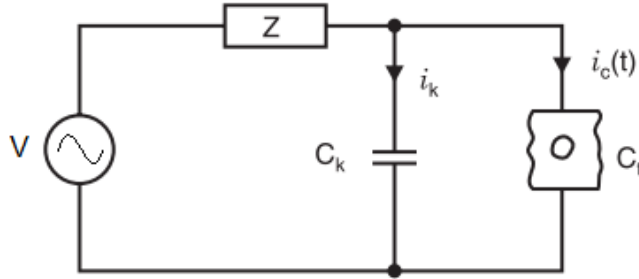


Şekil 2.5: Kısmi boşalma sonrası eşdeğer devre.

Bu noktada A-B uçları arasındaki gerilim düşümü;

$$\Delta V = \frac{C_b}{C_a + C_b} \Delta V_c \quad (2.5)$$

eşitliği ile gösterilir. Bu gerilim düşümü, Δq_c yükü hakkında bilgi vermemektedir fakat bu yük ile bağlantılı $C_b \Delta V_c$ büyüklüğü ile orantılıdır [15, 16]. C_b kapasitesi boşluğun geometrik boyutları ile, dolayısıyla C_c kapasitesi ile bağlantılıdır. ΔV gerilim düşümü, yükselme zamanı $i_c(t)$ akımının sürecine bağlı olan ve ölçülebilir bir negatif adım gerilimidir. ΔV_c gerilim düşümü 10^2 - 10^3 voltlar mertebesinde iken, C_b / C_a oranı (2.3) eşitsizliğine göre çok küçük (10^{-3} - 10^{-4} voltlar mertebesinde) ve bilinmeyen bir değer olmaktadır. Bu nedenle ΔV gerilim düşümü de birkaç voltlar mertebesinde ve çok küçük olmaktadır. Dolayısı ile sisteme uygulanan V gerilimi üzerinden ΔV gerilim düşümünün ölçülmesi seviye farkları nedeniyle zor bir işlemdir.



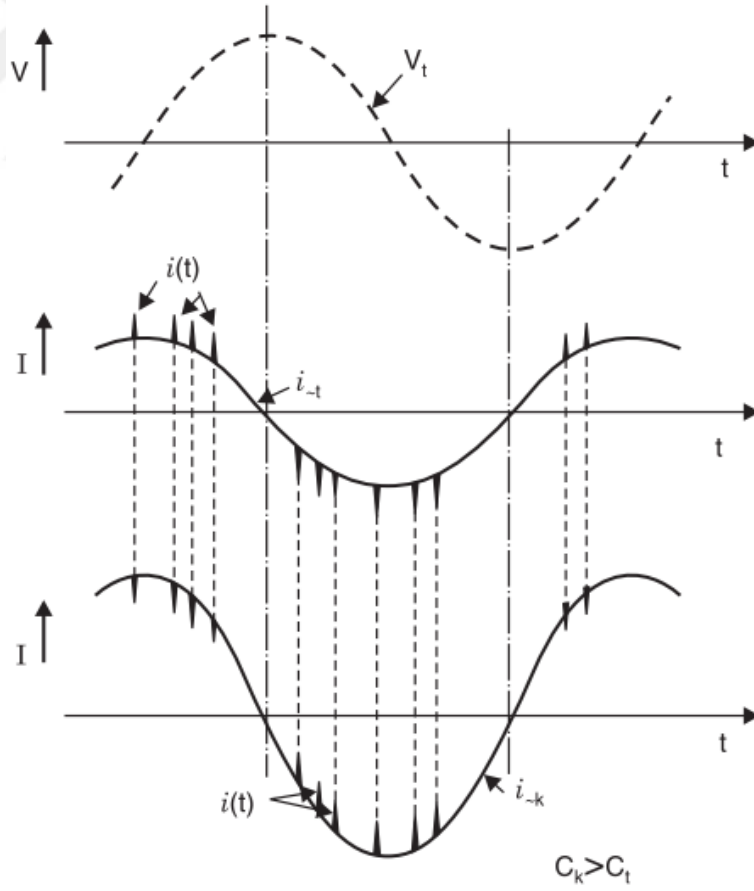
Şekil 2.6: Kuplaj kapasitesi eklenen ölçme devresi.

Bu zorluğu aşmak için Şekil 2.6'daki gibi bir deney düzeneği kullanılır. Burada C_t kapasitesi içinde boşluk yer alan deney nesnesinin toplam kapasitesini, C_k kapasitesi

kuplaj kapasitesini; Z ise filtre empedansını göstermektedir. Burada Z filtre empedansı, V alternatif gerilim kaynağı ile $C_k // C_t$ paralel kapasitansları arasındaki elektriksel bağlantının doğal empedansıdır ya da ayrıca kullanılan ve çok kısa süreli KB sürecinde kaynak ile yükleri birbirinden ayıran bir filtre endüktansdır. C_k kuplaj kapasitesi KB esnasında kararlı bir gerilim kaynağı gibi davranır [16].

KB sonucu ortaya çıkan darbe akımları çok yüksek frekanslı olduğundan dolayı Z empedansı tarafından kaynak tarafına geçemezler. Fakat kaynağın temel frekansında olan (örneğin 50 Hz) akım halen devrede dolaşmaktadır. Bu durumda kaynak gerilimi ile C_k ve C_t kapasitanslarında dolaşan akımlar Şekil 2.7'deki gibi olacaktır [15].

Burada ilginç olan, C_k ve C_t üzerindeki darbe akımlarının aynı zamanda ve büyüklükte fakat ters polaritede oluşmalarıdır. Buradan darbe akımlarının V gerilim kaynağı tarafından değil, KB nedeniyle oluştuğu kesin olarak söylenebilir [15].



Şekil 2.7: C_k ve C_t için akım dalga şekilleri.

KB esnasında deney nesnesi içindeki boşluğu modelleyen C_c kapasitesi tümüyle yok sayılabilir, çünkü boşalma süreci kapasiteyi kısa devre gibi düşünmemizi sağlar. Bu durumda deney nesnesinin toplam kapasitesini gösteren C_t sadece $C_a + C_b$ toplamından meydana gelecektir. KB sonucu C_t üzerinde ortaya çıkan ΔV gerilim düşümü, C_k kuplaj kapasitesi tarafından kompanse edilir. Bu işlem esnasında dolaşan $i(t)$ akımı, KB akım darbesi ile aynı biçimdedir.

Eğer $C_k \gg C_t$ koşulu sağlanırsa ΔV gerilim düşümü tümüyle dengelenir ve transfer edilen yük;

$$q = \int i(t)dt = (C_a + C_b)\Delta V \quad (2.6)$$

eşitliği ile gösterilir. Burada (2.5) eşitliği kullanılırsa q yükü;

$$q = C_b \Delta V_c \quad (2.7)$$

şekline dönüşür. Buradaki q yüküne “görünür yük” adı verilmektedir ve C_c kapasitesi ile modellenen boşlukta biriken ve KB’ye neden olan yük miktarına eşit değildir [15, 16]. KB için tanımlanan bu büyüklük, ΔV gerilim düşümünden daha gerçekçi bir ifadedir çünkü deney nesnesi kapasitesi bileşenlerinden C_a ’nın etkisi üzerinde görülmez. Halbuki (2.5) eşitliğinden görülebileceği üzere ΔV gerilim düşümü üzerinde C_a ’nın etkisi büyüktür [15].

$C_k \gg C_t$ koşulunu tam olarak sağlamak mümkün değildir. Kendisi KB üretmeyen bir C_k kuplaj kapasitesinin çok büyük değerlerde üretilmesi ekonomik olmayacaktır. Ayrıca kapasite değerinin büyümesi ile reaktans düşecek ve V gerilim kaynağı aşırı yüklenecektir. Diğer durumda da sonlu değere sahip bir C_k kuplaj kapasitesinin, KB sonucu oluşan ΔV gerilim düşümünü dengelemesi sınırlı olacak ve $i(t)$ akımı düşecektir. Buna bağlı olarak q görünür yük değeri de düşecektir. Bu problemten dolayı C_k kuplaj kapasitesi üzerindeki gerilimde ortaya çıkan azalma ΔV^* ile gösterilir ve (2.7) görünür yük eşitliği kullanılırsa;

$$C_b \Delta V_c = \Delta V^* (C_a + C_b + C_k) \quad (2.8)$$

$$\Delta V^* = \frac{C_b}{C_a + C_b + C_k} \Delta V_c = \frac{q}{C_a + C_b + C_k} \quad (2.9)$$

elde edilir. Bu noktada, C_k kuplaj kapasitesinden C_t deney nesnesine aktarılan yük q_m ile gösterilirse;

$$q_m = C_k \Delta V^* \quad (2.10)$$

olacaktır. Burada q_m “ölçülebilir yük” olarak adlandırılır [15, 16]. Ölçülebilir yük ile görünür yük arasında;

$$\frac{q_m}{q} = \frac{C_k}{C_t + C_k} \quad (2.11)$$

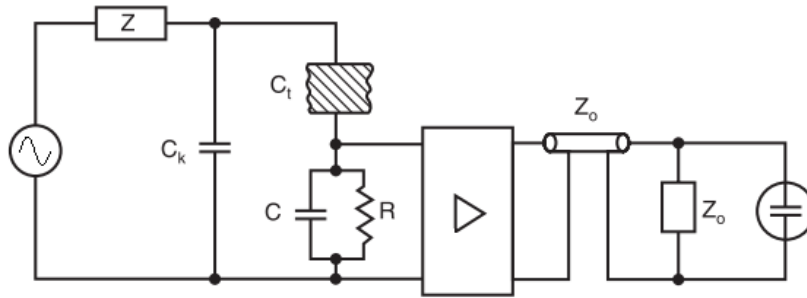
şeklinde bir oransal eşitlik ifadesi yazılabilir. Bu ifadeden $C_k \gg C_t$ koşulu ne kadar sağlanırsa, ölçülebilir yük değerinin görünür yük değerine o kadar yakın olacağı anlaşılmaktadır.

2.1.5. Kısmi Boşalma Ölçüm Yöntemleri

Bölüm 2.1.2.’de verilen fiziksel etkenlerin algılanmasına dayalı olarak KB için çeşitli ölçüm yöntemleri geliştirilmiştir [9, 11, 12, 14]. Bu yöntemler; KB sonucu ortaya çıkan elektriksel akım darbelerinin algılanmasına dayanan “elektriksel yöntemler” ve ortaya çıkan diğer fiziksel etkenlerin algılanmasına dayanan “elektriksel olmayan yöntemler” şeklinde iki ayrı grupta incelenmektedir.

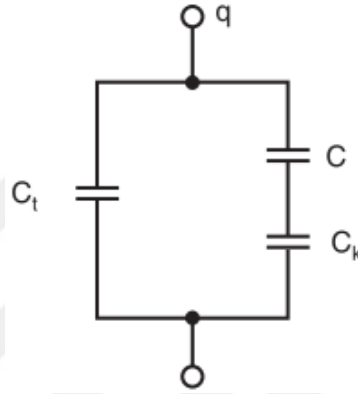
2.1.5.1. Elektriksel Yöntemler

KB akım darbelerinin ölçülmesi, deney nesnesinin durumu ve oluşmakta olan boşalma süreçleri hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Oluşan akım darbelerinin zaman parametreleri; kullanılan yalıtım malzemelerinin tasarımı ve hatalı bölgenin yapısına oldukça bağlıdır. KB’nin elektriksel bir ölçüm yöntemi Şekil 2.8’de görülmektedir [15].



Şekil 2.8: Kısmi boşalmanın elektriksel ölçümü.

Burada C ; deney nesnesi C_t ile toprak arasındaki kaçak kapasiteyi, kuvvetlendirici biriminin giriş kapasitesini ve diğer kaçak kapasiteleri göstermektedir. Yüksek geçiren kuvvetlendirici-filtrenin görevi şebeke frekanslı $i_k(t)$ ve $i_c(t)$ akımlarını bastırmak ve kısa süreli akım darbelerini yükseltmektir. KB esnasında kısa süreli darbe akımı $\delta(t)$ 'nin ortaya çıktığını ve C_t üzerinde görünür yük q oluştuğunu varsayalım. Bu q yükü; C_t , C ve C_k kapasiteleri arasında bir yük dağılımı oluşturacaktır. Bu esnadaki eşdeğer devre modeli Şekil 2.9'da görülmektedir.



Şekil 2.9: Kısmi boşalma sonrası ölçüm devresinin eşdeğer modeli.

C_t kapasitesi üzerindeki gerilim;

$$V_{C_t} = \frac{q}{C_t + \frac{CC_k}{C+C_k}} \quad (2.12)$$

şeklinde. Buradan C kapasitesi üzerindeki gerilim;

$$v = \frac{q}{C_t + \frac{CC_k}{C+C_k}} \cdot \frac{C_k}{C+C_k} = \frac{q}{C_t(C+C_k) + CC_k} \cdot C_k = \frac{qC_k}{CC_t + C_kC_t + CC_k} = \frac{q}{C+C_t\left(1+\frac{C}{C_k}\right)} \quad (2.13)$$

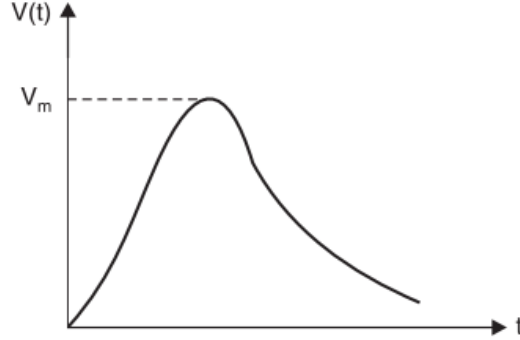
olarak yazılabilir. C kapasitesine paralel R direnci nedeniyle bu gerilim;

$$v(t) = \frac{q}{C+C_t\left(1+\frac{C}{C_k}\right)} e^{-t/\tau} \quad (2.14)$$

üstel ifadesi şeklinde yazılır. Burada;

$$\tau = \left(C + \frac{C_tC_k}{C_t+C_k}\right) R \quad (2.15)$$

zaman sabiti olmaktadır. KB sonucu R direnci üzerinde oluşan gerilim işareti Şekil 2.10'da görülmektedir.



Şekil 2.10: Kısmi boşalma sonucu R direnci üzerinde oluşan gerilim.

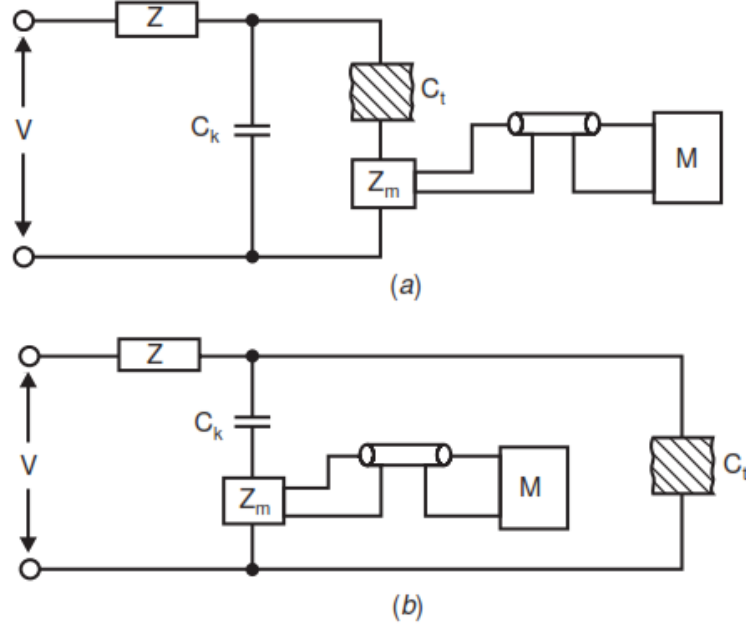
Hızlı yükselen ve ardından τ zaman sabitine bağlı olarak eksponansiyel bir şekilde azalan işaret ortaya çıkmaktadır. Bu durum, devre elemanlarının ölçülmek istenen işarete etkisini göstermektedir. Darbe akımı $i(t)$ 'nin ölçümü bu nedenle zordur [15].

Ölçülmek istenen KB işaretlerini bozan ve ölçümü zorlaştıran diğer bir etken de sistemde mevcut olan şebeke frekanslı $i_k(t)$ ve $i_c(t)$ akımlarıdır. Ayrıca şebekede mevcut anahtarlamalı güç elektroniği sistemleri (tristör vs. içeren devreler) de çok yoğun ve yüksek frekanslı harmonik işaretler üretirler ve KB işaretleri ile karışırlar. Transformatörlerdeki kademe değiştiriciler ve motor/jeneratörlerdeki karbon fırçalı yapılar da ayrıca elektriksel gürültü kaynaklarıdır. Tüm bu bozucu işaret kaynakları iki ana grupta toplanabilir [15, 18]:

- (i) Darbe şekilli gürültü işaretleri: KB'ye benzer elektriksel (yük) boşalma kaynaklı olanlar.
- (ii) Harmonik işaretleri: Güç kaynağı (şebeke) ve güç elektroniği sistemleri kaynaklı olanlar.

KB akım darbelerinin integrasyonu ile bulunan görünür yük değeri, KB seviyesi olarak kabul edilir. Frekans değeri ne olursa olsun deney nesnesine uygulanan alternatif gerilim, ölçüm devresinin yapacağı integrasyon işlemi için bozucu bir etkidir. Bu nedenle KB haricindeki tüm akımlar integrasyon devresine ulaşmadan bastırılmalıdır.

Bu amaçla filtre devreleri kullanılmaktadır [15, 18]. Şekil 2.11’de ölçüm empedansı Z_m ’nin ölçüm sistemine bağlantısında kullanılabilecek iki farklı yöntem görülmektedir.



Şekil 2.11: Kısmi boşalma ölçümü için Z_m ’nin iki farklı bağlantı yöntemi.

Şekil 2.11 (a)’da ölçüm empedansı Z_m deney nesnesi C_t ile seri bağlantıdır. Bu bağlantı şekliyle daha hassas ölçümler yapılabilmektedir çünkü KB akım darbeleri bilindiği üzere C_t kaynaklıdır. Fakat deney nesnesinde oluşabilecek tam boşalma (elektriksel delinme) sonucunda (oluşacak yüksek akımlardan ötürü) ölçüm devresi büyük zarar görecektir. Bu nedenle Şekil 2.11 (b)’de görülen ölçüm devresi düzeni kullanılmaktadır. Burada ölçüm empedansı Z_m kuplaj kapasitesi C_k ile seri bağlantıdır.

Daha önce de belirtildiği üzere, uluslararası standartlara göre görünür yük değeri KB seviyesi olarak kabul edilmektedir. $i_c(t)$ akımının integrasyonu ile görünür yük değeri elde edilir. Bu işlem için “geniş bant” ve “dar bant” ölçüm sistemleri kullanılır. Bunlar temelde bant geçiren filtre özellikli kuvvetlendirici devreleridir. KB darbe akımı frekansa bağlı incelenirse integrasyon işlemi için bant geçiren filtre kullanımının nedeni görülmektedir.

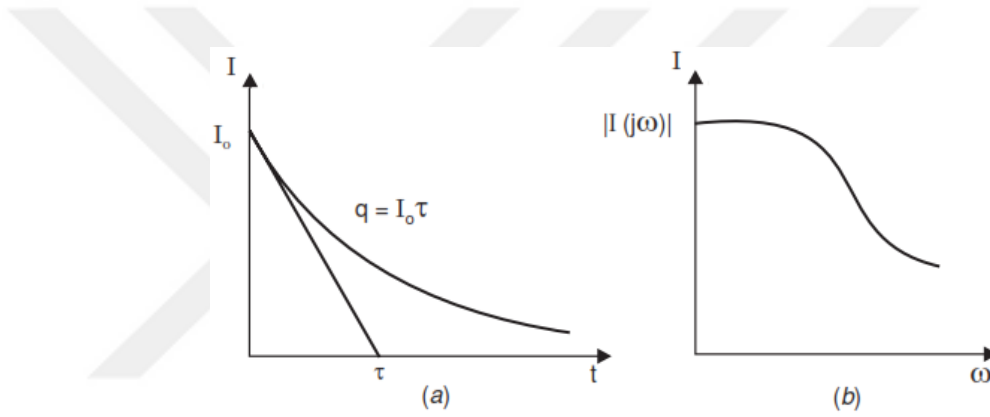
Darbe akımı $i(t)$ periyodik olmayan bir işaretidir. Böyle bir işaretin frekans spektrumunu elde etmek için Fourier dönüşümü;

$$I(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} i(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.16)$$

şeklindedir. Darbe akımı $i(t) = I_0 e^{-t/\tau}$ olarak modellenirse;

$$\begin{aligned} I(j\omega) &= \int_0^{\infty} I_0 e^{-t/\tau} e^{-j\omega t} dt = I_0 \int_0^{\infty} e^{-\left(\frac{1}{\tau} + j\omega\right)t} dt = -\frac{I_0}{\frac{1}{\tau} + j\omega} \left[e^{-\left(\frac{1}{\tau} + j\omega\right)t} \right]_0^{\infty} \\ &= -\frac{I_0 \tau}{1 + j\omega \tau} [0 - 1] = \frac{I_0 \tau}{1 + j\omega \tau} \end{aligned} \quad (2.17)$$

elde edilir. Frekans spektrumunun genliği $|I(j\omega)| = \frac{I_0 \tau}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}$ ve faz açısı $-\tan^{-1} \frac{\omega \tau}{1}$ olmaktadır [15].

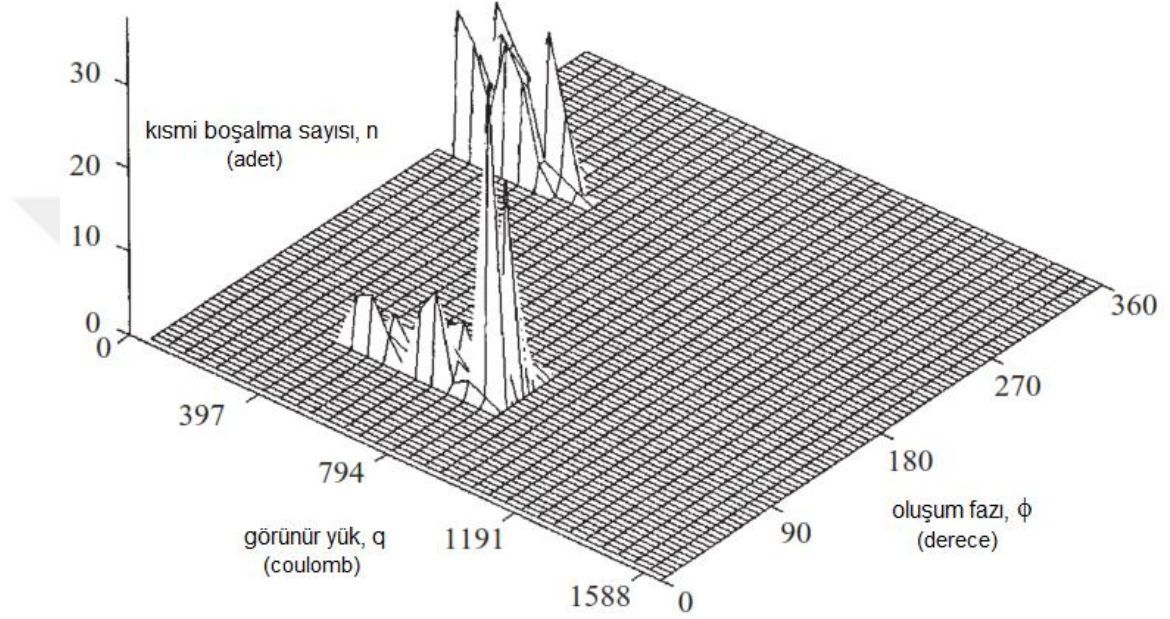


Şekil 2.12: Kısmi boşalma işareti (a) ve frekans spektrumu (b).

Şekil 2.12 (a)'da üstel bir ifade ile modellenen KB akım darbesi, (b)'de bu işaretin frekans spektrumunun genliği görülmektedir. Üstel olarak azalan akım işareti ve buna bağlı frekans spektrumu sonlu olmamakta ve sifıra ulaşmamaktadır. Bu nedenle darbe genişliği önem kazanmaktadır. $i(t)$ işaretinin darbe genişliği olarak τ zaman sabiti kullanılır. Şekil 2.12 (a)'da, $t = 0$ anındaki akım değeri I_0 'dan $t = \tau$ anına ($i = 0$ kabul edilmekte) olan bir doğru ile gösterilmiştir. Şekil 2.12 (b)'de $\omega \rightarrow 0$ iken $I(j\omega) \rightarrow I_0 \tau$ değeri, KB'nin görünür yük değerini vermektedir ki bu değer aynı zamanda frekans spektrumunun doğru akım bileşeni ($f = 0$) olmaktadır. Buradan KB işaretinin frekans spektrumunda alçak frekans bölgesinde görünür yük ile ilgili bilginin yer aldığı söylenebilir [11, 15-17]. Bu işaretin integrasyonunun doğru bir şekilde yapılabilmesi ve görünür yük değerinin elde edilebilmesi için darbe işareti zaman sabiti τ 'nin ölçüm devresi zaman sabitinden büyük olması, diğer bir deyişle ölçüm sistemi bant

genişliğinin (üst kesim frekansı) ölçülen KB işaretlerinin spektrumundan (ilgilenilen bölgesi) küçük olması gerekmektedir.

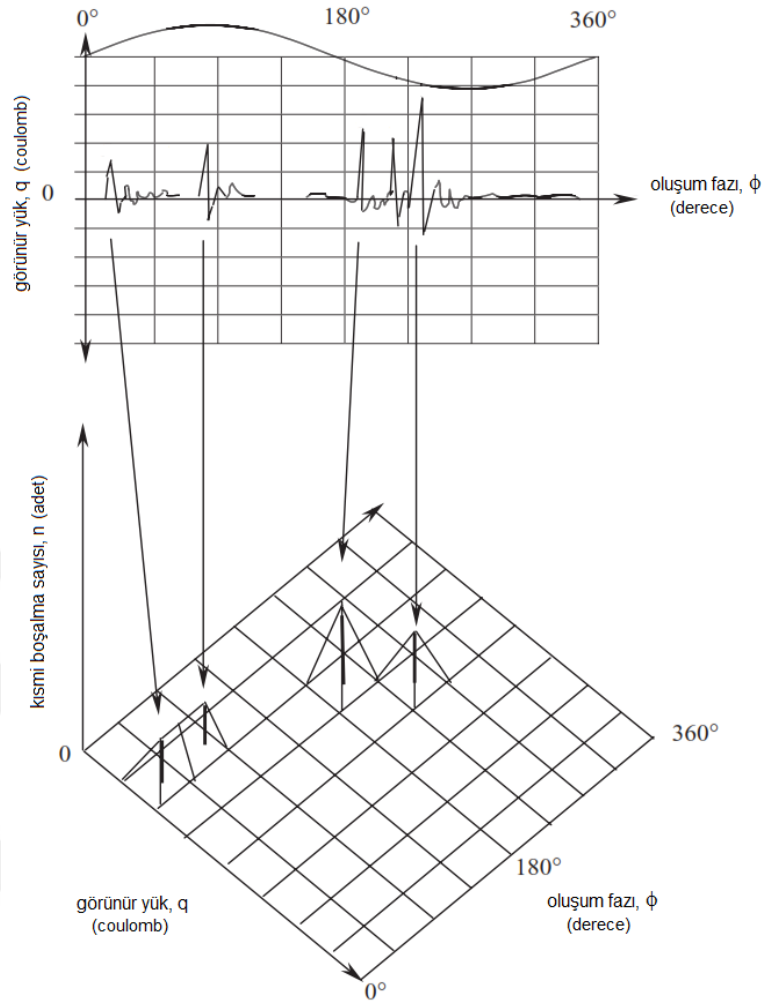
Elektriksel KB ölçümlerinde üç ana parametre değerlendirme açısından ön plana çıkmaktadır. Bunlar; görünür yük (q), KB darbe sayısı (n) ve KB oluşum fazı (ϕ)'dır [14].



Şekil 2.13: Kısmi boşalmaya bağlı elde edilen örnek bir ϕ - q - n diyagramı.

Görünür yük değeri tek başına KB'nin büyüklüğü hakkında bilgi vermektedir, fakat birim zamanda oluşan akım darbe sayısı ve bu darbelerin her birinin şebeke frekansına göre hangi faz açısında oluştuğu bilgisi de önemlidir. Bu parametrelerin bir arada gösterildiği ϕ - q - n diyagramı, KB'nin nedenleri ile ilgili önemli bilgiler içermektedir. Şekil 2.13'de örnek bir ϕ - q - n diyagramı görülmektedir [14].

ϕ - q - n diyagramının elde edilebilmesi için belirli bir süre veri kayıt işlemi yapılmış olmalıdır. Kayıt esnasında yapılan gerçek zamanlı ölçümlerde ise ϕ - q diyagramı elde edilmektedir. Şekil 2.14'de örnek bir ϕ - q diyagramı görülmektedir [14]. Diyagramlarda ortaya çıkan dağılım desenleri, KB'nin kaynağı, yapısı ve olası gelişimi hakkında bilgi vermektedir. Aynı şekilde, dağılım desenleri ile ortaya çıkan istatistiksel parametreler (ortalama, varyans, çarpıklık ve basıklık) KB'ye bağlı olarak yalıtım malzemelerinde ortaya çıkan aşınma ve bozulma hakkında önemli bilgiler vermektedir [29-31].



Şekil 2.14: ϕ - q - n diyagramı ve faza bağlı görünür yük ilişkisi.

2.1.5.2. Elektriksel Olmayan Yöntemler

Akustik ölçüm yöntemi:

Yalıtım malzemesinin bir noktasında KB oluştuğunda, belirli bir hızla yol alan küresel formu ve tüm yönlere doğru ilerleyen bir basınç dalgası oluşur. Bu basınç dalgası, örneğin bir transformatörde KB oluşmuşsa, transformatör kazanının duvarlarında bir membran etkisi doğurur. Kazan duvarına monte edilen bir mikrofonda bu basınç dalgası ile orantılı bir gerilim meydana gelir. Meydana gelen KB akustik sinyalinin değişimi osiloskop gibi bir cihaz ile izlenebilir ve kaydedilebilir [9, 32-34]. KB oluşum zamanı çok kısa olduğu için meydana gelen basınç dalgası işitilebilir aralığın çok üzerinde yüksek frekans bileşenleri içerecektir. Bu nedenle, kullanılan mikrofonlar ses frekans bölgesinin üstünde ultrasonik işaretleri alabilecek şekilde tasarlanmışlardır. Bu yöntem iki ana süreci içermektedir;

- İşaretin elde edilmesi.
- İşaretin yol alış zamanı belirlenerek KB'nin konumunun bulunması.

Basınç dalgası, çeşitli sıvı ve katı ortamların içinden fiziğin klasik yasalarına göre yol alacak ve zayıflayacaktır. Dalga yayılım karakteristikleri ve çeşitli ortamların basınç dalgasına yapacağı zayıflatma Tablo 2.2'de verilmiştir [9].

Tablo 2.2: Akustik basınç dalgasının farklı malzemelerdeki davranışı.

Malzeme türü	Yayınım hızı (m/ms)	Yağ ile karşılaştırıldığında bağıl zayıflama (dB/cm)
Yağ	1.40	-
Yağ emdirilmiş kağıt	1.42	0.6
Yağ emdirilmiş pressboard	2.30	4.6
Manyetik ve çelik saç	5.05	13
Bakır	3.58	9

Ultrasonik dalga işaretlerini algılayabildiği için kullanılan mikrofonlara “ultrasonik mikrofon” adı da verilmektedir. Mikrofona ulaşacak olan basınç dalgasının frekansı 20 kHz – 200 kHz aralığındadır. Bu nedenle seçilecek olan mikrofonun duyarlılık aralığı, bu frekanslara uygun olmalıdır. Bazı durumlarda en yüksek işaret enerjisi 150 kHz civarında bulunur. Ölçüm düzeneğinde bir yüksek geçiren filtre kullanılarak akustik işaretler girişim işaretlerinden ayrılabilir. Bu girişim işaretleri transformatörlerde soğutma pompası ve manyetik çekirdek gürültüsü kaynaklıdır ve frekansı 50 kHz'in altındadır [35-37].

Akustik ölçüm yöntemi ile transformatörlerde KB'nin büyüklüğü hakkında bir bilgi elde edilememekte, sadece konum tesbiti için kullanılabilir fakat çok verimli değildir. Gerek transformatörün yapısını oluşturan bölümlerin akustik işaretlerin iletiminde oluşturduğu zayıflatmalar, gerekse diğer çevresel gürültüler bu yöntemin uygulanabilirliğini sınırlamaktadır. Sahada devreye alınmış bir güç transformatörüne, özellikle de enerji altındayken bu yöntemin uygulanabilmesi kolay değildir. Ultrasonik mikrofonların transformatör kazanının üzerine yerleştirilmesi gerekmektedir [9, 37].

Çözünmüş gaz analizi - DGA (kimyasal yöntem):

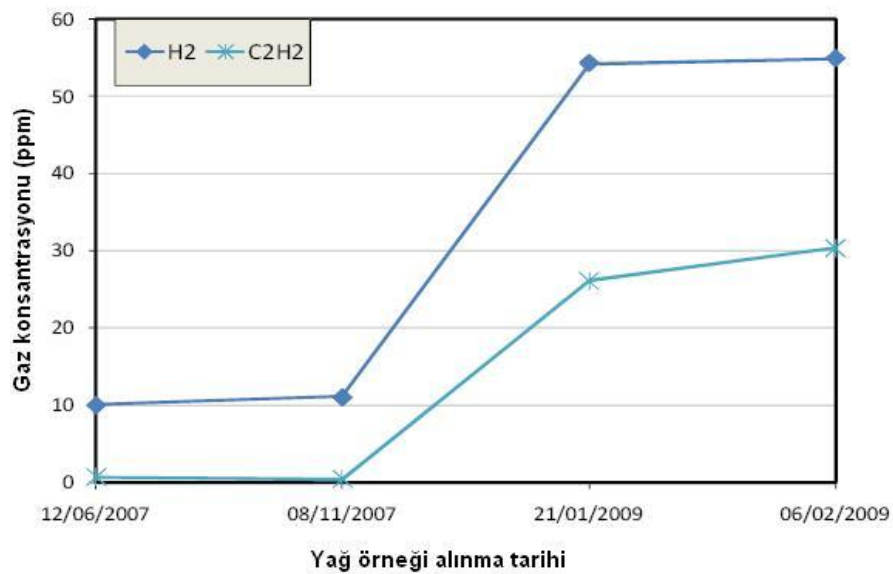
Yağ ile soğutmalı türdeki transformatörlerde uygulanabilen özel bir yöntemdir. Mineral transformatör yağları hidrokarbon moleküllerinden oluşmaktadır [8, 38]. KB'nin etkisi

ile yağda meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sonucu bazı gazlar ortaya çıkmaktadır. Bu gazlar transformatör yağının içinde çözülmüş olarak bulunurlar. Tablo 2.3’de en çok gözlenen çözülmüş gaz türleri verilmiştir [38].

Tablo 2.3: Kısmi boşalma sonucu yağda en çok gözlenen çözülmüş gazlar.

H ₂	Hidrojen	(H-H)
CH ₄	Metan	(CH ₃ -H)
C ₂ H ₆	Etan	(CH ₃ -CH ₃)
C ₂ H ₄	Etilen	(CH ₂ =CH ₂)
C ₂ H ₂	Asetilen	(CH≡CH)

KB’ye neden olan yalıtım hatasının türüne, elektriksel boşalmanın büyüklüğüne, sıklığına ve ortaya çıkan sıcaklığa bağlı olarak çözünen gazların türleri ve karışım oranları değişmektedir. Atomik iyonizasyona bağlı olarak ilk başta en zayıf C-H bağları kopmaktadır. Ortaya çıkan hidrojen gaz molekülleri temel yeni bağ kuracak gaz olmaktadır. C-C gibi daha güçlü moleküler bağların kopması için daha fazla enerji ve/veya sıcaklık ortaya çıkmalıdır. Düşük seviyeli KB’lere bağlı olarak C-H bağ kopmaları sonucu ortaya en temel ürün olarak hidrojen gazı çıkmaktadır. Eğer aktif bölgede yalıtım malzemesi selülöz içeriyorsa (örneğin güç transformatörlerindeki kağıt yalıtım kısımları gibi) ortaya CO ve CO₂ gazları da çıkabilmektedir. Şekil 2.15’de, bir transformatörden farklı tarihlerde alınan yağ örneğinin analizi ile ortaya çıkan hidrojen ve asetilen gazındaki artış görülmektedir [38].



Şekil 2.15: Bir güç transformatöründen farklı tarihlerde alınan yağ örneğindeki gaz değişimi.

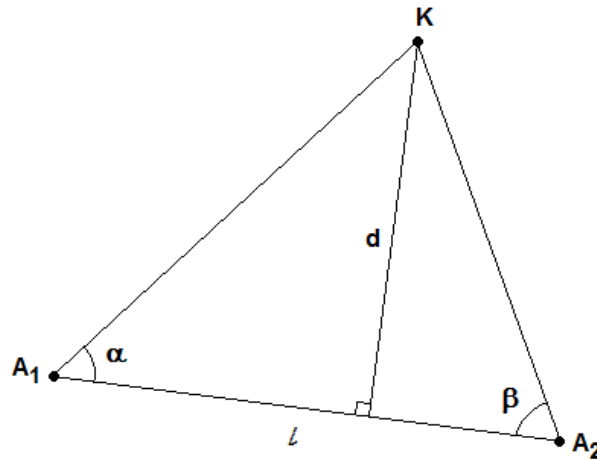
Çözünmüş gaz analizi tümü ile bir kimyasal işlemler sürecidir. Belirli aralıklar ile güç transformatöründen yaklaşık 50 ml gibi bir yağ örneği alınarak kimyasal analiz uygulanır. Tesbit edilen gazların türleri, miktarları ve geçmiş ölçümlere göre artış miktarı ile artış hızı değerlendirilerek transformatörün durumu hakkında karar verilmeye çalışılır.

2.2. NOKTASAL BİR KAYNAK İÇİN KONUM BELİRLEME YÖNTEMLERİ

İşaret kaynağı konumu belirleme (source location), yayımlanan bir işaretin fiziksel özelliklerine uygun olan araç ve teknikler ile ölçümü sonrası işaret kaynağının koordinatlarının tesbit edilmesi işlemidir. Burada konumu bulunmak istenen işaret kaynağı; ışık, ses, elektromanyetik dalga gibi farklı fiziksel özelliklerde yayım yapan bir kaynak olabilir.

2.2.1. Triangulation

Koordinatları bulunmak istenen işaret kaynağının, koordinatları bilinen noktalar (algılayıcılar) ile yaptığı açılar ölçülmesi ve trigonometrik işlemler ile algılayıcılar arası hatta (base line) olan uzaklığının hesaplanması temeline dayanır. Bu yöntemin tarihçesi milattan önceki antik yunan medeniyetine kadar uzanmaktadır. Özellikle coğrafya ve haritacılık alanında yüzyıllarca kullanılmıştır. Günümüzde de optik üç boyutlu (3D) ölçüm sistemlerinde kullanılmaktadır [39, 40].



Şekil 2.16: Triangulation yöntemi.

Şekil 2.16’da triangulation yönteminin basit bir uygulaması verilmiştir. Burada A_1 ve A_2 konumları bilinen algılayıcılar, l algılayıcılar arası mesafe, K konumu bilinmeyen işaret

kaynağı, d işaret kaynağının algılayıcılar arası hatta olan dik mesafesi, α ve β ise işaret kaynağının algılayıcılar ile yaptığı açıdır. Başlangıçta elimizde l uzunluğunun olduğu, α ve β açılarının da ölçüldüğünü düşünelim. Bu durumda;

$$l = \frac{d}{\tan \alpha} + \frac{d}{\tan \beta} \quad (2.18)$$

şeklinindedir. Burada; $\tan \alpha = \sin \alpha / \cos \alpha$ ve $\sin(\alpha+\beta) = \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta$ trigonometrik dönüşümleri kullanılırsa;

$$l = d \left(\frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} + \frac{\cos \beta}{\sin \beta} \right) \quad (2.19)$$

$$l = d \frac{\sin(\alpha+\beta)}{\sin \alpha \sin \beta} \quad (2.20)$$

elde edilir. Buradan d çekilirse;

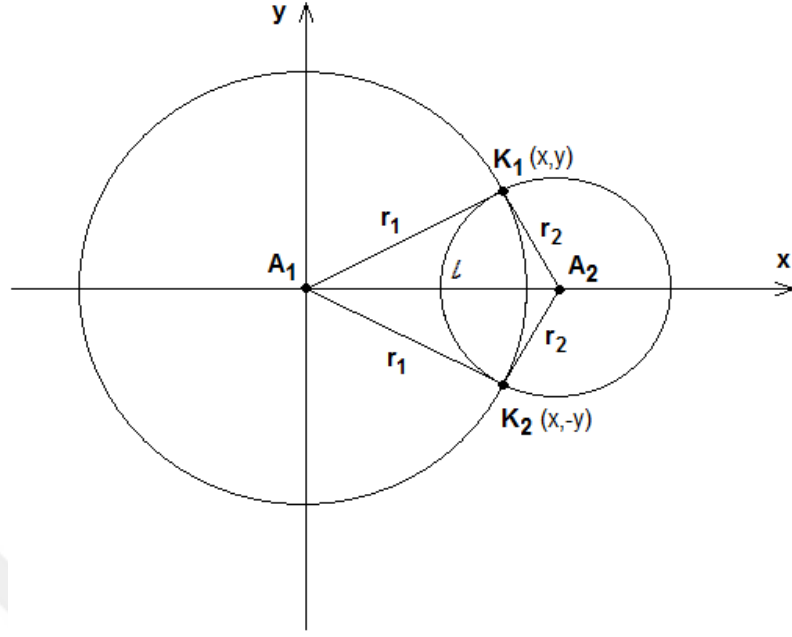
$$d = l \frac{\sin \alpha \sin \beta}{\sin(\alpha+\beta)} \quad (2.21)$$

eşitliği elde edilir. Bulunan d mesafesi kullanılarak K işaret kaynağının A_1 veya A_2 algılayıcılarına olan doğrudan uzaklığı bulunabilir [41, 42].

2.2.2. Trilateration

Geometri kurallarına göre bir nokta iki çemberin üzerinde bulunuyorsa, çemberlerin merkez koordinatları ve yarıçapları kullanılarak bu noktanın koordinatları bulunabilir. Bu yöntem trilateration adı verilmektedir. Arazi ölçümlerinde, haritacılıkta, navigasyon ve küresel konumlama sistemi (GPS) sistemlerinde kullanılmaktadır. Triangulation tekniğinden farklı olarak açıları değil, algılayıcılara olan mesafeleri kullanır [39].

Şekil 2.17'de trilateration yönteminin basit bir uygulaması verilmiştir. Burada A_1 ve A_2 konumları bilinen algılayıcılar, l algılayıcılar arası mesafe, K_1 ve K_2 konumu bilinmeyen işaret kaynağının olası koordinatları, r_1 işaret kaynağı ile birinci algılayıcı arasındaki mesafe, r_2 işaret kaynağı ile ikinci algılayıcı arasındaki mesafedir.



Şekil 2.17: Trilateration yöntemi.

A_1 algılayıcısının merkezinde olduğu çemberin matematiksel ifadesi;

$$r_1^2 = x^2 + y^2 \quad (2.22)$$

şeklindedir. Benzer şekilde A_2 algılayıcısının merkezinde olduğu çemberin matematiksel ifadesi;

$$r_2^2 = (x - l)^2 + y^2 \quad (2.23)$$

olmaktadır. Burada (2.22) eşitliğinden (2.23) eşitliğini çıkartırsak;

$$r_1^2 - r_2^2 = x^2 + y^2 - (x - l)^2 - y^2$$

$$\Rightarrow r_1^2 - r_2^2 = x^2 - x^2 + 2xl - l^2$$

$$\Rightarrow r_1^2 - r_2^2 = 2xl - l^2 \quad (2.24)$$

denklemi elde edilir. (2.24) eşitliğinden x çekilirse;

$$x = \frac{r_1^2 - r_2^2 + l^2}{2l} \quad (2.25)$$

bulunur. (2.25) ile bulunan ifade, (2.22)'de yerine konular ve y çekilirse;

$$\begin{aligned}
r_1^2 &= \left(\frac{r_1^2 - r_2^2 + l^2}{2l} \right)^2 + y^2 \\
\Rightarrow y^2 &= r_1^2 - \frac{(r_1^2 - r_2^2 + l^2)^2}{4l^2} \\
\Rightarrow y &= \sqrt{r_1^2 - \frac{(r_1^2 - r_2^2 + l^2)^2}{4l^2}} \quad (2.26)
\end{aligned}$$

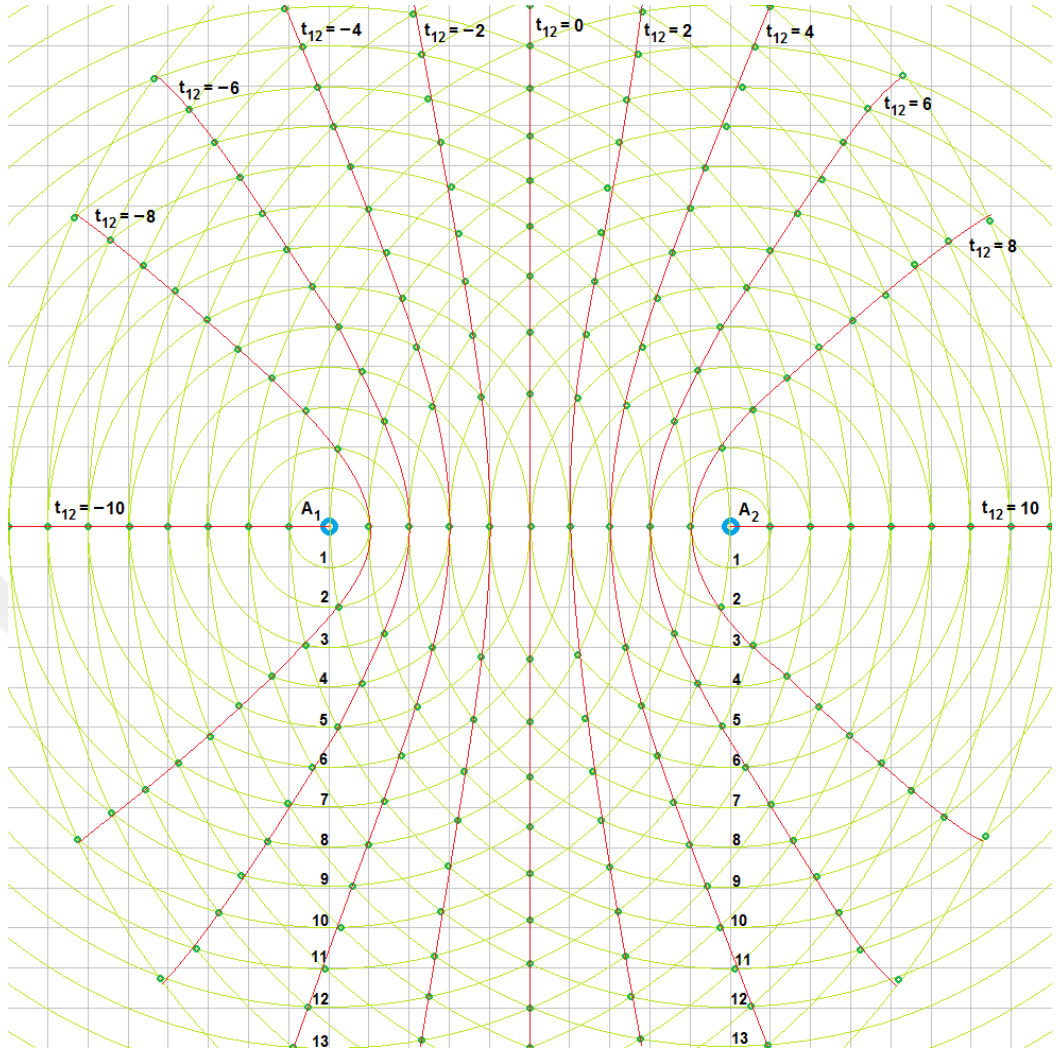
elde edilir. Böylece işaret kaynağının (x, y) koordinatları bulunmuş olur. Dikkat edilirse (2.26) eşitliği karekök ifadesi içermektedir. Buradan, bazı durumlarda, işaret kaynağı için iki muhtemel koordinat bulunabileceği anlaşılır. Şekil 2.17 bu duruma bir örnek teşkil eder. Hesaplama sonucu, işaret kaynağı $K_1(x, y)$ ya da $K_2(x, -y)$ koordinatlarında bulunabilir [39, 43, 44].

2.2.3. Hiperbolik Konum Belirleme Yöntemi - Multilateration

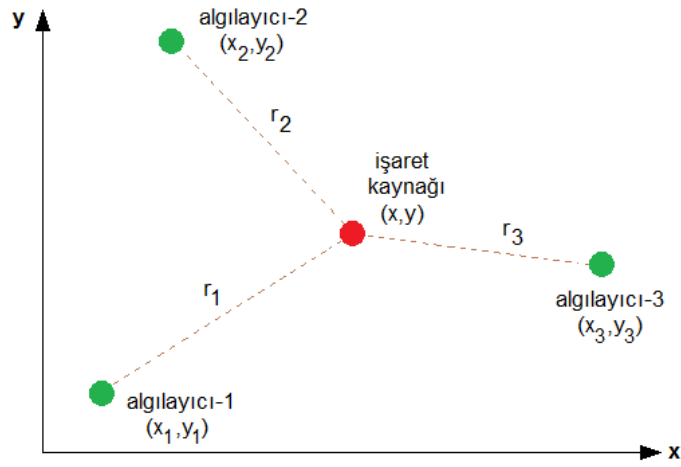
Multilateration, konumu bilinmeyen bir kaynaktan çıkan işaretin, konumu belirli birden fazla algılayıcıya ulaşma zamanları arasındaki farkların ölçülmesine ve bu zaman farklarının yardımı ile kaynağın koordinatlarının bulunmasına dayanan bir konum belirleme yöntemidir. Kesin açı değerlerinin (triangulation) ya da kesin mesafelerin (trilateration) ölçümünden farklı olarak, iki ayrı algılayıcıya aynı işaretin ulaşma zamanları arasındaki farkın kullanılması, sonsuz sayıda olası koordinat ortaya çıkarır. Bu olası koordinatlar grafik olarak gösterilirse hiperbolik bir eğri ortaya çıkar [39, 44].

Şekil 2.18'de, konumu bilinmeyen bir kaynaktan çıkan işaretin A_1 ve A_2 algılayıcılarına ulaşma zamanları arasındaki fark (Time Difference of Arrival – TDOA) t_{12} ile gösterilmiştir. Örneğin tesbit edilen zaman farkı 4 birim ise kaynağın olası pozisyonu, $t_{12} = 4$ ile gösterilen kırmızı hiperbolik eğri üzerinde bir noktada olmak zorundadır. Bu sebeple multilateration, hiperbolik konum belirleme yöntemi olarak da anılmaktadır.

Şekil 2.18'deki gösterime üçüncü bir algılayıcı ekler ve bu algılayıcı ile herhangi bir diğer algılayıcı arasındaki TDOA zaman farkı da hiperbolik bir eğri olarak çizilirse, ortaya birbiri ile kesişen iki ayrı hiperbolik eğri çıkar. Bu kesişim noktası, işaret kaynağının gerçek koordinatıdır. Dolayısı ile iki boyutlu uzayda (düzlem) multilateration tekniği ile konum belirlemek için minimum üç algılayıcıya ihtiyaç duyulur.



Şekil 2.18: Multilateration yöntemi ve zaman farklarına bağlı ortaya çıkan hiperbolik eğriler.



Şekil 2.19: İşaret kaynağı ve 3 adet algılayıcının 2 boyutlu uzayda gösterimi.

Şekil 2.19’da kırmızı ile gösterilen ve konumu bilinmeyen işaret kaynağının koordinatları (x, y) , i ’nci algılayıcının koordinatları (x_i, y_i) olsun. Bu durumda, i ’nci algılayıcı ile işaret kaynağı arasındaki uzaklık r_i ile gösterilirse;

$$r_i^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 \quad (2.27)$$

şeklindedir. i ’nci algılayıcının koordinatları için;

$$K_i = x_i^2 + y_i^2 \quad (2.28)$$

şeklinde bir tanımlama yapar ve (2.27) denkleminde kullanırsak;

$$r_i^2 = x_i^2 - 2x_ix + x^2 + y_i^2 - 2y_iy + y^2 = K_i - 2x_ix - 2y_iy + x^2 + y^2 \quad (2.29)$$

olmaktadır. Burada $i = 1, 2, \dots, m$ olarak algılayıcı sayısıdır.

Konumu bilinmeyen işaret kaynağı elektromanyetik dalga yayını yapıyorsa, işaret yayının hızı boşlukta c (ışık hızı) olmaktadır [46]. Bu durumda, i ’nci algılayıcı ile işaret kaynağı arasındaki uzaklık;

$$r_i = ct_i \quad (2.30)$$

şeklindedir. Burada t_i , aradaki uzaklığın ışık hızında kat edilme süresidir. TDOA ile elde edilen zaman farklarına bağlı olarak;

$$r_{i1} = ct_{i1} = c(t_i - t_1) = r_i - r_1 \quad (2.31)$$

şeklinde yazılabilir. Bu tanım, i ’nci algılayıcı ile işaret kaynağı arasındaki uzaklığın (r_i), birinci algılayıcı ile işaret kaynağı arasındaki uzaklık (r_1) ile farkını gösterir. Bu denklemden r_i çekilirse;

$$r_i = r_{i1} + r_1 \quad \Rightarrow \quad r_i^2 = (r_{i1} + r_1)^2 \quad (2.32)$$

yazılabilir. Bu noktada (2.32) kullanılarak (2.29) denklemini tekrar yazılırsa;

$$r_{i1}^2 + 2r_{i1}r_1 + r_1^2 = K_i - 2x_ix - 2y_iy + x^2 + y^2 \quad (2.33)$$

denklemini elde edilir. (2.33) denkleminde $i = 1$ yapılırsa;

$$r_{11}^2 + 2r_{11}r_1 + r_1^2 = K_1 - 2x_1x - 2y_1y + x^2 + y^2 \quad (2.34)$$

bulunur. Burada $r_{11} = r_1 - r_1 = 0$ olacağı için (2.34) denklemi;

$$r_1^2 = K_1 - 2x_1x - 2y_1y + x^2 + y^2 \quad (2.35)$$

şeklini alır. (2.33) denkleminde (2.35) denklemi çıkarılırsa;

$$r_{i1}^2 + 2r_{i1}r_1 = K_i - 2x_ix - 2y_iy - K_1 + 2x_1x + 2y_1y$$

$$\Rightarrow r_{i1}^2 + 2r_{i1}r_1 = -2x(x_i - x_1) - 2y(y_i - y_1) + K_i - K_1$$

$$\Rightarrow r_{i1}^2 + 2r_{i1}r_1 = -2x_{i1}x - 2y_{i1}y + K_i - K_1 \quad (2.36)$$

denklemi elde edilir. (2.36), bilinmeyenleri x , y ve r_1 olan bir doğrusal denklemdir.

Burada $i = 2$ ve $i = 3$ yapılırsa;

$$r_{21}^2 + 2r_{21}r_1 = -2x_{21}x - 2y_{21}y + K_2 - K_1 \quad (2.37)$$

$$r_{31}^2 + 2r_{31}r_1 = -2x_{31}x - 2y_{31}y + K_3 - K_1 \quad (2.38)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemler düzenlenirse;

$$2(-x_{21}x - y_{21}y) = 2r_{21}r_1 + r_{21}^2 - K_2 + K_1 \quad (2.39)$$

$$2(-x_{31}x - y_{31}y) = 2r_{31}r_1 + r_{31}^2 - K_3 + K_1 \quad (2.40)$$

tekrar düzenlenirse;

$$-x_{21}x - y_{21}y = r_{21}r_1 + \frac{1}{2}(r_{21}^2 - K_2 + K_1) \quad (2.41)$$

$$-x_{31}x - y_{31}y = r_{31}r_1 + \frac{1}{2}(r_{31}^2 - K_3 + K_1) \quad (2.42)$$

denklemleri elde edilir. (2.41) ve (2.42) denklemleri matris formatında doğrusal denklem takımı olarak yazılırsa;

$$-\begin{bmatrix} x_{21} & y_{21} \\ x_{31} & y_{31} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{21} \\ r_{31} \end{bmatrix} r_1 + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} r_{21}^2 - K_2 + K_1 \\ r_{31}^2 - K_3 + K_1 \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

şeklini alır. Bu matris denklem takımı düzenlenirse;

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} x_{21} & y_{21} \\ x_{31} & y_{31} \end{bmatrix}^{-1} \times \left\{ \begin{bmatrix} r_{21} \\ r_{31} \end{bmatrix} r_1 + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} r_{21}^2 - K_2 + K_1 \\ r_{31}^2 - K_3 + K_1 \end{bmatrix} \right\} \quad (2.44)$$

elde edilir [45]. (2.44) ile verilen doğrusal denklem takımının çözümü ile işaret kaynağının koordinatları (x, y) bulunabilir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. ELEKTROMANYETİK KISMİ BOŞALMA ALGILAYICISI TASARIMI

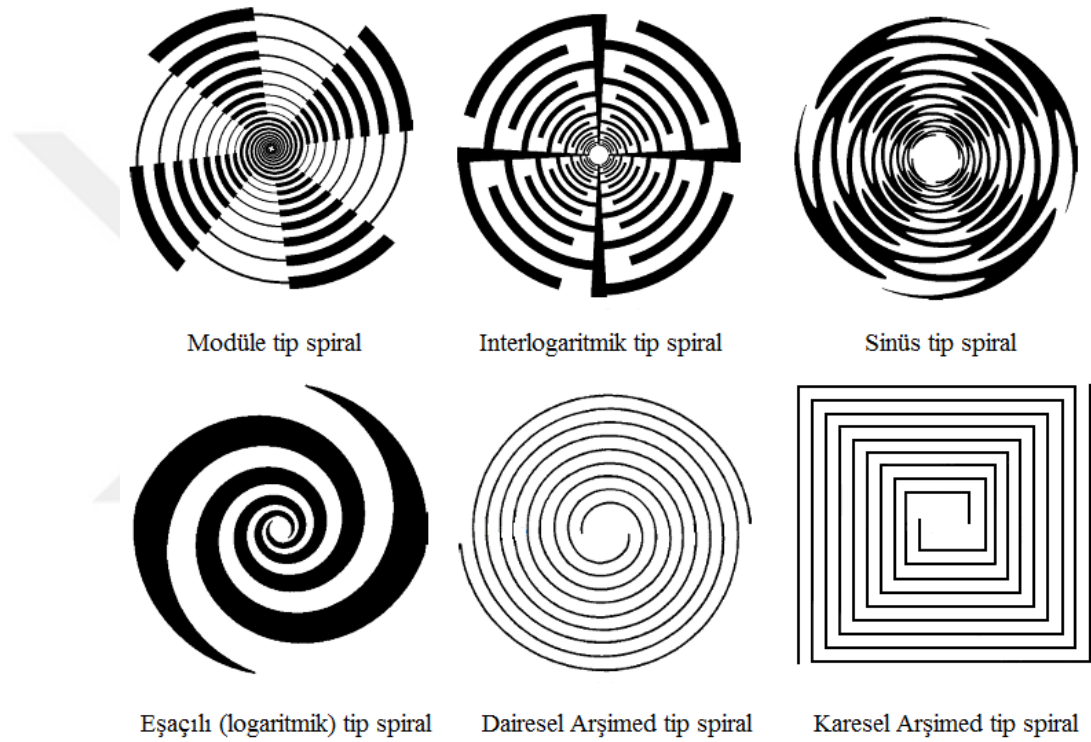
EM dalgaları yaymak ve algılamak için anten adı verilen metalik iletken yapılar kullanılır. Verici sistemlerde, yüksek frekans (YF) işareti üretildikten sonra kuvvetlendirilir, modüle edilir ve daha sonra antene uygulanır. Anten üzerinden akan YF akımı ile uzaya EM dalgalar yayılır. Alıcı taraftaki antene çarpan EM dalgalar sayesinde anten üzerinde bir YF akımı akar. Antenler aracılığı ile haberleşmenin basit bir tanımı bu şekilde yapılabilir [47].

EM dalga yayınının kaynağı bir YF üreticine bağlı bir anten olabileceği gibi, uzayın belirli bir noktasında zamanla değişen yük birikimi de olabilir [19, 48-50]. Bu tanım da bize KB oluşumunu hatırlatmaktadır.

Genel olarak anten yapıları, belirli ve tek bir frekansta en yüksek çalışma performansını gösterecek şekilde tasarlanmışlardır. KB oluşumu sonucu ortaya çıkan EM dalga yayını geniş bir frekans bölgesini kapsadığından dolayı [49-52], bu genel anten yapıları EM KB algılayıcı tasarımı için uygun değildir. Bu amaçla kullanılması uygun olan yapılar, geniş bantlı anten tasarımlarıdır [53-58].

Geniş bantlı anten yapılarının yayılım deseni, empedans ve yansıma katsayısı gibi özellikleri geniş bir frekans bölgesinde çok az değişim göstermekte ve sabit kabul edilmektedir [59]. Frekanstan bağımsız anten kavramı, bir antenin desen ve dalga direnci özelliklerinin, antenin dalga boyu cinsinden ölçülen boyutlarına duyarlı biçimde bağlı olduğu gözleminden ortaya çıkmıştır [59]. Eğer bir frekans değişimi anten boyutlarının dalgaboyuna oranını değiştirmezse, yani anten yapılarının boyutları dalgaboyu ile ölçeklenirse, aynı yayılım özelliklerini korurlar. Bunun sonucu olarak eğer bir anten yapısı tümüyle açıları ile tanımlanabiliyorsa ve hiçbir karakteristik uzunluk belirtilmiyorsa, bu antenin yayılım deseni ve dalga direncinin frekanstan bağımsız olacağı söylenebilir [59, 60].

Geniş bantlı anten tasarımı olarak literatürde birçok farklı çalışma bulunmaktadır [60, 61]. Logaritmik periyodik antenler (eski, çubuklu yapıdaki televizyon antenleri) ile başlayan bu anten yapıları, günümüzde özel spiral tasarımlara sahip farklı yapılarla karşımıza çıkmaktadır. Şekil 3.1’de bu spiral yapıları tasarımlardan bazı örnekler sunulmuştur. Logaritmik periyodik antenler çubuklu yapısı gereği doğrusal polarizasyona sahiptirler ve yerleşim şekline göre yatay ve dikey polarizasyon için kullanılabilirler [60]. Spiral tasarımlar ise genelde dairesel polarizasyona sahiptir [60].



Şekil 3.1: Düzlemsel spiral geniş bantlı anten türleri.

Bu tür spiral geniş bantlı EM dalga algılayıcıları askeri ve özel bazı uygulamalarda, kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanılmaktadır. Baskılı devre plaketi üzerinde yapımları gerçekleştirilebilir. Merkez noktalarından yapılacak uygun YF bağlantısı sayesinde, verici uygulaması için beslenebilir ya da alıcı uygulaması için işaret alınabilir. Bu tez çalışması açısından bakıldığında en önemli avantaj, düzlemsel yapıya sahip oluşlarıdır. Güç transformatörü gibi, yüksek gerilime bağlı olarak ortaya çıkacak yüksek elektrik alanların ve yük birikimlerinin bulunacağı bir ortamda, en az yer kaplayacak ve sivrilik, çukurluk barındırmayacak bir EM KB algılayıcı tasarımı uygun olacaktır.

Şekil 3.1’de eşaçılı spiral olarak tanımlanan modeli ele alalım. Böyle bir yapı;

$$r = r_0 e^{a(\phi - \delta)} \quad (3.1)$$

ile tanımlanır [46, 60]. Burada; r ve ϕ bilinen kutupsal koordinatlardır. r_0 , a ve δ ise tasarım değişkenleridir ve sırasıyla uç bölgesinin büyüklüğü, spiral hızın tersi ve kol genişliğini belirler. Spiral, eğri üzerindeki tüm noktalarda yarıçap vektörü ile sabit bir açı yaptığından dolayı eşaçılıdır. EM dalga yaymak için (verici anten olarak yayınım) akımların akmasını sağlayacak bir gerilim kaynağı tarafından uyartılmalıdır. Bir bakış açısı, yayınımın çoğunun olduğu bölgeye ulaşıncaya dek akımların spiral kolları üzerinde dışarıya doğru akmasıdır. Başka bir bakış açısı ise, çalışma frekansında kollar arasındaki uzaklık yaklaşık yarım dalga boyu olana dek, spiral kollar arasındaki elektrik alan vektörünün dışarıya doğru hareket etmesidir. Bu bölgede rezonans oluşur ve güçlü bir yayınım ortaya çıkar. Bu bölgenin ötesinde akımlar ve alanlar hızla küçülür. Çalışma frekansındaki bir artma veya azalma, yalnızca yayınım bölgesini spiral boyunca içe veya dışa kaydırır, fakat dalgaboyu cinsinden etkin yayınım açıklığı değişmez. Sonuç olarak kendiliğinden bir ölçekleme oluşur ve antenin desen ve dalgadirenç özellikleri frekanstan neredeyse bağımsız kalır [46, 60].

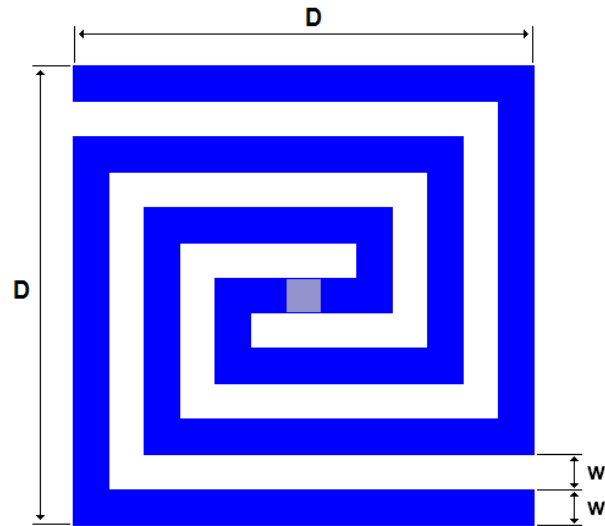
Bu noktada, anten teorisinin önemli bir kavramı olan karşılıklılık (resiprosite) önem kazanmaktadır. EM KB algılayıcı bir alıcı anten gibi çalışacaktır fakat yukarıda, geniş bantlı spiral yapıların verici anten gibi çalışmasından ve EM yayınım yapmasından bahsedilmiştir. Verici anten ile aynı özelliklere sahip eşdeğer bir alıcı anten, uzayda yayılan EM yayınımını, verici antenin kazancına eşit bir kazanç ile elektrik akımına dönüştürür. Yani bir antenin verici olarak çalışması ve EM yayınım yapması ile ilgili tüm özellikleri, aynı antenin alıcı olarak çalışması ve EM yayınımını elektrik akımına dönüştürmesi durumu ile birebir aynıdır. Bu duruma karşılıklılık kuralı denir [46, 60-62]. Bu kuralı iki madde ile özetlersek;

- Alıcı modunda çalışan bir antenin eşdeğer üreteç dalga direnci, verici modunda antenin giriş dalga direncine eşittir.
- Bir antenin alıcı olarak doğrultusal deseni, verici modundaki yayınım deseni ile aynıdır.

Bu kural sayesinde EM yayını yapacak (verici) ya da EM yayını algılayacak (alıcı) anten ve benzeri yapıların analizinde, işlevinden bağımsız olarak aynı yöntemler uygulanabilir.

Yukarıda belirtildiği üzere, frekanstan bağımsız anten kavramı için tasarım değişkenlerinde hiçbir karakteristik uzunluk belirtilmeyip tümüyle açılar ile tanımlamalar yapılmalıdır. Fakat buna uygun olan tasarımların (Şekil 3.1’de görülen dairesel spiral yapılar) çizim ve özellikle tez çalışması için üretim aşamalarında bazı kısıtlamalar, imkansızlıklar yaşanmıştır.

Bu noktada EM KB algılayıcı tasarımı için, frekanstan bağımsız anten tasarımları içinde son dönemde literatürde de yer almakta olan karesel Arşimed düzlem spiral algılayıcıların kullanılmasına karar verilmiştir. Tasarım değişkenlerinde karakteristik uzunluk belirtilmemesi durumu tam olarak sağlanamasa bile, frekanstan bağımsız çalışma şartını belirli bir frekans aralığı için sağlayabilmektedir [53, 63-65]. Bunun yanında bir diğer avantaj ise, karesel düzlem spiral yapının polarizasyonunun adeta karma bir yapıda oluşudur [63, 64]. Bu durum, özellikle KB sonucu ortaya çıkacak, tanımlanması zor ve kaotik bir EM işaretin algılanması açısından avantaj oluşturmaktadır.

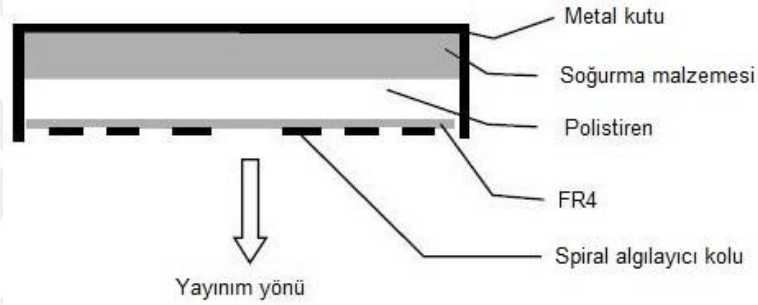


Şekil 3.2: Karesel Arşimed düzlem spiral algılayıcı tasarımı.

Yapımı gerçekleştirilecek karesel spiral algılayıcının tasarım parametreleri Şekil 3.2’de görülmektedir. Burada; D en büyük dış kenar ölçüsünü, w ise kol ve kollar arası

genişliği göstermektedir. Tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde anlatılacak analizler için bu değişkenler kullanılacaktır.

Yukarıda bahsedilen tüm düzlemsel spiral algılayıcıların yayılım deseni çift yönlüdür. Örneğin baskılı devre plaketi gibi bir yapı üzerinde oluşturulduklarında yayılım deseninin ana lobu, plaketin her iki tarafında ve plaket düzlemine dik bir şekilde yer alacaklardır [63]. Yapılması istenen EM KB algılayıcıların sadece yönlendirildikleri bölgede oluşacak KB kaynaklı EM dalga yayılımına karşı duyarlı olması istenmektedir. Bunu elde etmek için literatürde mevcut olan en uygun yöntem, baskılı devre plakentinin bir metal kutu içine yerleştirilmesidir [66-68]. Metal kutu sayesinde, plaketin arka tarafına doğru olan yayılım lobu bastırılır ve sadece n taraftaki desen kalır.



Şekil 3.3: Metal kutu içine yerleştirilen düzlem spiral algılayıcı yapısının yan kesiti.

Yine literatürde görülen bir uygulama da, metal kutu içinde baskılı devre plakentinin altına soğurma özellikli bir malzeme plakasının (genelde ferrit malzeme) yerleştirilmesidir. Bu soğurma malzemesinin kullanılması, algılayıcı (anten) parametrelerinin daha iyi olmasını sağlamaktadır [66]. Ferrit malzemenin etkileri ve alınan sonuçlar, tez çalışmasının ileri bölümlerinde sunulmuştur. Baskılı devre plakentinin, metal kutu ve ferrit soğurma tabakası ile birlikte olan yerleşim düzeninin kesiti Şekil 3.3’de görülmektedir. Baskılı devre plaketi (FR4 türünde) ile ferrit soğurma malzemesi arasında boşluk oluşturmak amacı ile polistiren (köpük olarak bilinen malzeme) kullanılmıştır. Polistiren kalınlığı değiştirilerek boşluk miktarının ayarlanması mümkün olmuştur.

3.1.1. Bilgisayar Kullanılarak Yapılan Analizler

EM dalga yayılımı ve bu dalgaların algılanması ile ilgili tüm süreçlerin arka planında Maxwell denklemleri geçerlidir [46, 47, 60]. En basitinden bir çubuk (dipol) antenin

sayısal analizi bile oldukça karmaşık işlemler gerektirir ve tam çözümün elde edilmesi zordur. Çözüm süreçleri karmaşık diferansiyel denklemlerin çözümünü gerektirir. Bu nedenle EM alan ve dalga konularındaki problemlerin belirli bir yaklaşıklıkla çözülebilmesi için çeşitli sayısal yöntemler geliştirilmiştir. En bilinenleri; Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM – Finite Element Method), Sonlu Farklar Yöntemi (FDM – Finite Difference Method), Sınır Elemanları Yöntemi (BEM – Boundary Element Method) ya da diğer bir adıyla MOM – Method of Moments) şeklindedir [60].

Tez çalışmasında EM KB algılayıcı tasarımının bilgisayar analizleri için Ansoft firmasının ürünü olan HFSS (High Frequency Structural Simulator) kullanılmıştır. Bu programın hesaplama tekniği sonlu elemanlar yöntemine dayanmaktadır. İki boyutlu analiz programlarının üçgenler ile ağ oluşturma yöntemine karşılık, HFSS programı tam olarak üç boyutlu analiz işlemi gerçekleştirmektedir. Bu işlem için, çizim araçları ile tasarımı gerçekleştirilen yapıda tetrahedral elemanlar (dört üçgenden oluşan çok yüzlü) ile ağ oluşturulması gerekmektedir. Bu işleme bir örnek Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4: FEM analizi için tetrahedral elemanlar ile ağa bölünmüş örnek bir yapı.

Analizi yapılacak modelin ne kadar çok detayı çizilir ve tanımlanırsa ve ne kadar çok tetrahedral eleman ile ağ oluşturulursa, sonuçlar da o kadar gerçeğe yakın ve doğru olmaktadır. Fakat böyle bir analiz de çok daha fazla işlem gücü gerektirir (güçlü bir bilgisayarın kullanılması, yüksek işlemci hızı, birden fazla işlemci çekirdeği, daha fazla RAM hafıza) ve daha uzun zaman alır.

Tasarım parametreleri olarak belirlenen ve analizlerde değişken olarak kabul edilecek büyüklüklerin seçilmesi ve değişken olarak alacakları değerlerin belirlenmesi, belirli bir mantık çerçevesinde yapılmalıdır. Örneğin Şekil 3.2’de verilen karesel spiral algılayıcının D en büyük dış kenar ölçüsü, EM KB algılayıcının yapımında kullanılacak

malzeme ve üretim imkanları düşünülerek 75 mm seçilmiştir. Ayrıca D dış kenar ölçüsü, spiral kollarının en büyük dolanım çevre uzunluğunu doğrudan etkilediği için EM KB algılayıcının çalışabileceği en düşük frekans değerini belirleyen bir etkendir [46, 60].

Bunun yanında, yine EM yayılımı konusu için önemli bir kavram olan yakın alan / uzak alan (far field / near field) tanımlamaları da, antenler için en geniş dış ölçü üzerinden bir yaklaşımla belirlenmektedir. EM dalga yayılımı yapan anten benzeri yapıların, kendisinden belirli bir uzaklığa kadar olan bölgede Maxwell denklemleri tam olarak geçerli değildir. Bu bölgede, EM dalgayı oluşturan E (elektrik alan) ve H (manyetik alan) alan bileşenleri bir düzlem içinde değildirler, düzlem dalga karakteri göstermezler [46]. Daha çok reaktif enerji birikimi olan bu bölgeye yakın alan denilmektedir. Bu belirli uzaklığın ötesindeki bölgeye ise uzak alan denir ve bu bölgede Maxwell denklemleri tam olarak geçerlidir. Çünkü bu bölgede, EM dalganın yayılım yönüne dik bir düzlemde, E ve H alan bileşenleri birbirlerine dik (90° açı ile) olarak düzlem dalga (plane wave) oluştururlar [46]. Daha önce belirtilen karşılıklılık kuralı gereği aynı alanlar, alıcı olarak çalışan bir anten için de geçerlidir. Dolayısı ile EM KB algılayıcının yakın alan / uzak alan bölgelerini tanımlamak gerekir.

EM dalga yayılımının frekansı ile dalga boyu arasındaki ilişki;

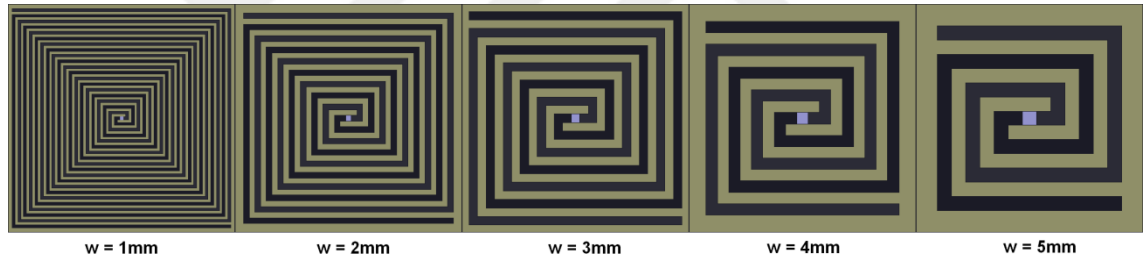
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.2)$$

ile ifade edilir. Burada; λ dalga boyu, f frekans, c ise ışık hızıdır. KB sonucu ortaya çıkan EM dalga yayılımının en çok yoğunlaştığı frekans bölgesini 500 MHz - 1.5 GHz olarak kabul edilirse, denklem (3.2) kullanılarak; $\lambda_{alt} = \frac{c}{f_{alt}} = \frac{3 \cdot 10^8}{500^6} = 0.6$ m ve $\lambda_{üst} = \frac{c}{f_{üst}} = \frac{3 \cdot 10^8}{1500^6} = 0.2$ m bulunur. Önceden belirtildiği gibi EM KB algılayıcının dış kenar ölçüsü $D = 75$ mm alınır, $D < \lambda$ şartını sağlayan ve düşük kazançlı anten sınıfına giren EM KB algılayıcı için yakın / uzak alan ayırma noktası;

$$R = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (3.3)$$

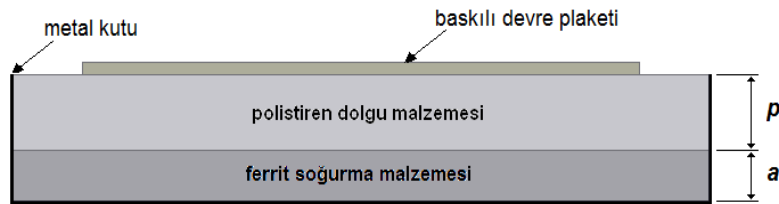
olmaktadır [46]. Burada R uzak alan başlangıç mesafesidir. Bu durumda denklem (3.3) kullanılarak; $f_{alt} = 500$ MHz için uzak alan $R = \frac{0.6}{2\pi} \cong 0.095$ m ve $f_{üst} = 1.5$ GHz için uzak alan $R = \frac{0.2}{2\pi} \cong 0.032$ m olmaktadır. Diğer bir deyişle 500 MHz - 1.5 GHz frekans aralığı için EM KB algılayıcının uzak alan bölgesinin başlangıcı 9.5 cm - 3.2 cm aralığında olmaktadır.

Şekil 3.2'de w ile gösterilen spiral kollar ve kollar arası genişliğin alabileceği farklı değerler için HFSS analiz modelleri oluşturulmuştur. Şekil 3.5'de görülen bu modeller için w genişlik parametresi 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm ve 5 mm olarak seçilmiştir. Bu değerlerin seçiminde, üretim sürecinin getirdiği kısıtlamalar ve yukarıda bahsedilen çalışma mantığına uygunluk kriterleri ön plandadır. 1 mm'nin altındaki üretimlerde düzgün sonuç alınamamaktadır. Spiral kol genişliğinin 5 mm'nin üstünde olması ise, ileri bölümlerde verilmiş sonuçlarda da görüleceği üzere kullanışlı değildir.



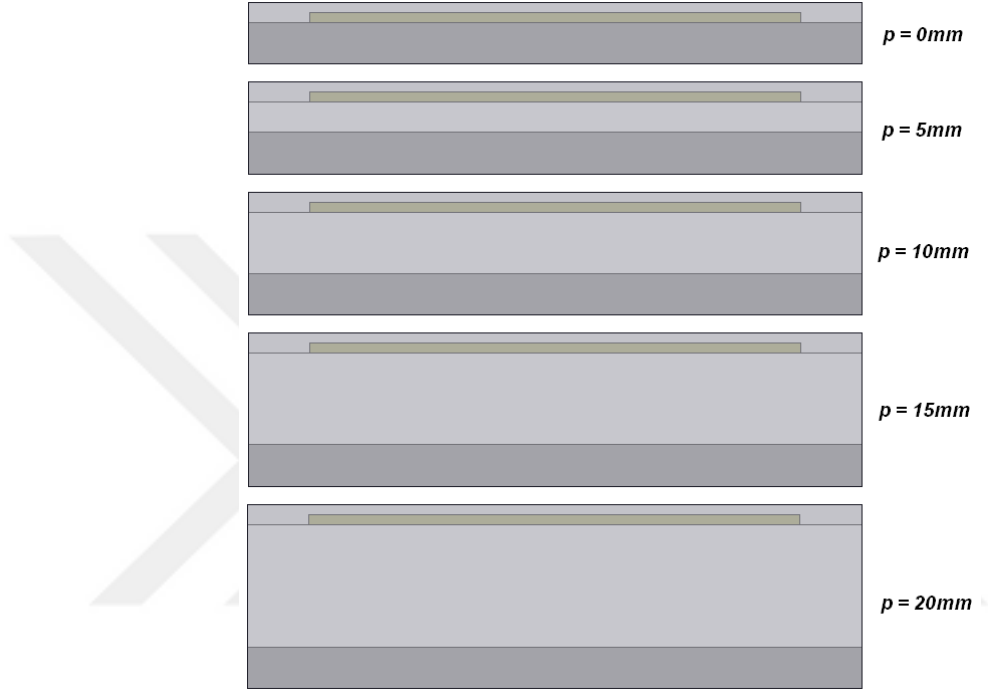
Şekil 3.5: Gerçekleştirilen HFSS analizlerinde algılayıcı kol genişliğine bağlı modeller.

Şekil 3.3'de metal kutu içine yerleştirilen spiral algılayıcının yanal kesiti verilmiştir. Bu yapıda ele alınabilecek iki ayrı boyutsal değişken bulunmaktadır. Birincisi ferrit soğurma malzemesinin kalınlığı a , ikincisi de polistiren dolgu malzemesinin kalınlığı p 'dir. Bu değişkenler Şekil 3.6'da görülmektedir. Uygulama aşaması ile ilgili bölümlerde verildiği üzere, temin edilebilen ferrit malzemenin kalınlığı 6.2 mm'dir. Bu nedenle HFSS analizlerinde $a = 6.2$ mm (sabit) olacaktır.



Şekil 3.6: Metal kutu içine yerleşimin kesitine bağlı HFSS analiz parametreleri.

Diğer parametre olan polistiren dolgu malzemesi kalınlığı için analiz değerleri ise; 0 mm, 5 mm, 10 mm, 15 mm ve 20 mm olarak seçilmiştir. Dolgu malzemesi kalınlığının değişimi sayesinde, spiral algılayıcı kollarını üzerinde bulunduran baskılı devre plaketi ile ferrit soğurma plakası arasındaki mesafe ayarlanabilmektedir. Dolgu malzemesi kalınlığı p 'nin değişimine bağlı olarak elde edilen modeller Şekil 3.7'de verilmiştir.

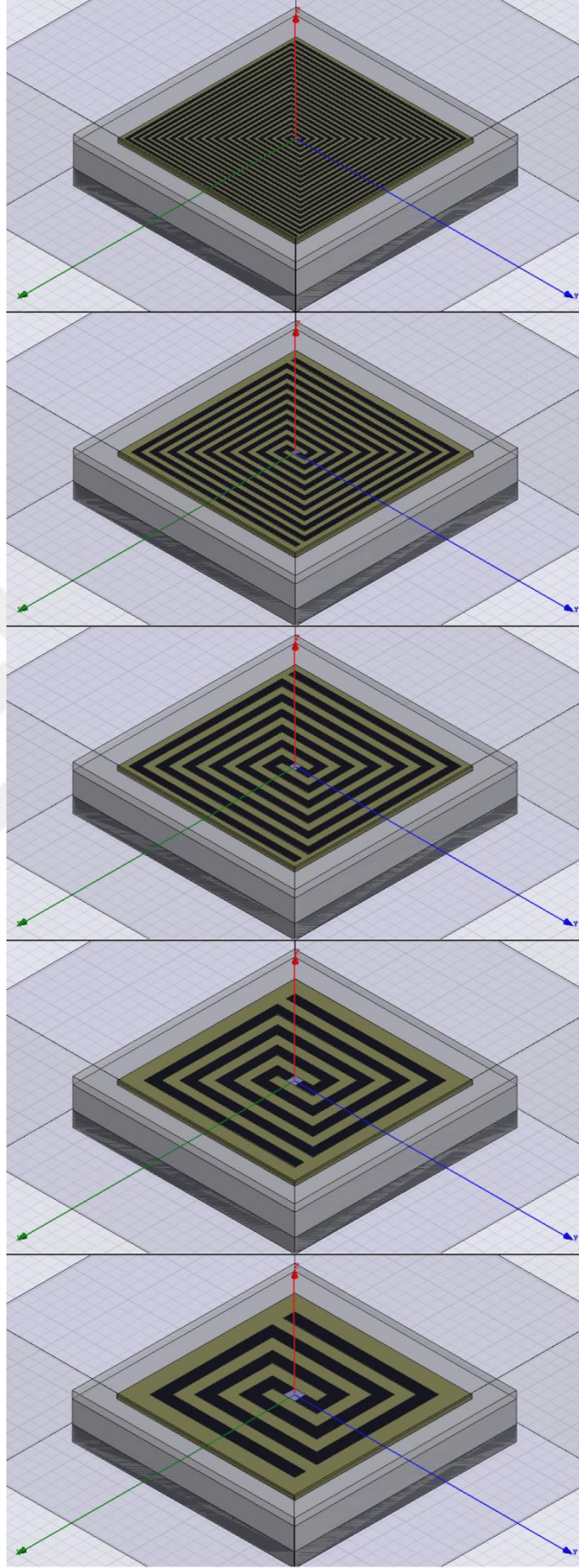


Şekil 3.7: Gerçekleştirilen HFSS analizlerinde dolgu malzemesi kalınlığına bağlı modeller.

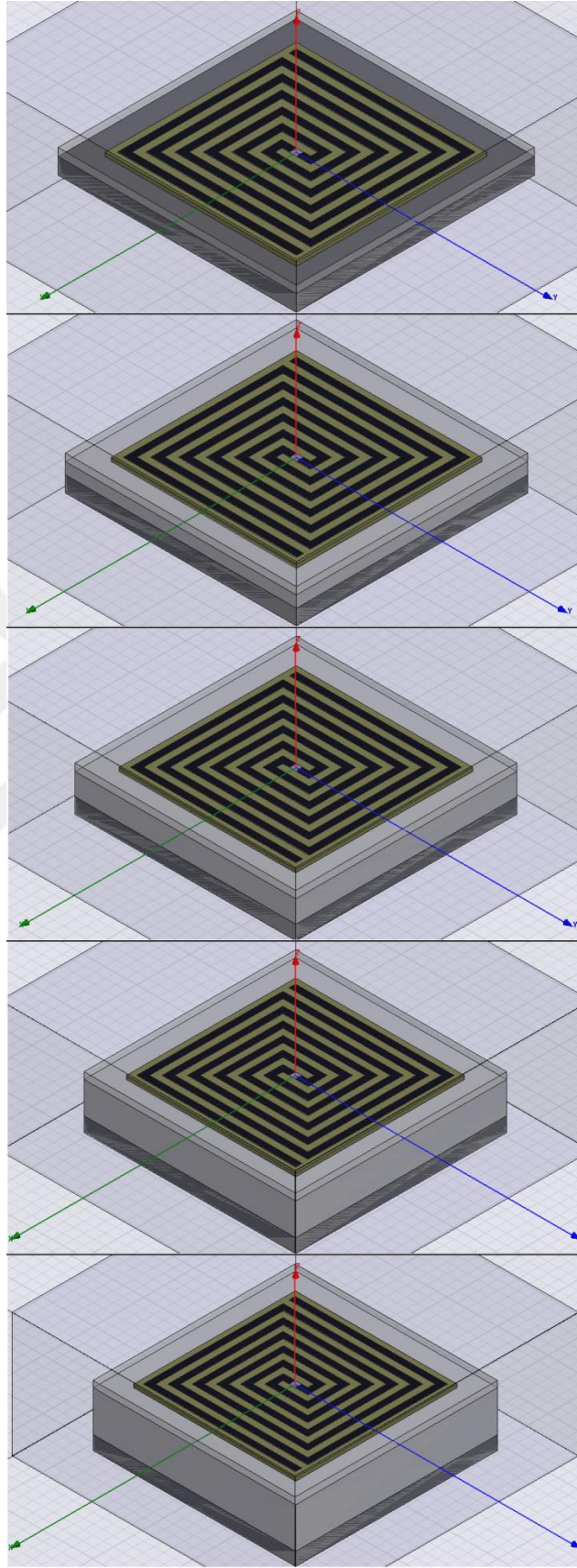
Analiz işlemlerinin yapılacak gerçek uygulamalar ile uyumlu sonuçlar vermesi açısından, imalat imkanları ve malzeme temin edilebilirliği kriterleri de göz önüne alınarak analiz modelleri oluşturulmuştur. Değişken olarak belirlenen ve aldığı farklı değerlere göre sonuçları incelenen iki temel boyutsal parametre ortaya çıkmaktadır. Bunlardan birincisi w algılayıcı kol genişliği, ikincisi ise p dolgu malzemesi kalınlığıdır. İlk aşamada $p = 10$ mm sabit tutulup, w değişkeni 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm ve 5 mm olarak değiştirilmiştir. Bu durum için HFSS programında oluşturulan tam analiz modelleri Şekil 3.8'de görülmektedir. İkinci aşamada $w = 3$ mm sabit tutulup, p değişkeni 0 mm, 5 mm, 10 mm, 15 mm ve 20 mm olarak değiştirilmiştir. Bu durum için HFSS programında oluşturulan tam analiz modelleri de Şekil 3.9'da görülmektedir.

Analizlerde HFSS programının 12.1 sürümü kullanılmıştır. Windows 7 (64bit) işletim sistemi kurulu, 8GB RAM bellek ve 2.8GHz'lik 6 çekirdekli AMD Phenom II X6 1055T işlemciye sahip bir bilgisayar üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Her bir analiz modeli, ortalama 30000 tetrahedral eleman ile ağı bölünmüş, iteratif işlemlerin sonuçlanması için programda ΔS parametresi 0.01 olarak girilmiştir. Her bir model ortalama olarak yaklaşık 12 iterasyon sonrasında $\Delta S < 0.01$ durumuna erişmiş ve analiz sonuçlanmıştır. Her bir modelin ortalama analiz süresi 6-7 saat kadar sürmüştür.





Şekil 3.8: Analiz modelleri: $p = 10$ mm (sabit), $w = 1, 2, 3, 4, 5$ mm (değişken).



Şekil 3.9: Analiz modelleri: $w = 3$ mm (sabit), $p = 0, 5, 10, 15, 20$ mm (değişken).

HFSS programı analizleri, EM PD algılayıcı sanki bir verici antenmiş ve girişine YF güç uygulanıyormuş gibi yapmaktadır. Karşılıklılık kuralı gereği elde edilen sonuçlar, EM PD algılayıcının bir alıcı anten gibi çalıştığı durum için de geçerlidir. Analizler 500 MHz - 1.5 GHz frekans aralığında, 200 doğrusal frekans adımında yapılmış ve aşağıdaki parametreler incelenmiştir:

- Maksimum kazanç (max. gain)
- Minimum kazanç (min. gain)
- Maksimum yayınım yoğunluğu (max. U)
- Yönlülük (peak directivity)
- Kazanç (peak gain)
- Gerçeklenen kazanç (peak realized gain)
- Yayınım gücü (radiated power)
- Kabul edilen güç (accepted power)
- Uygulanan güç (incident power)
- Yayınım verimliliği (radiation efficiency)
- Ön-arka oranı (front to back ratio)
- Yayınım deseni (radiation pattern)
- Yansıma kaybı (return loss)
- Duran dalga oranı (VSWR – voltage standing wave ratio)
- Kapı empedansı (gerçek ve sanal)

Analiz sonuçlarında yer alan bu parametrelerin öncelikle açıklanması gereklidir.

Maksimum kazanç (max. gain): Yayınım deseninde gözlenen (antenin verebildiği) en yüksek kazanç değeridir, birimi dB (decibel)'dir.

Minimum kazanç (min. gain): Yayınım deseninde gözlenen (antenin verebildiği) en düşük kazanç değeridir, birimi dB (decibel)'dir.

Maksimum yayınım yoğunluğu (max. U): Katı açı (solid angle) başına antenden yayınlanan ya da algılanan güçtür, birimi W/sr (watt/steradian)'dir.

Yönlülük (peak directivity): Antenin en yüksek yayınım yaptığı yöndeki gücünün ortalama yayınım gücüne oranıdır, birimsizdir. Yönlülük,

$$D = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (3.4)$$

ile tanımlanır. Burada D yönlülük, U_{max} maksimum yayınım yoğunluğu, P_{rad} yayınım gücü olmaktadır.

Kazanç (peak gain): Anten tarafından kabul edilen güç ile hesaplanan kazanç değeridir, oran olduğu için birimsizdir. Kazanç,

$$G_p = \frac{4\pi U_{max}}{P_{acc}} \quad (3.5)$$

ile tanımlanır. Burada G_p kazanç, U_{max} maksimum yayınım yoğunluğu, P_{acc} kabul edilen güçtür.

Gerçeklenen kazanç (peak realized gain): Antene uygulanan güç ile hesaplanan kazanç değeridir, oran olduğu için birimsizdir. Gerçekleşen kazanç,

$$G_{pr} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{inc}} \quad (3.6)$$

ile tanımlanır. Burada G_{pr} gerçekleştirilen kazanç, U_{max} maksimum yayınım yoğunluğu, P_{inc} uygulanan güçtür.

Yayınım gücü (radiated power): Antenden yayımlanan zaman ortalamalı güç miktarıdır, birimi W (watt)'dır.

Kabul edilen güç (accepted power): Anten tarafından giriş noktasında kabul edilen zaman ortalamalı güç miktarıdır, birimi W (watt)'dır.

Uygulanan güç (incident power): Antene uygulanan toplam güç miktarıdır, birimi W (watt)'dır.

Yayınım verimliliği (radiation efficiency): Yayınım gücünün kabul edilen güce oranıdır, birimsizdir. Yayınım verimliliği,

$$e = \frac{P_{rad}}{P_{acc}} \quad (3.7)$$

ile tanımlanır. Burada e yayının verimliliği, P_{rad} yayının gücü, P_{acc} kabul edilen güçtür.

Ön-arka oranı (front to back ratio): Yayınım deseninin ön lobundaki en büyük kazancın (maksimum kazanç ile tanımlanan değer), bu değere tam 180° ters tarafta oluşan kazanç oranıdır. Bu kazançlar dB cinsinden olduğu için doğrudan farkları alınır ve sonuç yine dB olmaktadır.

Yayınım deseni (radiation pattern): Antenin yaydığı dB cinsinden gücün uzak alandaki değişimini, açıya bağlı ve grafiksel olarak gösterir.

Yansıma kaybı (return loss): Uygulanan güç ile geri yansıyan (kabul edilmeyen, reflected) güç arasındaki orandır. Anten ile yapılan elektriksel bağlantının empedans uyumunu gösterir, birimi dB'dir. Negatif yönde ne kadar büyük olursa, empedans uyumunun o kadar iyi olduğunu gösterir. Yansıma kaybı,

$$RL = 10 \log \frac{P_{ref}}{P_{inc}} \quad (3.8)$$

ile tanımlanır. Burada RL yansıma kaybı, P_{inc} uygulanan güç, P_{ref} geri yansıyan güçtür.

Duran dalga oranı (VSWR – voltage standing wave ratio): Yansıma kaybı gibi, anten ile yapılan elektriksel bağlantının empedans uyumunu gösterir, birimsizdir. Duran dalga oranı,

$$VSWR = \frac{1 + \sqrt{P_{ref}/P_{inc}}}{1 - \sqrt{P_{ref}/P_{inc}}} \quad (3.9)$$

ile tanımlanır. Burada $VSWR$ duran dalga oranı, P_{inc} uygulanan güç, P_{ref} geri yansıyan (reflected) güçtür. $VSWR = 1$ durumu mükemmel empedans uyumunu gösterir.

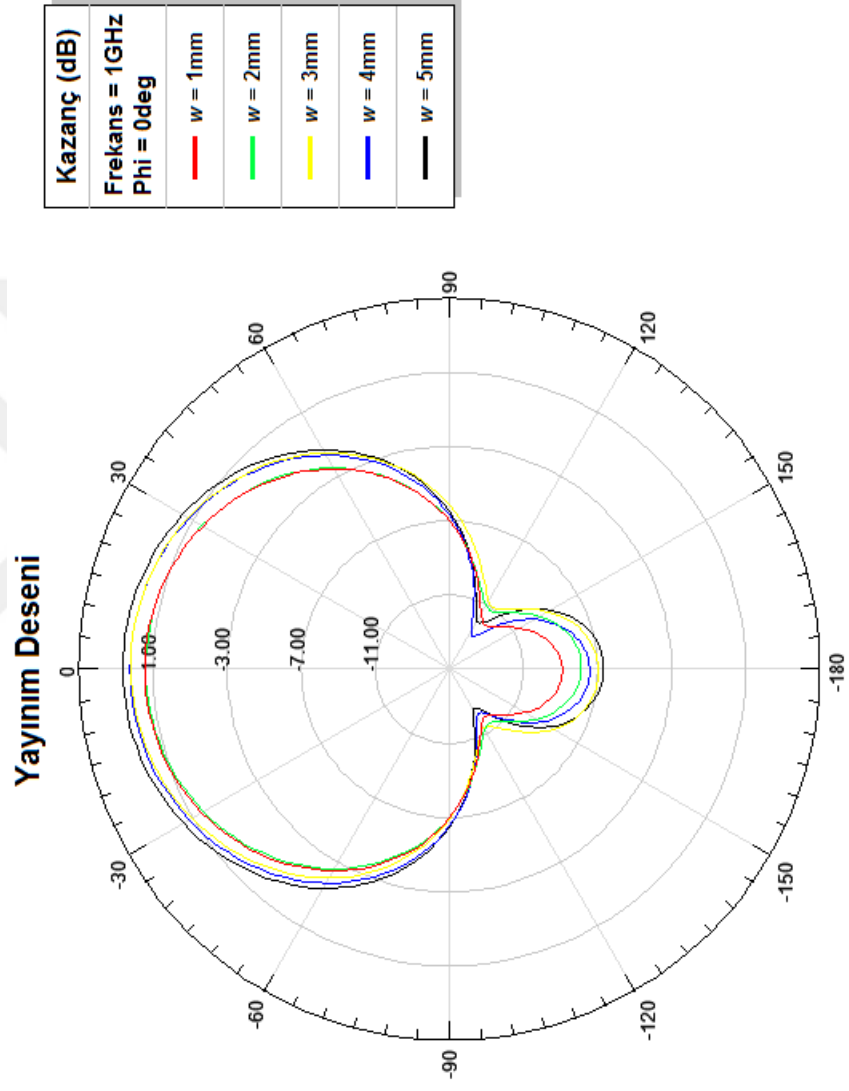
Kapı empedansı (gerçek ve sanal): Antenin besleme uçlarındaki gerilimin akıma oranıdır. Karmaşık olduğu için gerçek ve sanal bileşenlere sahiptir.

Tablo 3.1: HFSS analizleri sonucu anten parametreleri: $p = 10$ mm (sabit), $w = 1, 2, 3, 4, 5$ mm (değişken).

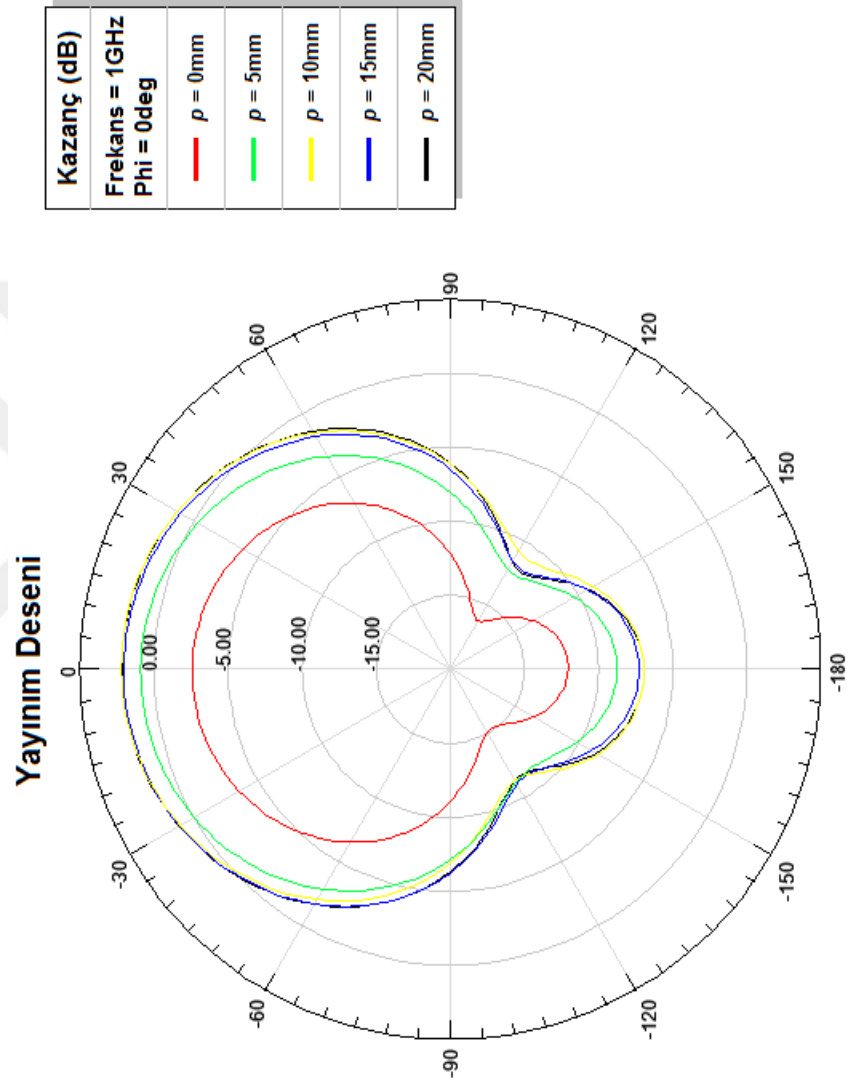
Absorbe Malzemesi Kalınlığı p (mm)	Spiral Kol Genişliği w (mm)	Maks. Kazanç (dB)	Min. Kazanç (dB)	Maks. Yayınım Yoğunluğu U (W/sr)	Yönlülük D	Kazanç G_p	Gerçeklenen Kazanç G_{pr}	Yayınım Gücü P_{rad} (W)	Kabul Edilen Güç P_{acc} (W)	Uygulanan Güç P_{inc} (W)	Yayınım Verimliliği ϵ	Ön-Arka Oranı
10	1	1.4436	-12.730	0.10645	3.8081	1.3943	1.3378	0.3513	0.9595	1	0.3662	10.843
	2	1.3993	-12.725	0.08645	3.7010	1.3802	1.0863	0.2935	0.7871	1	0.3729	8.4652
	3	2.2051	-12.217	0.09554	3.7146	1.6616	1.2006	0.3232	0.7226	1	0.4473	8.1891
	4	2.2457	-12.854	0.13035	3.6881	1.6772	1.6380	0.4441	0.9767	1	0.4547	9.2645
	5	2.6352	-12.548	0.11356	3.7351	1.8345	1.4270	0.3821	0.7779	1	0.4912	8.5128

Tablo 3.2: HFSS analizleri sonucu anten parametreleri: $w = 3$ mm (sabit), $p = 0, 5, 10, 15, 20$ mm (değişken).

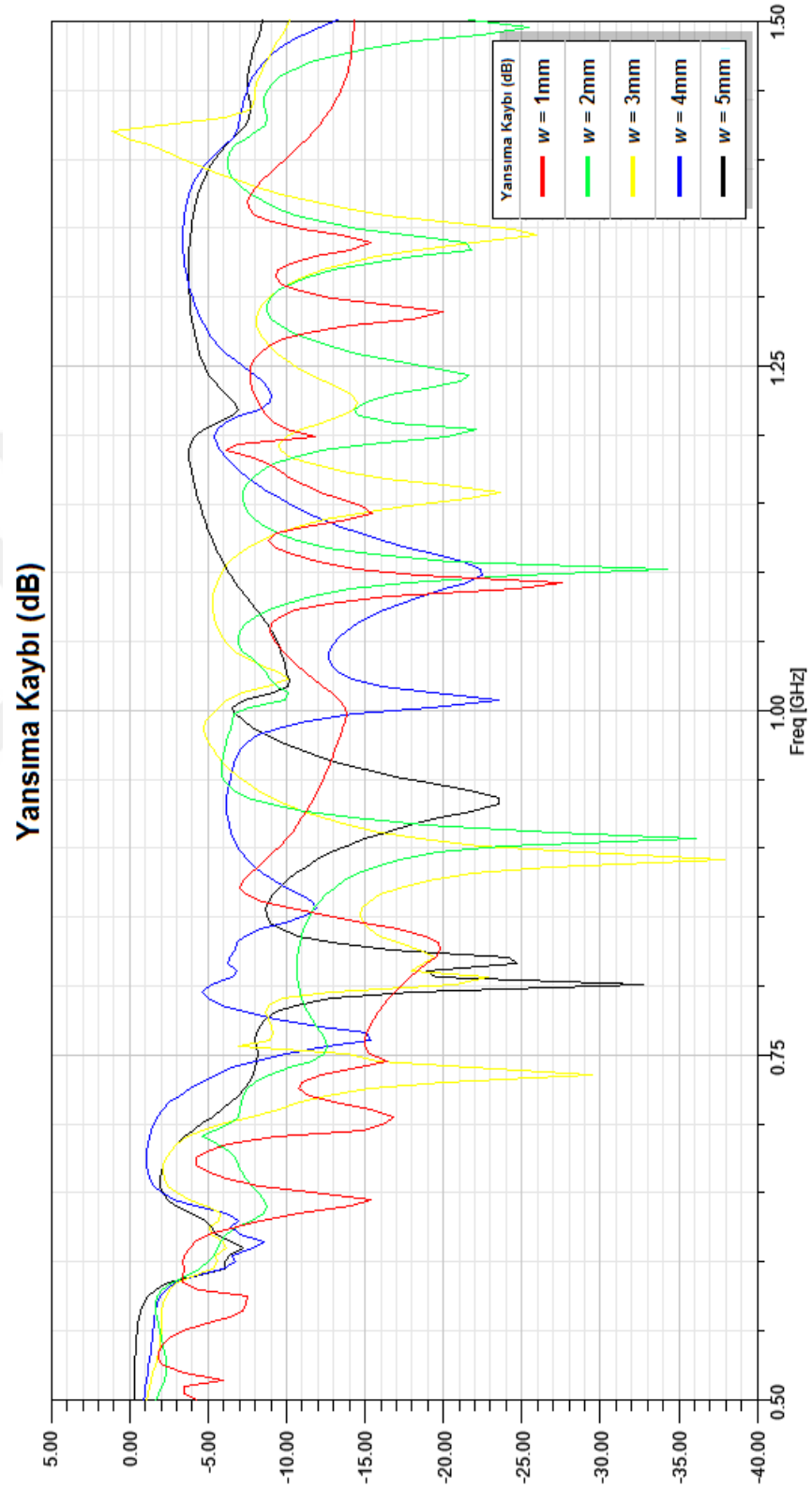
Spiral Kol Genişliği w (mm)	Absorbe Malzemesi Kalınlığı p (mm)	Maks. Kazanç (dB)	Min. Kazanç (dB)	Maks. Yayımlı Yoğunluğu U (W/sr)	Yönlülük D	Kazanç G_p	Gerçeklenen Kazanç G_{pr}	Yayımlı Gücü P_{rad} (W)	Kabul Edilen Güç P_{acc} (W)	Uygulanan Güç P_{inc} (W)	Yayımlı Verimliliği ϵ	Ön-Arka Oranı
3	0	-2.5845	-16.836	0.04113	3.7576	0.5515	0.5169	0.1376	0.9372	1	0.1468	8.8530
	5	0.9024	-13.191	0.07388	3.7384	1.2310	0.9284	0.2484	0.7542	1	0.3293	9.2342
	10	2.2051	-12.217	0.09554	3.7146	1.6616	1.2006	0.3232	0.7226	1	0.4473	8.1891
	15	2.0476	-12.521	0.08206	3.5955	1.6024	1.0312	0.2868	0.6436	1	0.4457	8.5796
	20	2.1653	-12.652	0.07804	3.5855	1.6464	0.9807	0.2735	0.5957	1	0.4592	8.1092



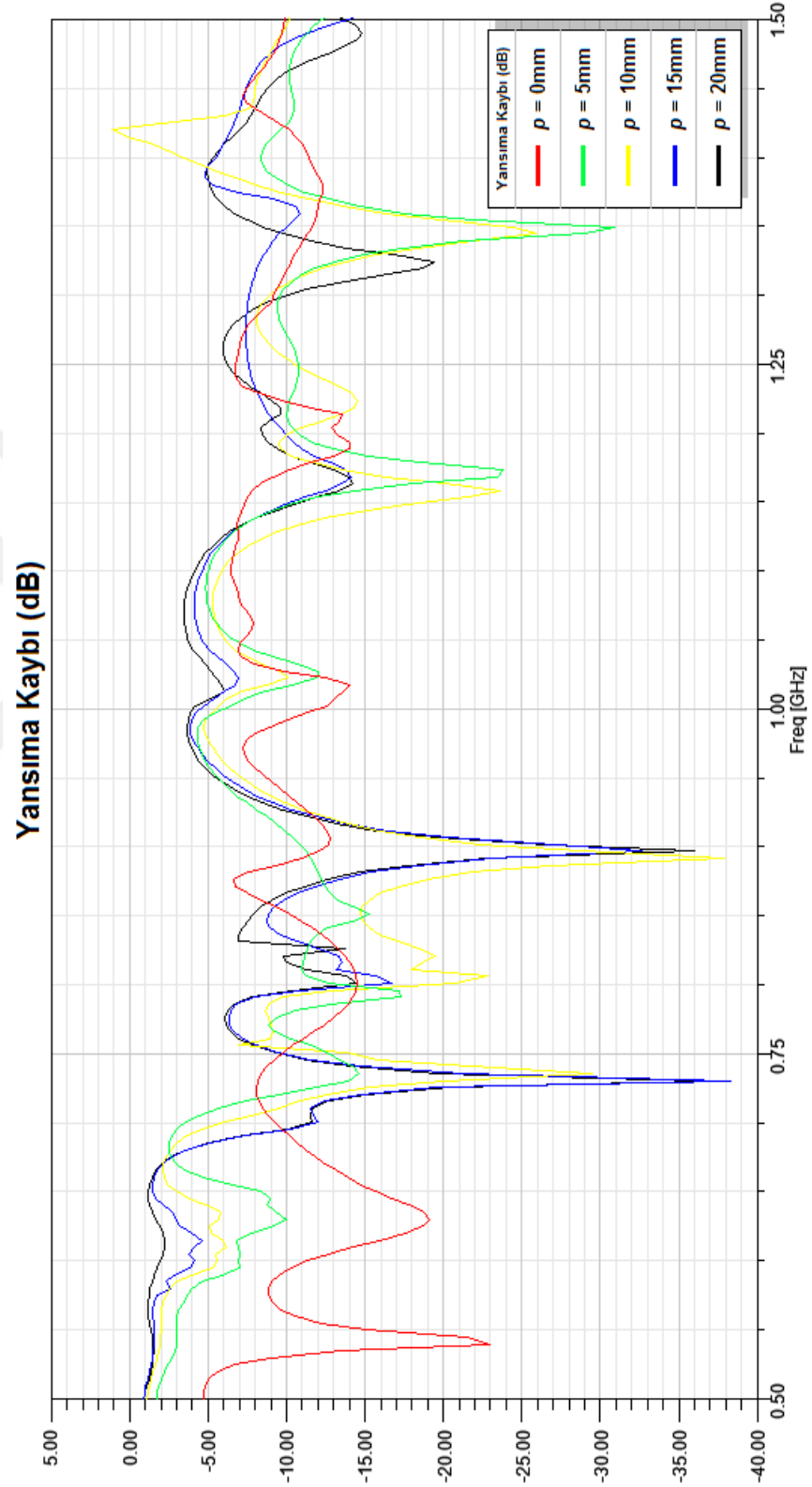
Şekil 3.10: Yayınım deseni: $p = 10$ mm (sabit), $w = 1, 2, 3, 4, 5$ mm (değişken).



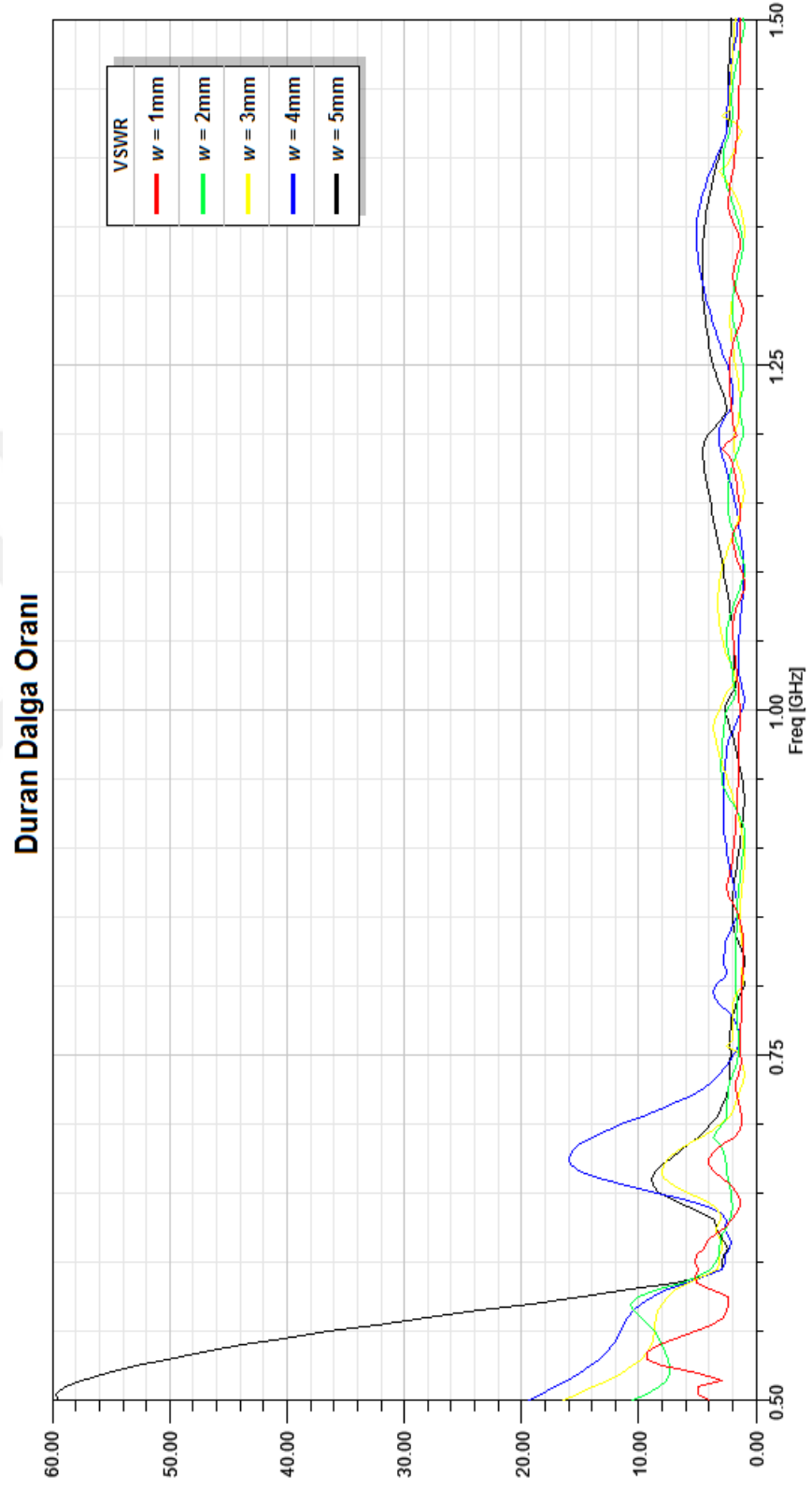
Şekil 3.11: Yayınım deseni: $w = 3\text{ mm}$ (sabit), $p = 0, 5, 10, 15, 20\text{ mm}$ (değişken).



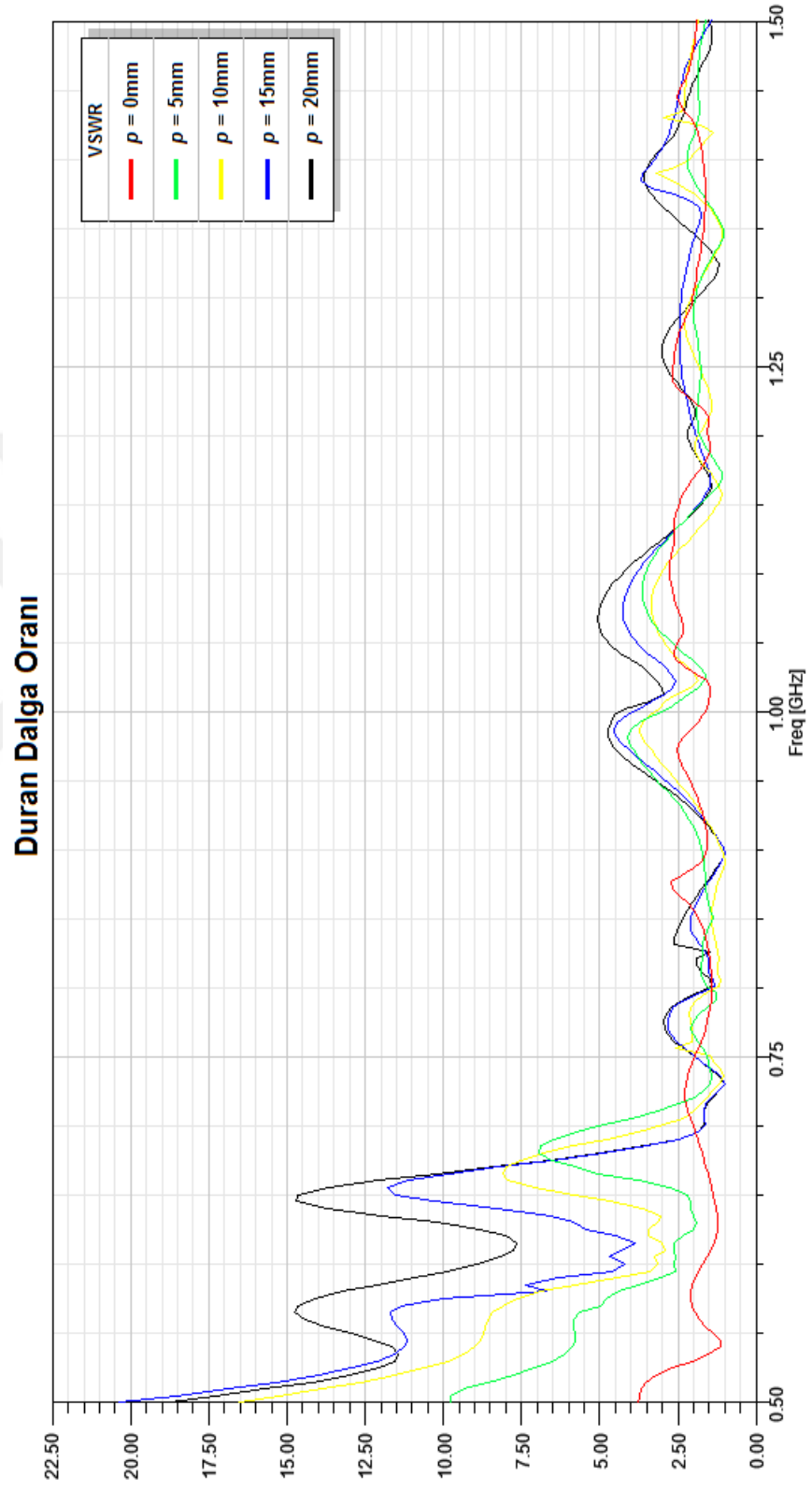
Şekil 3.12: Yansima kaybı: $p = 10$ mm (sabit), $w = 1, 2, 3, 4, 5$ mm (değişken).



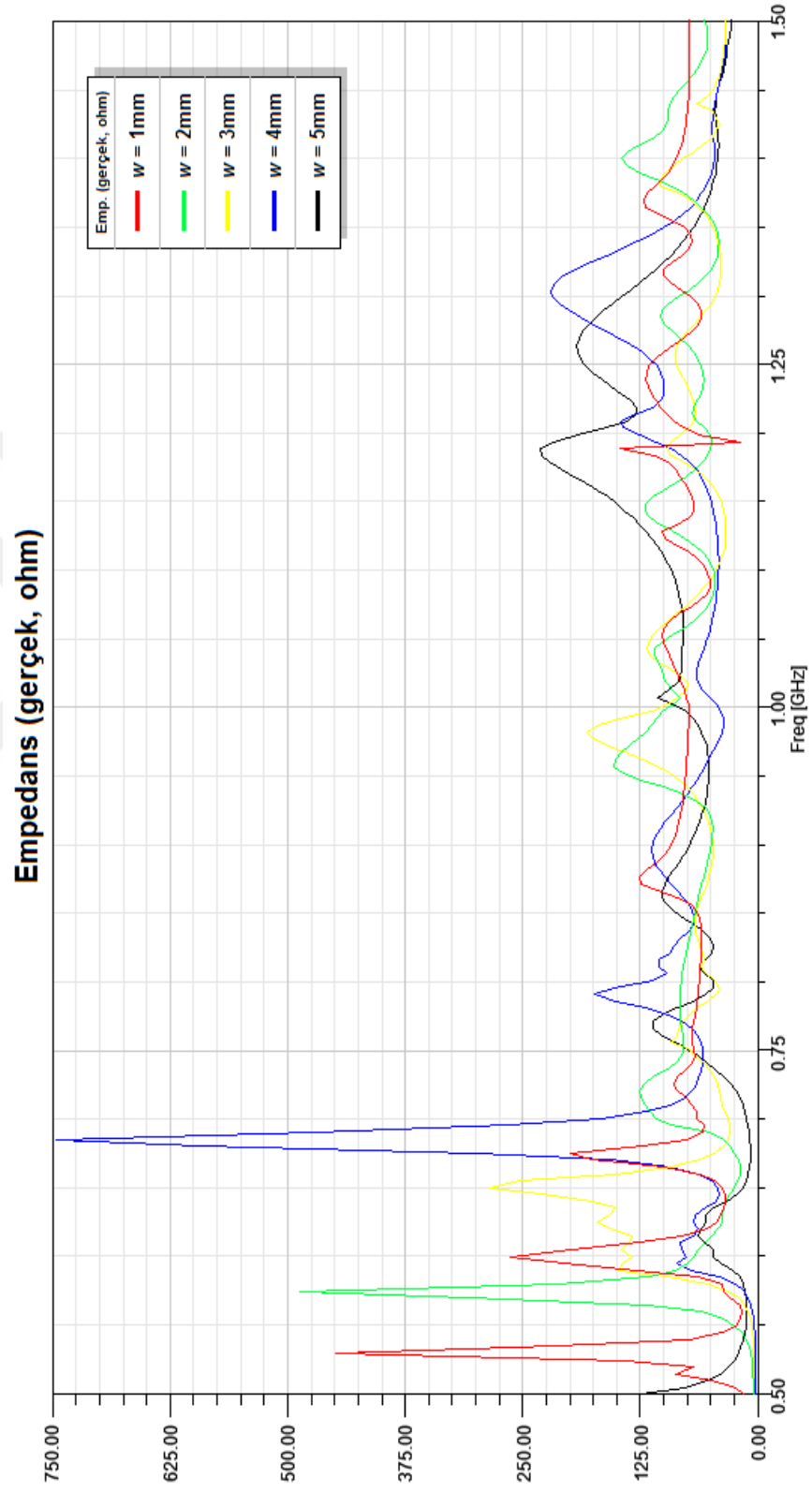
Şekil 3.13: Yansıma kaybı: $w = 3\text{ mm}$ (sabit), $p = 0, 5, 10, 15, 20\text{ mm}$ (değişken).



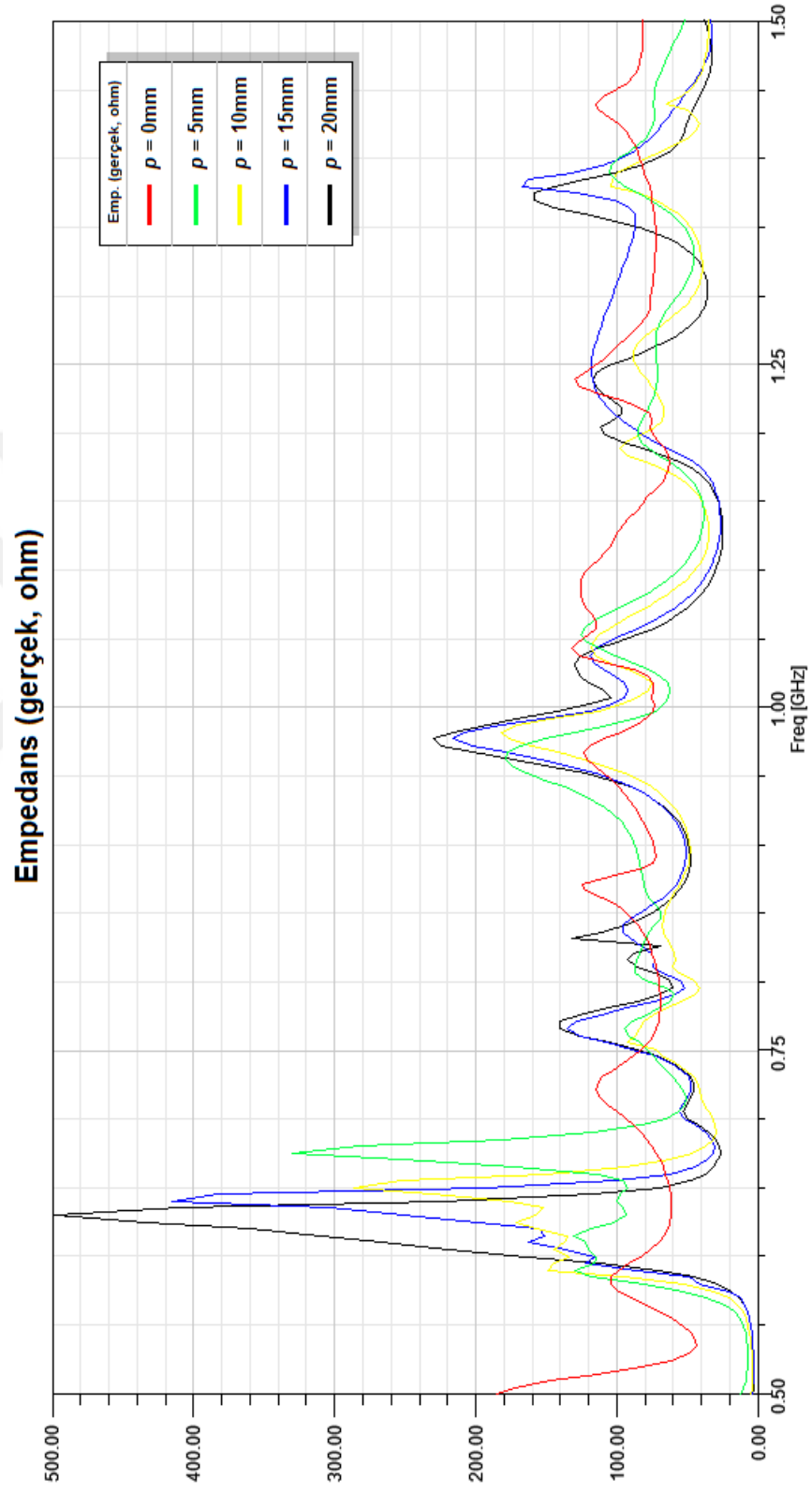
Şekil 3.14: Duran dalga oranı: $p = 10$ mm (sabit), $w = 1, 2, 3, 4, 5$ mm (değişken).



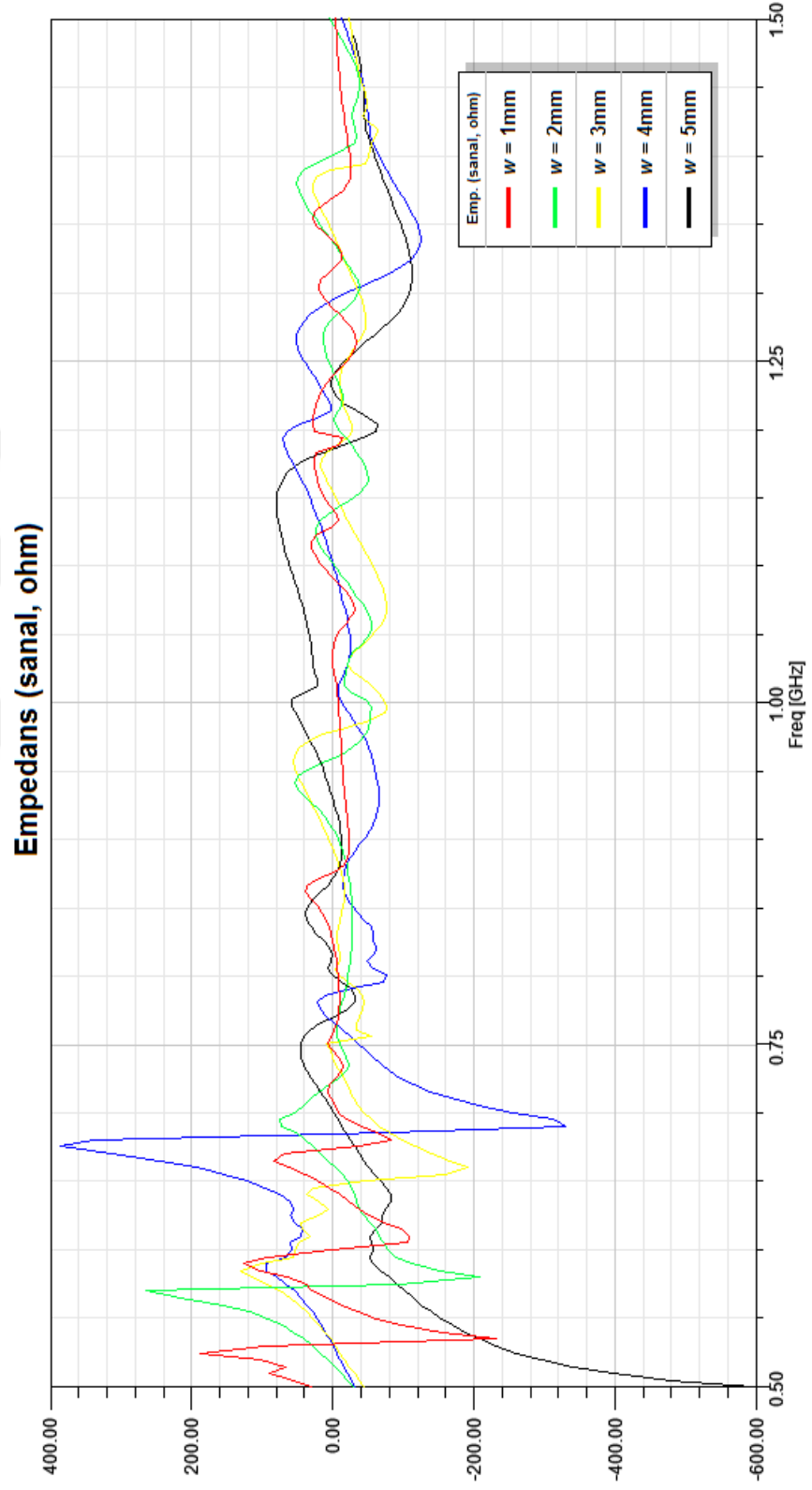
Şekil 3.15: Duran dalga oranı: $w = 3\text{ mm}$ (sabit), $p = 0, 5, 10, 15, 20\text{ mm}$ (değişken).



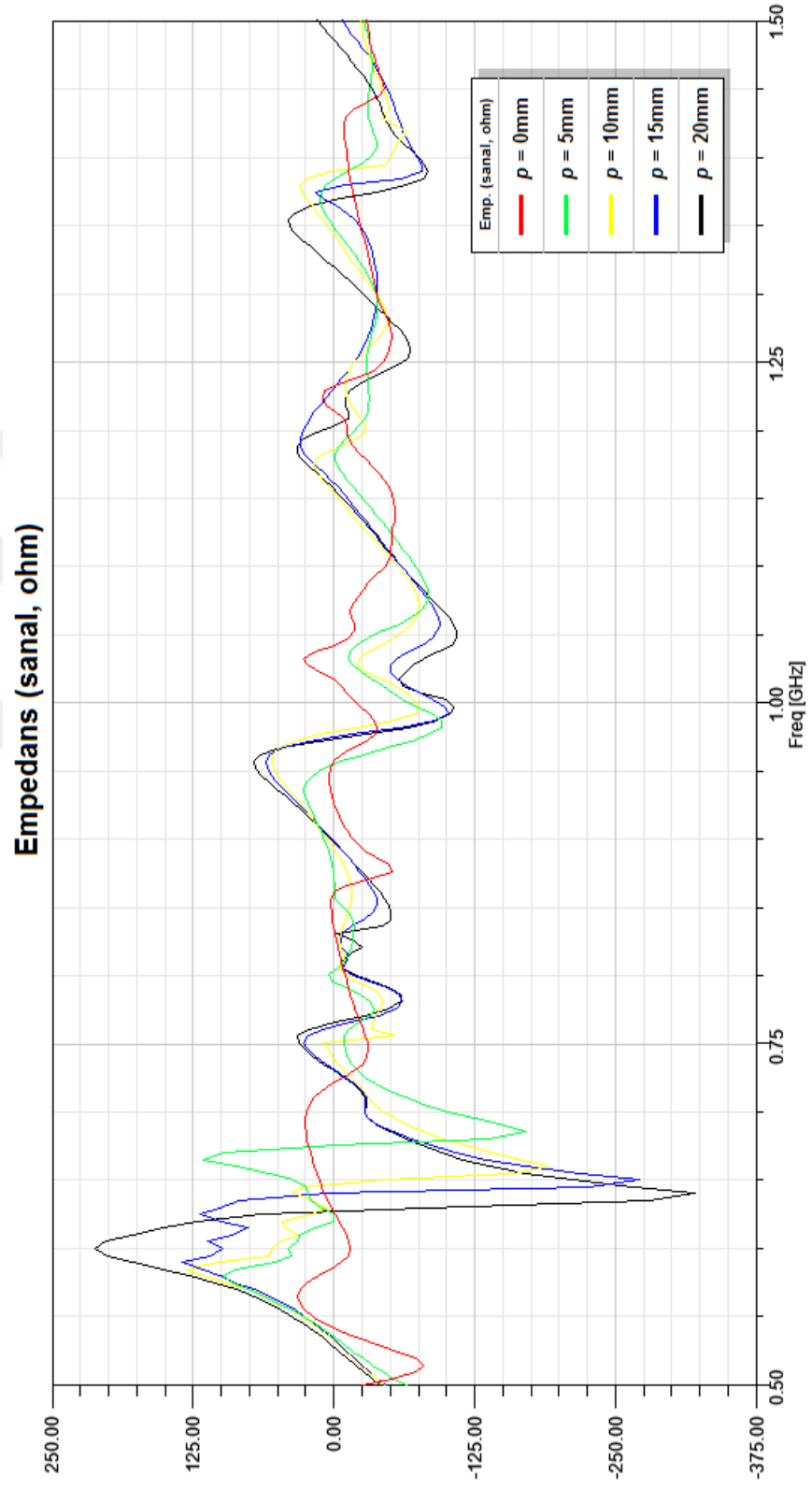
Şekil 3.16: Kapı empedansı (gerçek bileşen): $p = 10$ mm (sabit), $w = 1, 2, 3, 4, 5$ mm (değişken).



Şekil 3.17: Kapı empedansı (gerçek bileşen): $w = 3$ mm (sabit), $\rho = 0, 5, 10, 15, 20$ mm (değişken).



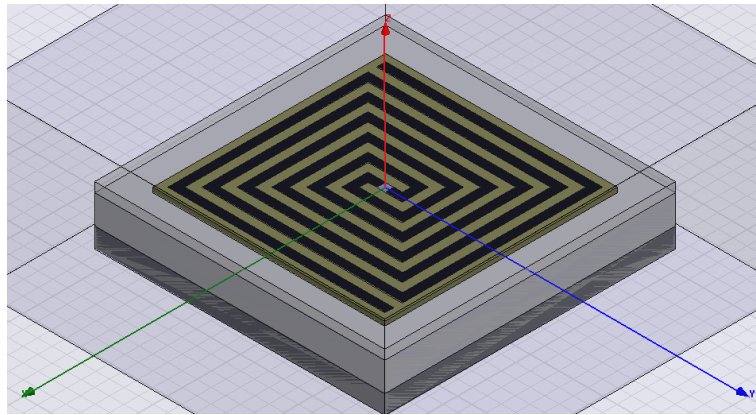
Şekil 3.18: Kapı empedansı (sanal bileşen): $p = 10$ mm (sabit), $w = 1, 2, 3, 4, 5$ mm (değişken).



Şekil 3.19: Kapı empedansı (sanal bileşen): $w = 3$ mm (sabit), $p = 0, 5, 10, 15, 20$ mm (değişken).

Yapılan HFSS analizlerinin sonucunda, $p = 10$ mm (sabit), $w = 1, 2, 3, 4, 5$ mm (değişken) modelleri için elde edilen anten parametreleri sonuçları Tablo 3.1’de, yayılım deseni Şekil 3.10’da, yansımaya kaybı Şekil 3.12’de, duran dalga oranı Şekil 3.14’de, gerçek kapı empedansı Şekil 3.16’da, sanal kapı empedansı Şekil 3.18’de verilmiştir. Benzer şekilde, $w = 3$ mm (sabit), $p = 0, 5, 10, 15, 20$ mm (değişken) modelleri için elde edilen anten parametreleri sonuçları Tablo 3.2’de, yayılım deseni Şekil 3.11’de, yansımaya kaybı Şekil 3.13’de, duran dalga oranı Şekil 3.15’de, gerçek kapı empedansı Şekil 3.17’de, sanal kapı empedansı Şekil 3.19’da verilmiştir.

Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de en yüksek değerler gri ile renklendirilmiş ve en uygun model olarak $p = 10$ mm, $w = 3$ mm seçilmiştir. Bu seçim tablolarda sarı renk kutu içinde görülmektedir. Tablo 3.1 tek başına değerlendirildiğinde en uygun seçenek, $w = 4$ mm gibi görünmektedir. Fakat Şekil 3.12’de görüldüğü gibi 3 mm’nin üzerinde yansımaya kaybı artmaktadır. Ayrıca Şekil 3.14’de duran dalga oranının büyüdüğü ve kötüleştiği, Şekil 3.16 ve Şekil 3.18’de ise kapı empedansının kötüleştiği görülmektedir. Tablo 3.2 değerlendirildiğinde ise en uygun seçenek, $p = 10$ mm’dir. İdeal koşullarda yansımaya kaybının mümkün olduğunca düşük, duran dalga oranının $VSWR \leq 2$ ve kapı empedansının $50+j0 \Omega$ olması istenir [46, 47]. Bu açıdan bakıldığında, $p = 0$ mm durumunda (baskılı devre plaketi ile ferrit soğurma malzemesi arasında hiç boşluk olmaması durumu) iyi sonuçlar alınmıştır. Fakat Tablo 3.2’de görüldüğü gibi kabul edilen güç (accepted power) çok yüksek iken (kapı empedans uyumu ve VSWR’nin çok iyi olması sonucu), yayılım gücü (radiated power) çok düşük kalmakta ve yayılım verimliliği (radiation efficiency) düşmektedir. Seçilen model Şekil 3.20’de verilmiştir.



Şekil 3.20: Seçilen analiz modeli: $w = 3$ mm , $p = 10$ mm.

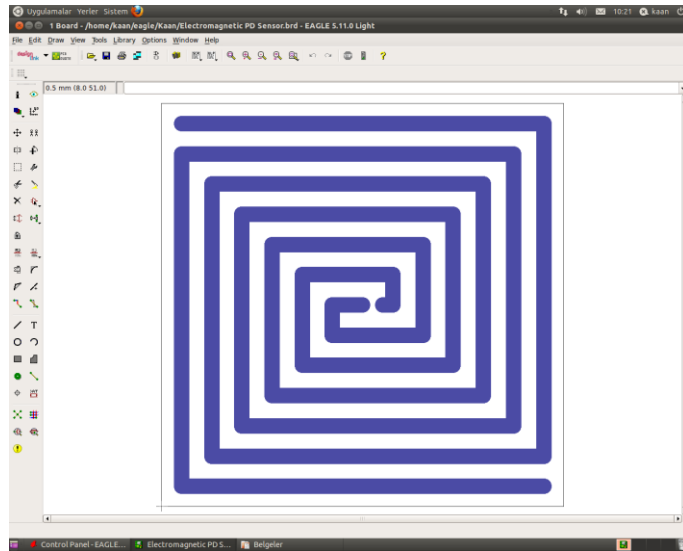
YF iletim hattının ideal 50Ω ile sonlandırıldığı durum düşünülür ise, $VSWR = 1$ olacağı bilinmektedir. Fakat iletilen enerjinin tümü ısıya dönüşecek ve ortada EM yayılım olmayacaktır [47]. Dolayısı ile $VSWR = 1$ durumu tek başına bir şey ifade etmemektedir. Sadece mükemmel bir empedans uyumunu gösterir. Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de verilen parametrelerden; yayılım gücü (radiated power, P_{rad}), kabul edilen güç (accepted power, P_{acc}) ve uygulanan güç (incident power, P_{inc}) arasındaki ilişki;

$$P_{inc} \xrightarrow{VSWR} P_{acc} \xrightarrow{e} P_{rad} \quad (3.10)$$

ile tanımlanır. Burada e , Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de verilen yayılım verimliliği (radiation efficiency) değeridir. Dolayısı ile (3.10) ile ifade edilen enerji dönüşümünde, uygulanan güç – kabul edilen güç geçişi duran dalga oranına, kabul edilen güç – yayılım gücü geçişi ise yayılım verimliliğine bağlı olmaktadır.

3.1.2. Algılayıcının Yapımı

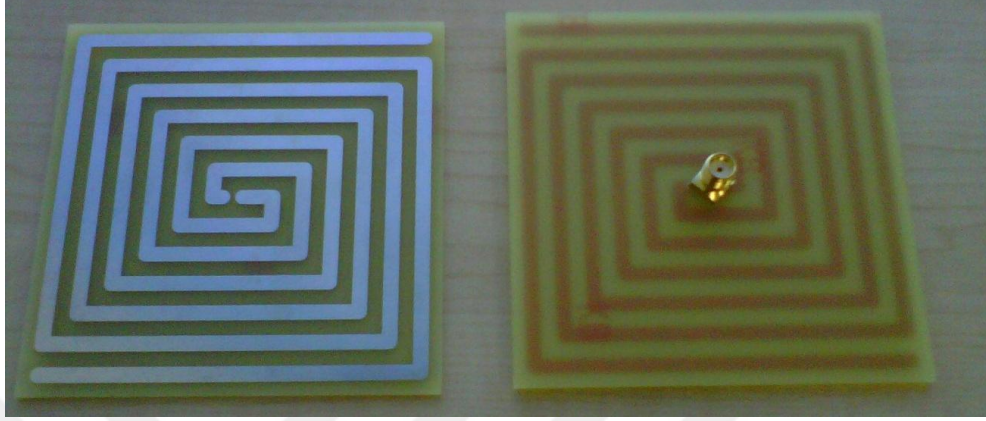
Gerçekleştirilen analizlerin sonuçlarına bağlı olarak seçilen $p = 10 \text{ mm}$, $w = 3 \text{ mm}$ değerlerine göre EM KB algılayıcının baskılı devre çizimi için Eagle programı kullanılmıştır. Baskılı devre plaketinin dış ölçüleri $80 \times 80 \text{ mm}^2$ şeklindedir. Spiral kolların bitiminden sonra 2.5 mm ’lik kenar payı bırakılmıştır.



Şekil 3.21: Baskılı devre çizim programı (Eagle) ile yapılan algılayıcı tasarımı.

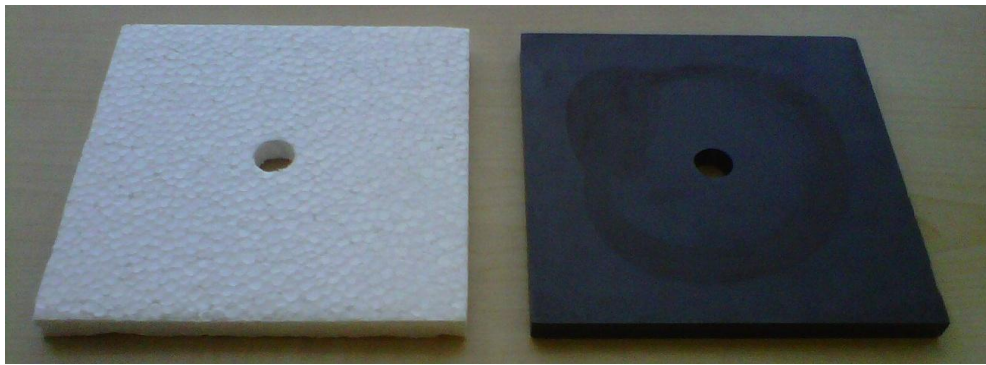
Eagle programı ile çizimi yapılan algılayıcının üretimi bir baskılı devre firmasına yaptırılmıştır. Üretim aşamasında taban malzemesi olarak FR4, spiral kolları için de 35

μm kalınlığında bakır kullanılmış, bakır kısımların üzeri oksidasyona karşı kalay ile kaplanmıştır. Üretimi yapılan baskılı devre plaketi ve SMA (subminiature version a) tipi konnektör montajı yapılmış diğer bir plaket şekil 3.22’de görölmektedir.



şekil 3.22: Üretilen algılayıcı baskılı devresi (solda), SMA konnektörü montajı ile (sağda).

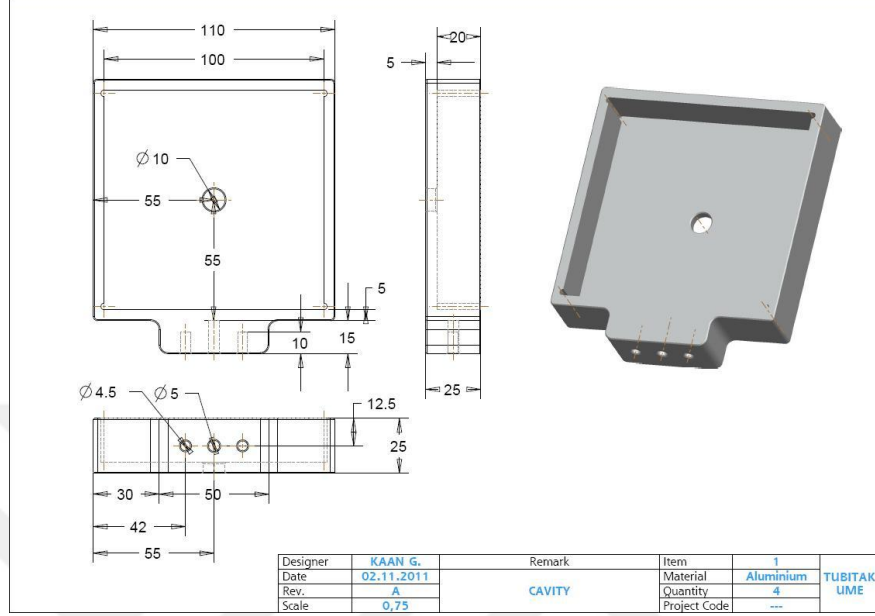
Ferrit soğurma plakası TÜBİTAK UME EMC laboratuvarından temin edilmiştir. Plakanın ölçüleri $100 \times 100 \times 6.2 \text{ mm}^3$ olup, kare şeklindeki plakanın merkezinde 10 mm çapında bir delik bulunmaktadır. Yapılan analizler sonucu polistiren dolgu plakasının kalınlığı $p = 10 \text{ mm}$ seçilmiştir. Bu nedenle $100 \times 100 \times 10 \text{ mm}^3$ ölçülerinde polistiren plakalar hazırlanmış, merkezlerine de 10 mm’lik delikler açılmıştır. Ferrit soğurma plakası ve polistiren dolgu plakası örnekleri şekil 3.23’de görölmektedir.



şekil 3.23: Polistiren dolgu plakası (solda), Ferrit soğurma plakası (sağda).

EM KB algılayıcının metal kutu içine yerleştirilmesinin nedenleri önceki bölümlerde analiz edilmiştir. Ferrit soğurma plakası, polistiren dolgu plakası ve düzlemsel spiral

algılayıcının içine yerleştirileceği metal kutu tasarımı ProEngineer programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarım Şekil 3.24’de görülmektedir.



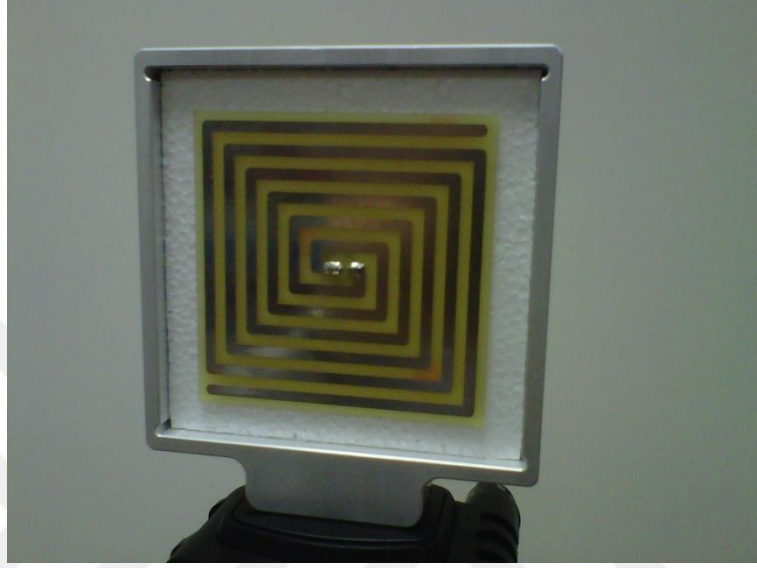
Şekil 3.24: EM KB algılayıcı için tasarımı yapılan metal kutu.

Metal kutu, bu tür parçaların üretimini yapan bir firmaya yaptırılmıştır. Temin edilmesi ve işlenmesi kolay olduğu için yapımında alüminyum malzeme tercih edilmiştir. Oksidasyona ve dış etkilere karşı koruma için krom kaplama yaptırılmıştır. Üretimi yapılan örnek bir metal kutu Şekil 3.25’de görülmektedir.



Şekil 3.25: Üretilen EM KB algılayıcı metal kutusu.

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilecek deneysel ölçümler için EM KB algılayıcının bir üçayak üzerine yerleştirilmesi planlanmıştır. Bu amaçla metal kutunun alt kısmında standart bir üçayak bağlantı noktası oluşturulmuştur. Tüm tasarım ve yapım aşamaları tamamlanmış bir EM KB algılayıcı Şekil 3.26'da görülmektedir.



Şekil 3.26: Yapım aşaması tamamlanan bir EM KB algılayıcı.

Yapımı tamamlanan EM KB algılayıcının Vector Network Analyzer sistemi ile ölçümleri yapılarak, tasarım aşamasında yapılan HFSS analizleri ile karşılaştırması yapılmıştır [53]. Bu karşılaştırmanın sonuçları Bölüm 4.1'de verilmiştir.

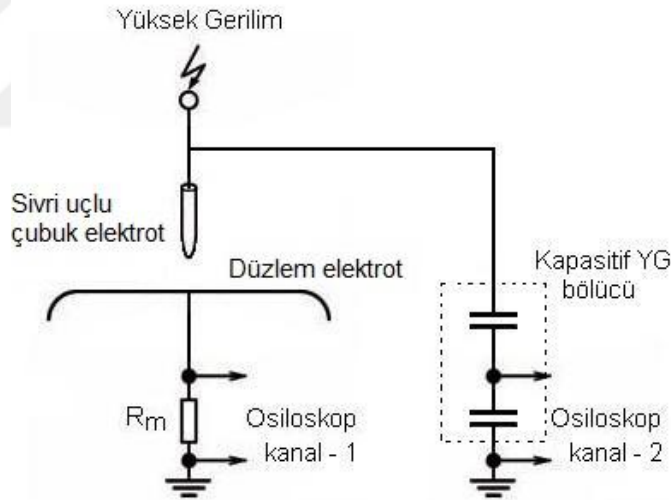
3.2. YÜKSEK GERİLİM İLE KISMİ BOŞALMA OLUŞTURULMASI İÇİN DENEY DÜZENEĞİ

KB sonucu ortaya çıkacak EM dalgaların incelenebilmesi için öncelikle YG altında kontrollü bir şekilde KB oluşturulabilecek ve oluşan KB'lerin ölçülebileceği bir deneysel düzenek gerekmektedir. Bu amaçla Şekil 3.27'de gösterilen deneysel düzenek kurulmuştur. Bu şekilde KB oluşturulması ve ölçülmesi literatürde yer alan bir yöntemdir [18, 69-74].

Şekil 3.27'deki deneysel düzenekte bir sivri uçlu çubuk elektrot, bir alternatif YG kaynağına (50 Hz) bağlanmıştır. Sivri uçlu çubuk elektrotun altına yerleştirilen bir düzlem elektrot, bir R_m ölçüm direnci üzerinden toprağa bağlanmıştır. Doğal olarak, oluşacak KB işaretlerinin seviyesi ve tam delinme (full discharge) oluşması gibi

durumları belirleyen etkenlerin en başında, elektrotlar arası mesafe ve uygulanmakta olan YG'nin seviyesi gelmektedir. KB sonucu ortaya çıkan zayıf akım darbeleri, toprak hattına seri bağlanmış olan R_m ölçüm direnci üzerinden gerilim darbelerine dönüştürülmüştür. Bu dirence bağlanmış bir osiloskop yardımı ile KB işaretleri izlenmiş ve kaydedilmiştir.

Oluşan KB işaretlerinin YG'nin hangi değerinde ve hangi noktasında (fazında) oluştuğunu görebilmek, oluşan KB'nin yapısı ile ilgili bilgi edinme açısından önemlidir [29-31]. Bu nedenle sivri uçlu çubuk elektrota uygulanmakta olan YG, aynı zamanda kapasitif bir YG bölücüsüne de uygulanmıştır. YG bölücüsünün çıkışı, osiloskobun diğer kanalına bağlanmış ve böylece YG izlenmiştir. Osiloskobun tetiklenmesi için bu ikinci kanal kullanılmıştır, böylece KB işaretleri ekranda kararlı, durağan bir şekilde izlenebilmiştir. Deneysel çalışma esnasında ortam koşulları; 23 °C sıcaklık, %45 nem ve 1000 mbar basınç şeklindedir. Elektrotlar arası açıklık 5 mm sabit tutulmuştur.



Şekil 3.27: Yüksek gerilim altında kısmi boşalma oluşturma düzeneği.

Deneysel çalışma esnasında YG değeri kontrollü bir şekilde artırılmış ve osiloskop ekranından takip edilmiştir. Osiloskop kanal-2'den tetiklenecek şekilde ayarlanmış ve time/div ayarı 2 ms olarak seçilmiştir. Bu şekilde yatay kare sayısı standart 10 olan bir osiloskop ile 20 ms'lik bir zaman eksenini elde edilmiş ve doğru tetikleme ayarı ile 50 Hz frekansındaki YG işareti ekranda tam bir periyodu ile görülebilmştir. Kanal-1 doğrudan

R_m ölçüm direncine bağlı olduğu için volt/div ayarı düşük tutulmuştur. Böylece henüz düşük seviyedeki (başlangıç aşamasındaki) KB işaretleri gözlemlenmiştir.

Bu tür bir çalışmada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta güvenlidir, YG ile çalışıldığı her aşamada ön planda tutulmuştur. İkinci olarak, YG'nin kontrollü bir şekilde artırılmasına ve KB oluşumundan elektrotlar arası tam boşalmaya geçiş yaptırılmamasına dikkat edilmiştir. Tam boşalmaya geçiş durumunda osiloskop zarar görecektir. Osiloskop giriş kanalları $1\text{ M}\Omega$ olarak ayarlanmış, $50\ \Omega$ modu kullanılmamıştır.



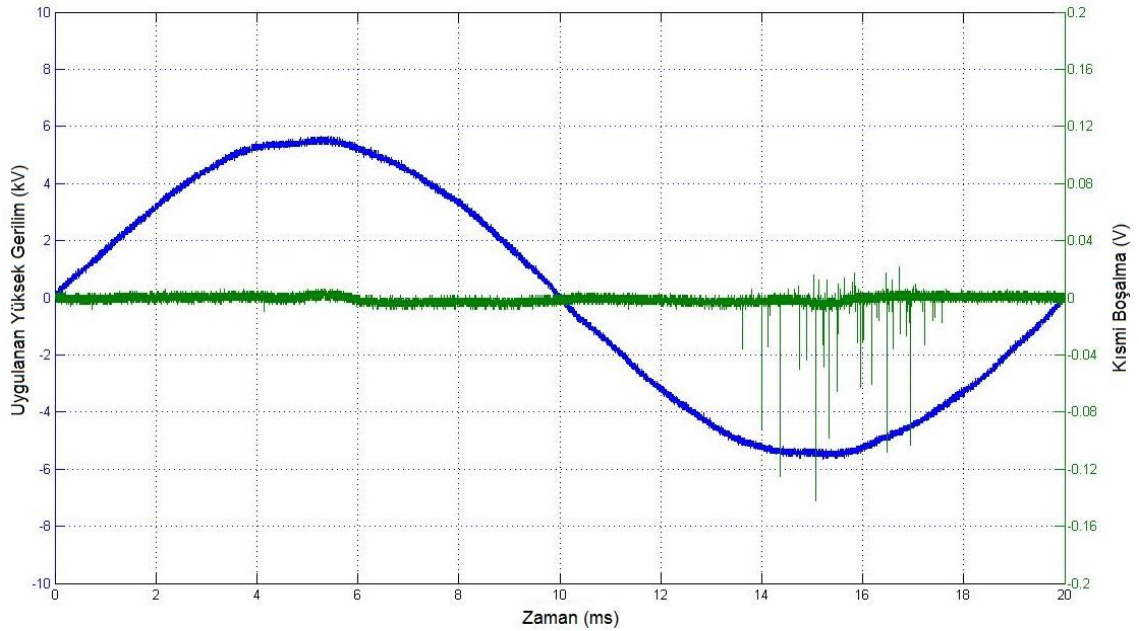
Şekil 3.28: Kısmi boşalma oluşturma ve ölçme düzeneğinin bileşenleri.

Şekil 3.27 ile verilen deney düzeneğini oluşturan bileşenler Şekil 3.28'de görülmektedir. İhtiyaç duyulan elektrotlar ProEngineer programı ile tasarlanmış ve üretimi yaptırılmıştır (Şekil 3.28'de sol üst resim). Her iki elektrot üzerinde, banana tipi kablo konnektörü bağlantısı için 4 mm 'lik delik bulunmaktadır. Yine bu çalışma için ihtiyaç duyulan kapasitif YG bölücü tasarlanmış ve üretilmiştir (Şekil 3.28'de sol alt resim). Maksimum çalışma gerilimi 10 kV RMS 'dir. Yapılan kalibrasyon sonucunda bölücünün bölüm oranı $1/374$ olarak hesaplanmıştır. Bu durumda, örneğin 10 kV 'luk bir

gerilim YG bölücüye uygulandığında BNC tipi çıkış konnektöründen yaklaşık 26.74 V alınmaktadır. Kalibrasyon sonucunda, bölücünün tüm çalışma aralığında (0 kV - 10 kV) doğrusal bir çalışma sergilediği ve bölüm oranının değişmediği gözlenmiştir. Alüminyum bir kutu içinde yer alan R_m ölçüm direnci 50Ω değerindedir (Şekil 3.28’de sağ üst resim). Elektroda ve toprak hattına bağlantı terminalleri banana tipi konnektör, osiloskoba bağlantı terminali ise BNC tipi konnektör yapısındadır. Ölçümler için kullanılan osiloskop; LeCroy marka, WaveSurfer 452 model, 2 kanallı ve kanal başına 1 GS/s örnekleme hızına sahiptir (Şekil 3.28’de sağ alt resim).

3.2.1. Alan İntegrasyonu ile Kısmi Boşalma Değerinin Bulunması

Şekil 3.27’de verilen deney düzeneği kullanılarak YG altında yakalanan KB işaretlerine bir örnek Şekil 3.29’da görülmektedir. Bu örnek grafikte mavi renk ile gösterilen YG işaretinin tepe değeri 5.5 kV seviyesinde, yeşil renk ile gösterilen KB darbeleri ise mV’lar seviyesindedir. Çok kısa süreli işaretler dizisi şeklinde ortaya çıkan KB darbeleri nanosaniyeler seviyesinde genişliklere sahiptirler. Şekil 3.29, sayısal osiloskop ile elde edilen verilerin Matlab ortamına aktarılması ile oluşturulmuştur.

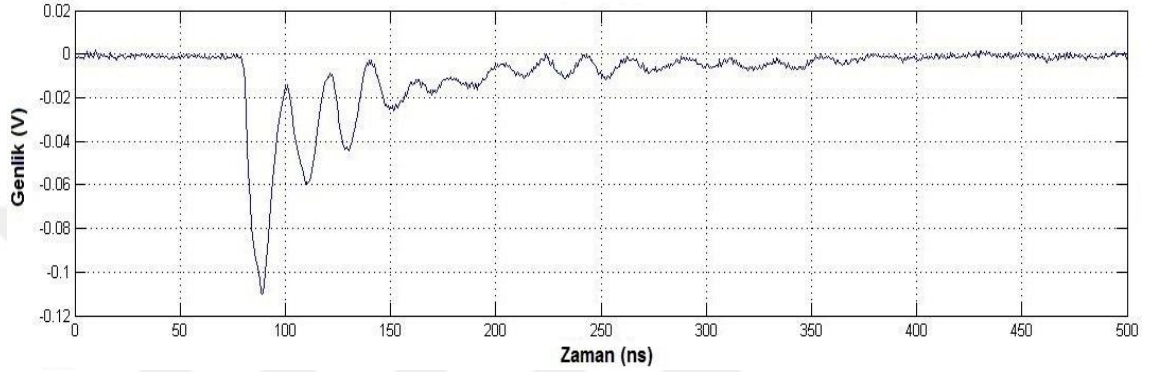


Şekil 3.29: Deney düzeneği ile kayıt edilen yüksek gerilim işareti ve kısmi boşalma darbeleri.

Şekil 3.29’da görülen KB darbelerinin her biri, aslında Şekil 3.30’daki gibi birer işarettir. Şekil 3.27’de verilen deney düzeneği kullanılarak Şekil 3.30’daki gibi bir KB darbesi yakalayabilmek için, osiloskobun tetikleme ayarı kanal-1’e alınmış (KB

işaretleri ile tetiklenir hale getirilmiş) ve time/div ayarı değiştirilerek tek bir KB darbesi ile osiloskobun tetiklenmesi sağlanmıştır. Ayrıca osiloskobun tetikleme modu otomatik değil normal mod yapılmış ve böylece tek bir darbe yakalayıp durması sağlanmıştır.

Şekil 3.30'daki gibi bir forma sahip KB darbe işaretinin KB yük değerini bulabilmek için eğri altında kalan alanın hesaplanması gereklidir [7, 16, 18].

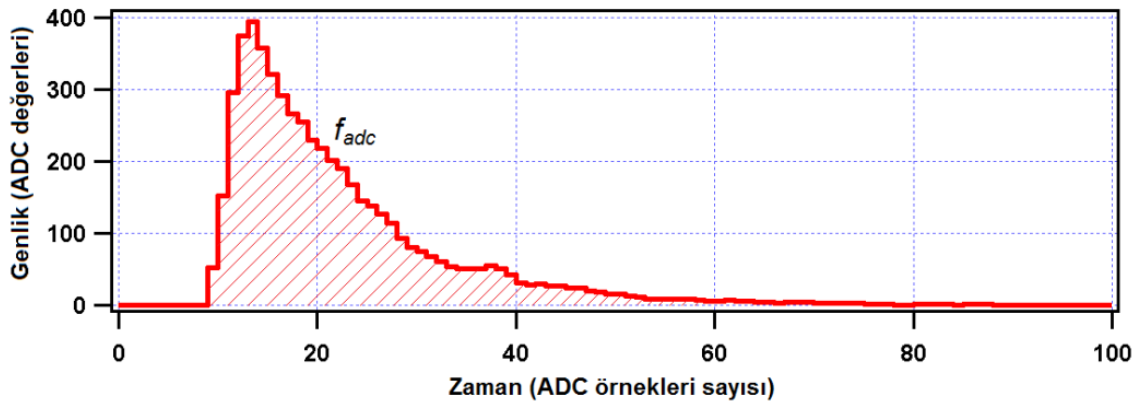


Şekil 3.30: Deney düzeneği ile kayıt edilen örnek bir kısmi boşalma darbesi.

Şekil 3.31'deki kırmızı renk ile gösterilen işaretin altında kalan taralı alanı bulmak için işaretin pencere süresi boyunca;

$$\text{taralı alan} = \int_0^{100} f_{adc}(t) dt \quad (3.11)$$

ile tanımlanan belirli integral hesabı yapılmalıdır. Gerçekte elimizde $f_{adc}(t)$ gibi bir fonksiyon olmayıp, örnekleme işlemi ile elde edilmiş bir sayı dizisi bulunmaktadır.



Şekil 3.31: Zamana bağlı olarak değişen bir darbe işareti için alan integrasyonu.

Bu şekilde örneklenmiş bir KB darbe işaretinin KB yük değeri;

$$q = \int i(t)dt = \frac{1}{R_m} \int u_m(t)dt \quad (3.12)$$

ile bulunur [7, 75]. Burada q KB yük değerini (elektriksel yük), $i(t)$ KB akımını, R_m deney düzeneğinde kullanılan KB ölçüm direncini, $u_m(t)$ örneklenen işaretini göstermektedir. $i(t)$ ile tanımlanan akım, çok zayıf fakat çok hızlı yükselen ve sönen KB akım darbeleridir. R_m direnci üzerinden akan $i(t)$ akımı, $u_m(t)$ gerilimine dönüşmektedir.

Osiloskop ile örneklenen işaret doğrudan $u_m(t)$ işaretini olmakta ve integrasyon sonucunda voltsaniye (Vs) cinsinden bir değer elde edilmektedir. Bazı sayısal osiloskoplar bu integrasyon işlemini matematik kütüphanelerinde bulundurmakta ve kendileri otomatik yapabilmektedir. Gerçekleştirilen tez çalışmasında, osiloskop ile yakalanan işaretler bilgisayara aktarılmış ve Matlab'ın *trapz* fonksiyonu ile alan integrasyonu yapılmıştır. Şekil 3.30'da verilen örnek KB darbesinin Matlab ile hesaplanan kısmi boşalma değeri;

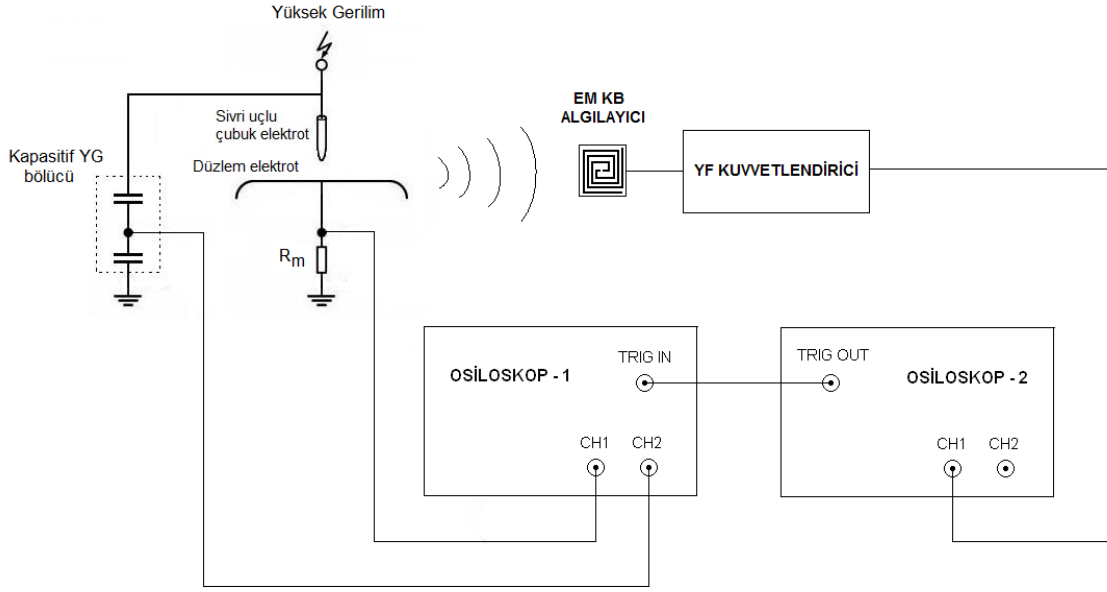
KB Ölçüm Direnci	= 50.2163 ohm
KB İntegrasyon Değeri	= 5.2476 nVs
KB Değeri	= 104.5 pC

şeklinde. Burada 50.2163 Ω ile verilen değer, R_m direncinin Agilent 3458A multimetre ile ölçülen değeridir.

3.3. ELEKTROMANYETİK KISMİ BOŞALMA ALGILAYICI DENEY DÜZENEĞİ

KB sonucu ortaya çıkacak EM dalga yayılımını algılamak için bir önceki bölümde verilen deney düzeneği bazı eklentiler ile genişletilmiştir. Bu amaçla tasarımı, analizleri ve yapımı gerçekleştirilen EM KB algılayıcı kullanılmıştır. Kurulan yeni deneysel ölçüm düzeneği Şekil 3.32'de görülmektedir. Kontrollü bir şekilde KB üretilmesini sağlayan sivri uç - düzlem elektrot takımının 120 cm uzağına ve bir üçayak üzerine EM KB algılayıcı yerleştirilmiştir. EM KB algılayıcının çıkışına Şekil 3.33'de yakından görünen YF kuvvetlendirici birimi bağlanmıştır. Bu YF kuvvetlendirici 0.01 MHz - 2000 MHz frekans aralığında 35 dB kazanç sağlamaktadır. EM KB algılayıcı ile algılanan ve yükseltelen işaretler, ikinci bir osiloskoba aktarılmaktadır. KB kaynaklı EM dalga yayılımını gösterecek olan osiloskop-2'nin tetikleme çıkışı (*trig_out*), osiloskop-1'in tetikleme girişine (*trig_in*) bağlanmıştır. Osiloskop-2, girişine bağlı EM KB

algılayıcıdan gelecek bir işaret ile tetiklenir ve ekranında bu EM KB işaretini gösterir. Aynı anda, kurulan tetikleme bağlantısı ile osiloskop-1 de tetiklenir. Osiloskop-1'in ekranında, R_m direnci üzerindeki KB işareti gösterilir.



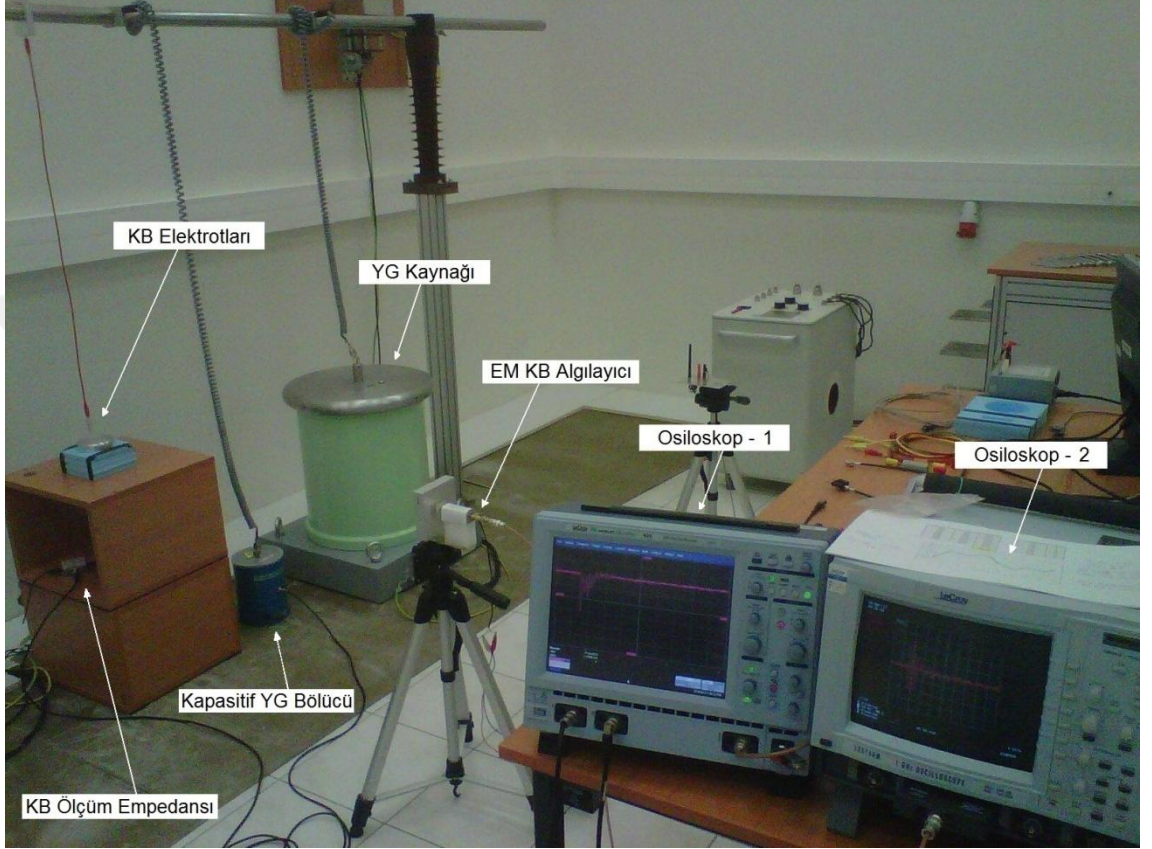
Şekil 3.32: Kısmi boşalma ile oluşan elektromanyetik dalga yayılımını yakalama düzeneği.

Deney düzeneğinde kullanılan osiloskop-1, daha önceki düzenekte kullanılan LeCroy marka, WaveSurfer 452 model, 2 kanallı ve kanal başına 1 GS/s örnekleme hızına sahip olan osiloskoptur. EM dalga yayılımını ölçen osiloskop-2 ise LeCroy marka, LC574 model, 4 kanallı ve kanal başına 1 GS/s örnekleme hızına sahip bir osiloskoptur. Bu osiloskobun önemli bir özelliği, tüm örnekleme yapan ADC'lerinin (analog-dijital converter – analog-sayısal dönüştürücü) birleşik olarak tek bir kanalı 4 GS/s örnekleme hızı ile örnekleyebilmesidir (channel combining). Bu özellik kullanılarak EM dalga yayılımını 4 GS/s örnekleme hızı ile kayıt edilmiştir.



Şekil 3.33: Ölçümlerde kullanılan YF kuvvetlendirici.

Şekil 3.32 ile verilen deney düzeneğinin, TÜBİTAK UME Güç ve Enerji Laboratuvarında kurulu hali Şekil 3.34'de görülmektedir [76]. YF kuvvetlendirici, EM KB algılayıcının arkasına (çıkışına) bağlanmıştır. Yeşil renkli YG kaynağı, maksimum 40 kV (RMS) çıkış verebilen, 50 Hz çalışma frekansına sahip bir kaynaktır.



Şekil 3.34: Laboratuvar ortamında kurulan deney düzeneği.

Kurulan deneysel ölçüm düzeneğinin, EM dalga yayılımı algılama performansının test edilebilmesi için Şekil 3.35'de görülen cihaz kullanılmıştır. Comtest firmasının ürettiği 1410 modeli, Field Reference Source (FRS) isimli bu cihaz, 1 MHz - 1.5 GHz aralığında spektruma sahip EM işaret üretmekte ve anteni ile ortama yaymaktadır. Performans testi için cihaz, Şekil 3.34'de görülen ahşap yapı üzerindeki elektrotların yerine yerleştirilmiştir. Aynı deney düzeneği ile ilk olarak KB kaynaklı EM dalga yayılımı yerine, bu cihazdan yayımlanan EM dalgalar yakalanmış ve kaydedilmiştir. Farklı picocoulomb değerlerinde oluşturulan KB kaynaklı EM dalgaların ve FRS cihazından elde edilen EM dalgaların ölçüm sonuçları Bölüm 4.2'de verilmiştir.



Şekil 3.35: Algılama performans testi için kullanılan FRS cihazı.

3.4. KISMİ BOŞALMA KAYNAĞININ KONUMUNUN ÜÇ BOYUTLU KESTİRİMİ

3.4.1. Üç Boyutlu Hiperbolik Konum Kestirim Algoritmasının Geliştirilmesi

Bölüm 2.2.3. “Hiperbolik Konum Belirleme Yöntemi – Multilateration” ile verilen yöntem kullanılarak, iki boyutlu uzayda (düzlem) üç adet algılayıcı kullanılarak bir kaynaktan yayılan işaretin algılayıcılara ulaşma zamanları arasındaki farklara bağlı konum kestirimi verilmişti. Üç boyutlu uzayda KB kaynağının koordinatlarının kestirimi için en az dört adet algılayıcıya ihtiyaç duyulmaktadır [45, 50, 76]. Bu durum Şekil 3.36’da gösterilmiştir. İlgili bölümdeki (2.36) numaralı denklem üç boyutlu uzay için tekrar yazılırsa;

$$r_{i1}^2 + 2r_{i1}r_1 = -2x_{i1}x - 2y_{i1}y - 2z_{i1}z + K_i - K_1 \quad (3.13)$$

şeklinde olur. Burada sırası ile $i = 2$, $i = 3$ ve $i = 4$ yapılırsa;

$$r_{21}^2 + 2r_{21}r_1 = -2x_{21}x - 2y_{21}y - 2z_{21}z + K_2 - K_1 \quad (3.14)$$

$$r_{31}^2 + 2r_{31}r_1 = -2x_{31}x - 2y_{31}y - 2z_{31}z + K_3 - K_1 \quad (3.15)$$

$$r_{41}^2 + 2r_{41}r_1 = -2x_{41}x - 2y_{41}y - 2z_{41}z + K_4 - K_1 \quad (3.16)$$

denklem takımı elde edilir. Bu denklem takımı düzenlenirse;

$$-x_{21}x - y_{21}y - z_{21}z = r_{21}r_1 + \frac{1}{2}(r_{21}^2 - K_2 + K_1) \quad (3.17)$$

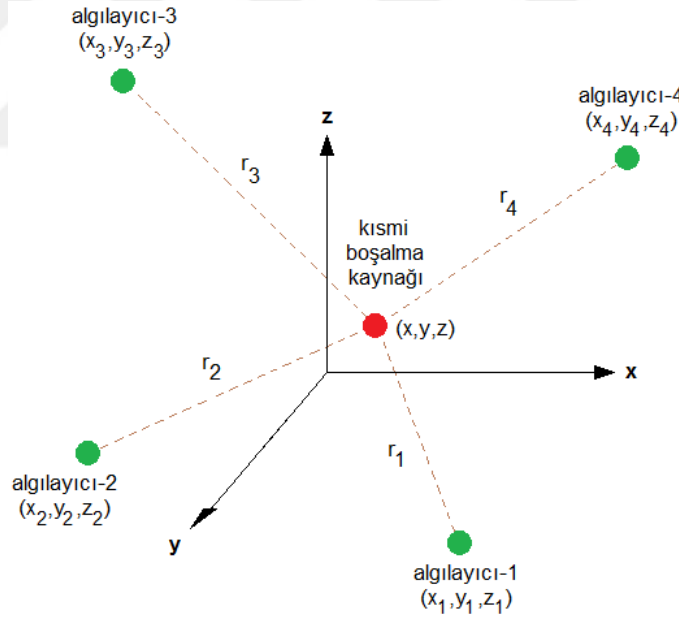
$$-x_{31}x - y_{31}y - z_{31}z = r_{31}r_1 + \frac{1}{2}(r_{31}^2 - K_3 + K_1) \quad (3.18)$$

$$-x_{41}x - y_{41}y - z_{41}z = r_{41}r_1 + \frac{1}{2}(r_{41}^2 - K_4 + K_1) \quad (3.19)$$

denklemleri elde edilir. (3.17), (3.18) ve (3.19) denklemleri matris formatında doğrusal denklem takımı olarak yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} x_{21} & y_{21} & z_{21} \\ x_{31} & y_{31} & z_{31} \\ x_{41} & y_{41} & z_{41} \end{bmatrix}^{-1} \times \left\{ \begin{bmatrix} r_{21} \\ r_{31} \\ r_{41} \end{bmatrix} r_1 + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} r_{21}^2 - K_2 + K_1 \\ r_{31}^2 - K_3 + K_1 \\ r_{41}^2 - K_4 + K_1 \end{bmatrix} \right\} \quad (3.20)$$

elde edilir. (3.20) ile verilen doğrusal denklem takımının çözümü ile KB kaynağının koordinatları (x,y,z) bulunur [77].



Şekil 3.36: KB kaynağı ve 4 adet EM KB algılayıcının 3 boyutlu uzayda gösterimi.

(3.20) ile verilen doğrusal denklem takımının tanımlamaları aşağıda verilmiştir:

i : EM KB algılayıcının indis numarası.

x,y,z : KB kaynağının koordinatları.

x_1, y_1, z_1 : referans EM KB algılayıcının koordinatları (burada birinci algılayıcı referans seçilmiştir).

x_{i1}, y_{i1}, z_{i1} : referans algılayıcı ile i 'nci algılayıcının koordinatlarının farkı.

r_{i1} : elektromanyetik dalga yayılım hızının (c), işaretin algılayıcılara ulaşma zamanları arasındaki fark ($t_i - t_1$) ile çarpımı ($r_{i1} = ct_{i1} = c(t_i - t_1) = r_i - r_1$).

r_1 : referans EM KB algılayıcı ile KB kaynağı arasındaki mesafe.

K_i : i 'nci algılayıcının koordinatlarının karesel toplamı ($x_i^2 + y_i^2 + z_i^2$).

Konum kestirimi için, (3.20) ile verilen denklem takımının çözümüne yönelik olarak Şekil 3.37 ile verilen çözüm algoritması geliştirilmiştir. Bu noktada elimizde, dört adet EM KB algılayıcının koordinatları (dolayısı ile K_i katsayıları) ve ışık hızı (EM dalga yayılım hızı) bilinenler olarak bulunmaktadır. Yapılacak olan ölçüm sonucunda EM KB işaretinin algılayıcılara ulaşma zamanları arasındaki farklar da (TDOA) elimizde olacaktır. Bu noktada aşağıdaki tanımlamalar yapılmıştır:

$$A = - \begin{bmatrix} x_{21} & y_{21} & z_{21} \\ x_{31} & y_{31} & z_{31} \\ x_{41} & y_{41} & z_{41} \end{bmatrix}^{-1} \quad (3.21)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{21} \\ r_{31} \\ r_{41} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$B = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} r_{21}^2 - K_2 + K_1 \\ r_{31}^2 - K_3 + K_1 \\ r_{41}^2 - K_4 + K_1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Bu durumda (3.20) denklem takımı;

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = A \times \{Rr_1 + B\} \quad (3.24)$$

şeklinde yazılır. Burada tekrar yeni tanımlamalar yaparsak;

$$X = A \times R \quad \text{ve} \quad Y = A \times B \quad (3.25)$$

ve bu tanımlamaları denklem (3.24)'e uygularsak;

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = Xr_1 + Y \quad (3.26)$$

elde edilir. Burada $X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix}$ ve $Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{bmatrix}$ şeklinde 3x1 boyutlu matrislerdir. (3.26)

denkleminde;

$$x = X_1r_1 + Y_1 \quad (3.27)$$

$$y = X_2r_1 + Y_2 \quad (3.28)$$

$$z = X_3r_1 + Y_3 \quad (3.29)$$

denklemleri yazılır. Referans EM KB algılayıcı olarak seçilmiş olan algılayıcı-1 ile KB kaynağı arasındaki mesafe (Şekil 3.36);

$$r_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 \quad (3.30)$$

şeklinde ifade edilir. (3.27), (3.28) ve (3.29) denklemleri kullanılarak (3.30) tekrar yazılır ve düzenlenirse;

$$r_1^2(X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 - 1) + r_1[2X_1(Y_1 - x_1) + 2X_2(Y_2 - y_1) + 2X_3(Y_3 - z_1)] + (Y_1 - x_1)^2 + (Y_2 - y_1)^2 + (Y_3 - z_1)^2 = 0 \quad (3.31)$$

denklemini elde edilir. (3.31) denkleminde dikkat edilirse, r_1 için $ax^2+bx+c=0$ şeklinde ikinci dereceden bir bilinmeyenli denklem yapısı görülür. Burada;

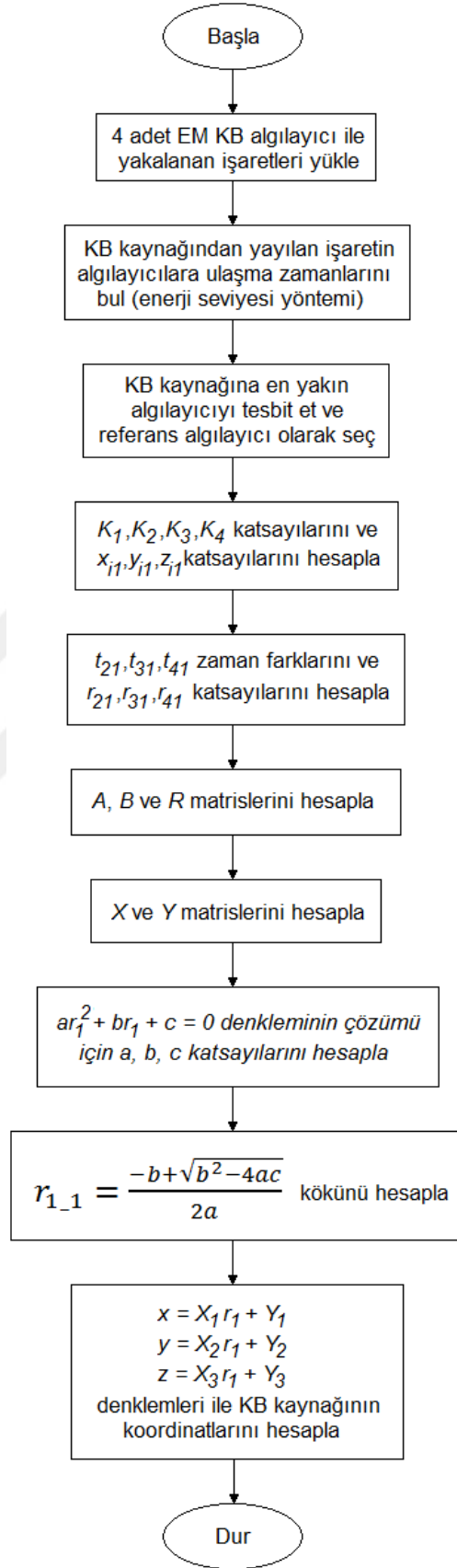
$$a = X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 - 1 \quad (3.32)$$

$$b = 2[X_1(Y_1 - x_1) + X_2(Y_2 - y_1) + X_3(Y_3 - z_1)] \quad (3.33)$$

$$c = (Y_1 - x_1)^2 + (Y_2 - y_1)^2 + (Y_3 - z_1)^2 \quad (3.34)$$

olmaktadır. Bilindiği üzere denklem (3.31)'un çözümü ile iki kök bulunur. Bunlar;

$$r_{1,1} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \text{ ve } r_{1,2} = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \text{ şeklindedir.}$$

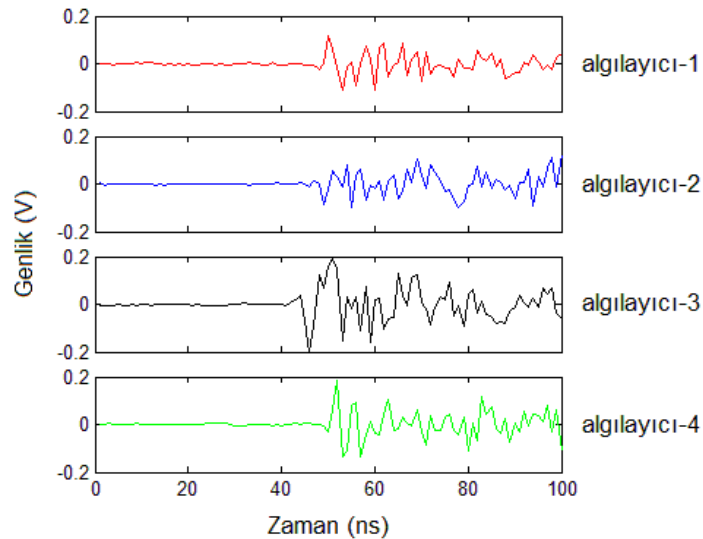


Şekil 3.37: KB kaynağı konum kestirimi için geliştirilen algoritma.

Hesaplamalarda her zaman birinci EM KB algılayıcısının referans olarak kullanılması yerine, KB kaynağına en yakın EM KB algılayıcı referans olarak seçilirse, $r_{1,1} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$ ile bulunan kök, her zaman konum kestirimi açısından doğru çözümü vermektedir. Bu referans algılayıcı seçimi işlemi için uygulamada Matlab kodunun adaptif bir yapıda olması sağlanmıştır. Doğru r_l değeri bulunduktan sonra denklem (3.20)'de yerine konularak KB kaynağının koordinatları (x, y, z) bulunur [77].

3.4.1.1. Enerji Seviyesi Yöntemi

Yukarıda anlatılan üç boyutlu hiperbolik konum kestirim algoritmasının başarımına doğrudan etki edecek en önemli parametre, TDOA zaman farklarının doğru olarak belirlenmesidir [33, 34, 50, 77]. KB kaynağından çıkan EM dalganın algılayıcılara ulaşma zamanları arasındaki bu farkların (t_{21}, t_{31}, t_{41}) belirlenebilmesi için ilk olarak zaman domeninde işaret başlangıç anlarının belirlenmesi (t_1, t_2, t_3, t_4) gerekmektedir. Literatürde işaret başlangıç zamanlarının belirlenmesi için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Zaman domeninde, işaret seviyesinin belirli bir gerilim eşik değerini geçme anının tesbiti, bu yöntemlerden en temel ve basit olanıdır [33, 34]. Bundan başka toplam güç, korelasyon gibi yöntemlerin de kullanıldığı literatürde görülmektedir [50, 78-81].



Şekil 3.38: 4 adet EM KB algılayıcı ile yakalanan örnek bir EM KB işareti.

Şekil 3.38'de dört ayrı EM KB algılayıcıdan alınan bir EM KB işareti örnek olarak gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, dört işaret birbirine şekil olarak benzemekle birlikte

genlik seviyeleri ve zaman eksenindeki başlangıç konumları birbirinden farklıdır. Bu genlik ve zaman farklarının nedeni, KB kaynağının algılayıcılara olan mesafesinin birbirinden farklı olmasıdır. KB işaretlerinin deterministik yapıda olmayıp stokastik yapıda olmasından dolayı başlangıç zamanlarının kestirimi zor bir konudur.

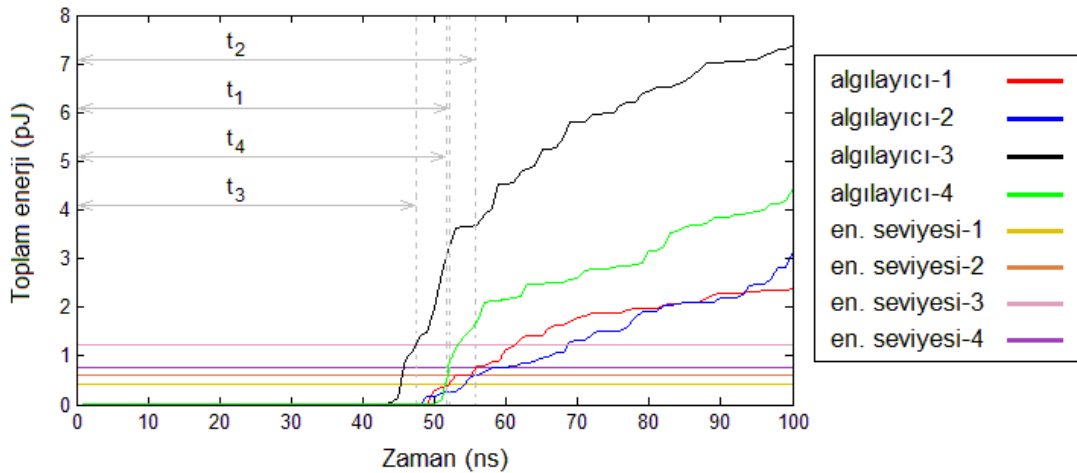
Bu tez çalışmasında başlangıç zamanlarının kestirimi için geliştirilen yöntem “Enerji Seviyesi Yöntemi” olarak adlandırılmıştır. Osiloskop ile sayısal olarak örneklenen ve kaydedilen Şekil 3.38’deki işaretlerin anlık enerji değerleri joule cinsinden;

$$W_n = \frac{V_n^2}{Rf_s} \quad (3.35)$$

ile bulunur. Burada; V_n örneklenmiş EM KB işaretinin anlık gerilim değerini (volt), R ölçüm sisteminin giriş empedansını (ohm) ve f_s ölçüm sisteminin örnekleme frekansını (Hertz) göstermektedir. Anlık enerji değeri W_n , zaman domenindeki her bir örnekleme değeri için hesaplanır. Daha sonra toplam enerji eğrisi için;

$$E_n = W_n + E_{n-1} \quad n = 1, 2, \dots, N - 1, N \quad (3.36)$$

sayı dizisi hesaplanır. N alınan toplam örnek sayısını göstermektedir. Burada yapılan işlem, anlık enerji değerlerinden kümülatif bir enerji eğrisi elde etmektir. Elde edilecek son değer, EM KB işaretinin algılayıcıya aktardığı toplam enerjiyi verir [77].



Şekil 3.39: Örnek EM KB işareti için toplam enerji eğrileri ve bulunan enerji aşım seviyeleri.

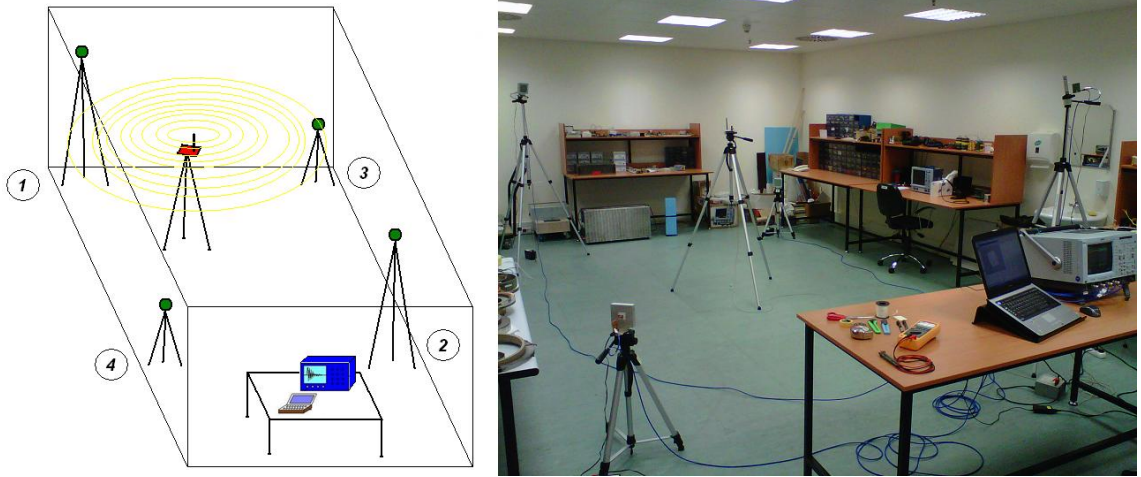
Geliştirilen bu yöntemde, her bir algılayıcıdan elde edilen işaretlerin toplam enerji değerinin belirli bir yüzdesi, enerji aşım seviyesi olarak belirlenir. Her bir algılayıcıdan

elde edilen toplam enerji eğrisinin, bu belirlenmiş enerji aşım seviyesine ulaştığı nokta, KB işaretinin başlangıç zamanı olarak kabul edilir [77].

Şekil 3.38’de verilen örnek EM KB işaretlerinin toplam enerji eğrileri ve toplam enerji değerlerinden belirli bir yüzdeye göre (buradaki örnek için %1.5 seçilmiştir) elde edilen enerji aşım seviyeleri ile belirlenen işaret başlangıç zamanları Şekil 3.39’da görülmektedir. Enerji aşım seviyelerini belirlemek için yüzde değerinin seçimi deneyseldir ve daha ileri bir çalışmada adaptif bir yapıda olması sağlanabilir. Her bir algılayıcıdan elde edilen işaretin toplam enerjisi, belirli bir noktada sıfırdan yükselmekte ve belirli bir artış ile bir noktada sonlanmaktadır. Bu sonlanma noktasındaki maksimum enerjinin, örneğin %1.5’lik değeri, o algılayıcı için ve o anki ölçüme yönelik olarak enerji aşım seviyesidir. Bu değere ulaşma anı, KB işaretinin başlangıç zamanı olarak kabul edilir. Bu şekilde t_1 , t_2 , t_3 , t_4 zamanları elde edilir.

3.4.2. Konum Belirleme İçin Laboratuvar Ortamında Kurulan Deney Düzenegi

KB kaynağının konumunu belirlemek için geliştirilen algoritmanın uygulanması amacıyla TÜBİTAK UME Güç ve Enerji Laboratuvarı’nda kurulan deney düzenegi Şekil 3.40’da görülmektedir.



Şekil 3.40: Konum belirleme için laboratuvar ortamında kurulan deney düzenegi.

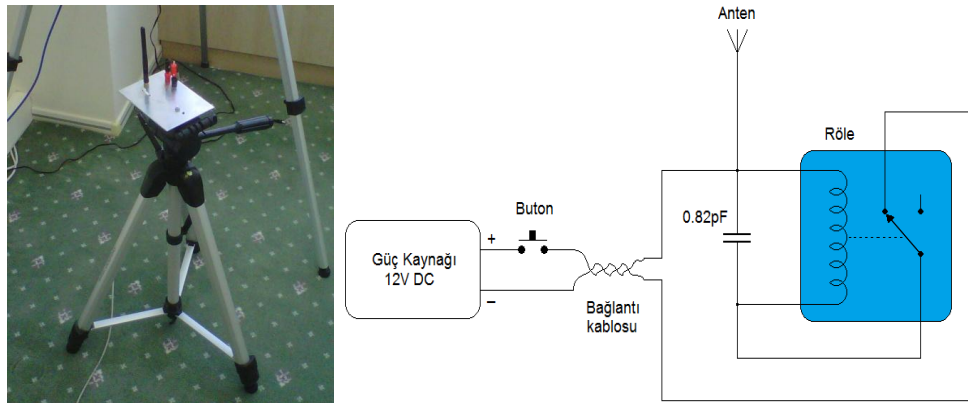
1, 2, 3, 4 şeklinde numaralandırılmış olan yeşil renkli noktalar EM KB algılayıcıları göstermektedir. EM KB algılayıcılar standart fotoğraf makinası üçayakları üzerine yerleştirilmiştir. Bu şekilde kullanımın bir avantajı, algılayıcının istenen koordinatlara (yükseklik dahil) getirilebilmesidir. Üçayaklar kullanılarak algılayıcılar, laboratuvar

içinde yaklaşık bir güç transformatörü tankının içini temsil edecek $300 \times 450 \times 200 \text{ cm}^3$ 'lük bir hacmin köşelerine yerleştirilmiştir. Şekil 3.40'daki 4 numaralı algılayıcının üzerinde bulunduğu üçayakın merkez nokta iz düşümü $0, 0, 0 \text{ cm}$ orijin noktası alınmıştır. Bu orijine göre tüm algılayıcıların yerleşim koordinatları Tablo 3.3'de verilmiştir. 75 cm ve 190 cm 'lik yükseklik değerleri, kullanılan üçayakların ayarlanabildiği maksimum ve minimum yükseklik değerlerinden gelmektedir. Çapraz köşelere denk gelen iki algılayıcının alçak, iki algılayıcının yüksek konumlandırılmasının nedeni, farklı noktalarda oluşabilecek KB işaretlerinin düzgün yakalanma olasılığını arttırmaktır.

Tablo 3.3: EM KB algılayıcıların yerleşim koordinatları.

EM KB algılayıcı no	x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	0	450	190
2	300	0	190
3	300	450	75
4	0	0	75

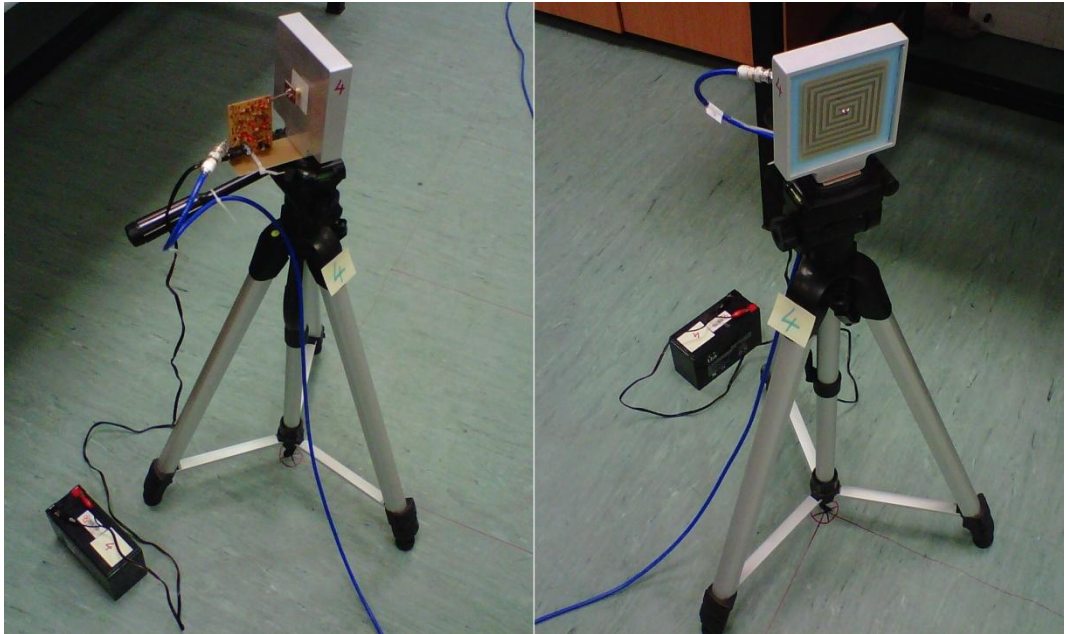
Şekil 3.40'da beşinci üçayak üzerinde görülen kırmızı renkli yapı, EM KB işareti benzetimcisidir. Bu çalışma için özel olarak tasarlanan ve yapılan benzetimci, KB sonucu ortaya çıkan EM dalga yayınına benzer işaretler üretebilmektedir. Tasarımı ve görünümü Şekil 3.41'de verilmiştir. Bir rölenin normalde kapalı konumdaki kontağı üzerinden beslenmesi sonucu, elektrik enerjisi verildiğinde çok hızlı ve sürekli bir şekilde açılması ve kapanması şeklinde çalışır. Röle sargısına paralel bir kapasite ve onlara bağlı bir dipol anten yardımı ile EM dalga yayını yapar.



Şekil 3.41: EM KB işareti benzetimcisi.

EM KB benzetimcisi de uçayak üzerine monte edilebilir şekilde yapılmıştır. Bu sayede laboratuvar içinde tanımlanan hacimsel bölgenin istenilen bir koordinatına yerleştirilmesi mümkündür. Konum belirleme ile ilgili deneysel çalışmalar için, YG altında elektrotlar arasında KB üretmek ve bu düzeneği laboratuvar içinde gezdirmek zor ve tehlikeli olduğu için böyle bir benzetimci geliştirilmiştir. Laboratuvarın bir kenarında bulunan masa ve üzerindeki osiloskop ile bilgisayar, ölçüm yapan kişinin çalışma bölgesidir. Şekil 3.41’de görünen 12 V DC güç kaynağı ve buton da aynı masa üzerindedir. Böylece ölçüm yapan kişinin EM KB benzetimciyi buton üzerinden çalıştırması ve EM dalga yayını oluşmasını sağlaması mümkün olmuştur.

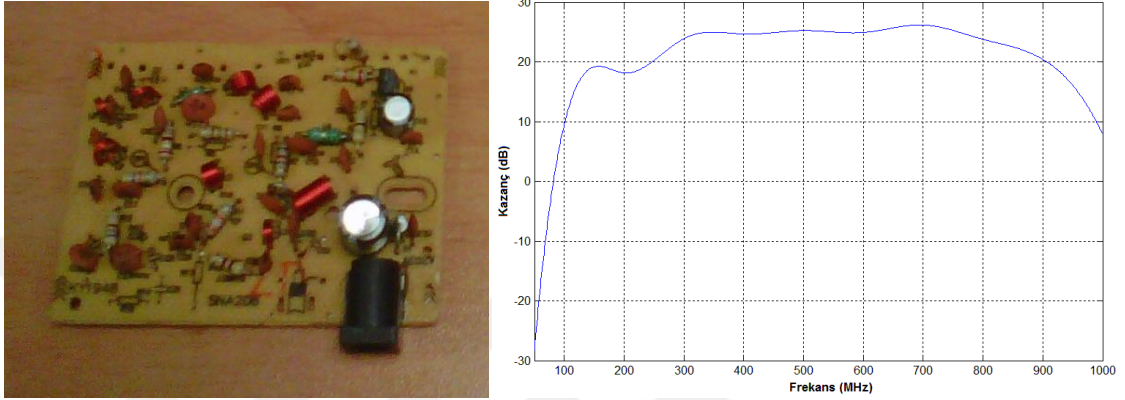
Tablo 3.3’de verilen koordinatlardan görüleceği üzere, laboratuvar içinde tanımlı hacimin x, y düzlemindeki alanı (laboratuvar zeminindeki) $300 \times 450 \text{ cm}^2$ ’dir. Bu alan, laboratuvar zemininde $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ ’lik kareler ile çizilerek bir matris şeklinde bölünmüştür. Üzerinde bulunduğu uçayakın yükseklik ayarı da kullanılarak, EM KB işareti benzetimcisinin tanımlı hacim içinde, 50 cm ’lik adımlarla konum değiştirmesi sağlanmıştır. Bu şekilde benzetimcinin koordinatları, istenilen (x, y, z) değerine getirilebilmiştir.



Şekil 3.42: Uçayak üzerine yerleştirilmiş, YF kuvvetlendirici bağlı bir EM KB algılayıcı.

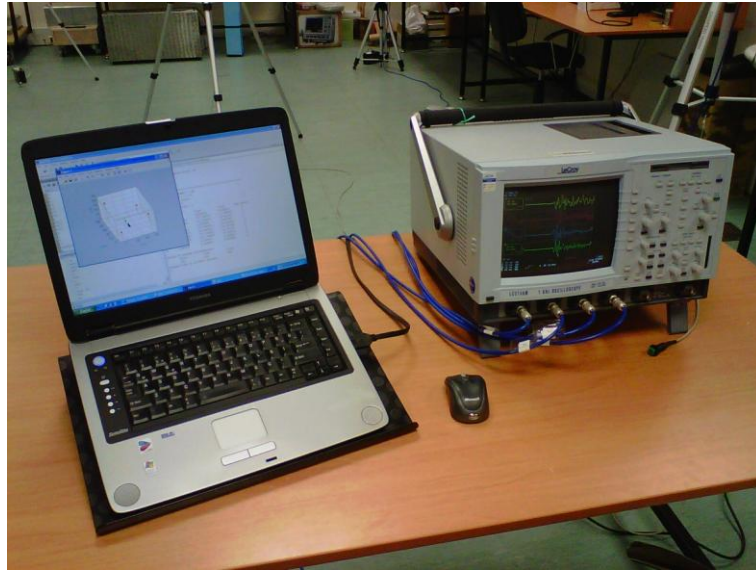
Uçayak üzerine yerleştirilmiş bir EM KB algılayıcı Şekil 3.42’de görülmektedir (örnek: 4 numaralı algılayıcı). Her bir algılayıcının arkasında (çıkışında) bir YF kuvvetlendirici

devresi bulunmaktadır. Yine, her bir kuvvetlendiricinin beslemesi için 12 V kuru tip akümülatör kullanılmıştır. Şebekeye bağlı standart tip güç kaynağı yerine ayrı ayrı akümülatörler ile beslemenin sebebi, şebekeden ve güç kaynağının iç yapısından gelebilecek olası gürültü ve işaret karışmalarının önüne geçmek ve ölçümlerin kalitesini arttırmaktır.



Şekil 3.43: EM KB algılayıcıların çıkışlarında kullanılan YF kuvvetlendirici ve kazanç eğrisi.

EM KB algılayıcılar ile kullanılan YF kuvvetlendirici ve kuvvetlendiricinin frekansa bağlı kazanç eğrisi Şekil 3.43'de görülmektedir. Bu kuvvetlendiriciler 100 MHz - 900 MHz frekans aralığında yaklaşık 25 dB kazanç sağlamaktadır. Kuvvetlendiriciler, vector network analyzer (VNA) sistemi ile ölçülerek kazanç eğrileri çıkartılmıştır.



Şekil 3.44: Ölçümlerde kullanılan 4-kanallı osiloskop ve Matlab ile işaret işleme.

Kontrol ve ölçüm masası Şekil 3.44’de görülmektedir. Ölçümlerde LeCroy marka, LC574 model, 4-kanallı osiloskop kullanılmıştır. Osiloskop giriş kanallarına BNC konnektörler ile bağlı görünen mavi kablolar, birbirleri ile eşit uzunlukta, 8 metrelik RG58 tipi ekranlı koaksiyel kablolardır. Konum belirleme algoritmasının doğru sonuçlar vermesi için TDOA zaman farklarının doğru belirlenmesi çok önemlidir. Kullanılan kabloların eşit uzunlukta olması, alınan ölçümlerin zaman parametrelerine, dolayısı ile TDOA zaman farklarına doğrudan etki etmektedir.

Bilgisayar ile osiloskop arasında GPIB (IEEE 488) bağlantısı kurularak ve Matlab kodu yazılarak veri aktarımının hızlı ve otomatik olması sağlanmıştır.



4. BULGULAR

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında yapılan ölçümler ve kurulan deneysel düzenekler ile alınan sonuçlar verilmiştir. Ölçüm sonuçları değerlendirilerek, tasarımı ve yapımı gerçekleştirilen EM KB algılayıcının ve geliştirilen konum belirleme algoritmasının performansı değerlendirilmiştir.

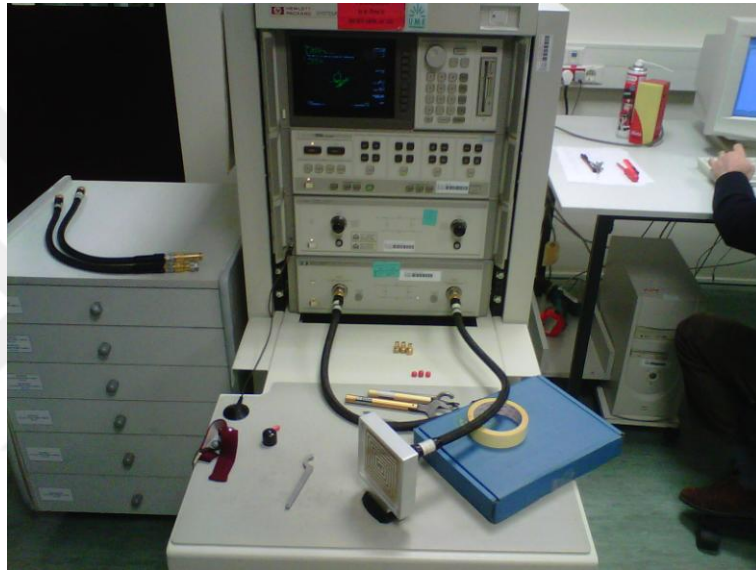
Bölüm 4.1’de, tasarımı ve yapımı gerçekleştirilen EM KB algılayıcının VNA sistemi ile analiz edilmesi sonucu alınan ölçüm sonuçları verilmiştir. Bu ölçüm sonuçları ile bilgisayarda gerçekleştirilen HFSS analizlerinin sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bölüm 4.2’de, YG altında üretilen KB’lerin ortaya çıkarttığı EM dalga yayılımının algılanması ile ilgili deneysel çalışmaların sonuçları verilmiştir. Oluşan EM yayılım enerjisi ile KB’nin büyüklüğü (seviyesi) arasındaki ilişki incelenmiştir. Ayrıca, EM KB algılayıcının FRS cihazı tarafından üretilen EM dalga yayılımını algılama performansı analiz edilmiştir.

Bölüm 4.3’de, EM KB işareti benzetimcisi tarafından üretilen EM dalga yayılımının dört adet EM KB algılayıcı tarafından algılanması ve benzetimcinin bulunduğu konumun kestirimi ile ilgili deneysel çalışmaların sonuçları verilmiştir. Geliştirilen hiperbolik konum belirleme algoritmasının ve enerji seviyesine göre TDOA zaman farklarını kestirim yönteminin performansı analiz edilmiştir.

4.1. ELEKTROMANYETİK KISMİ BOŞALMA ALGILAYICININ VECTOR NETWORK ANALYZER İLE ÖLÇÜM SONUÇLARI

Tasarımı ve yapımı gerçekleştirilen EM KB algılayıcının HFSS programı ile yapılan analiz sonuçları Bölüm 3.2.1’de verilmiştir. HFSS programı bir çok anten parametresini analiz edebilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemine dayanan bu analiz sonuçlarını doğrulamak için, yapımı gerçekleştirilen EM KB algılayıcı, TÜBİTAK UME RF ve Mikrodalga Laboratuvarı’nda bulunan VNA sistemine bağlanarak ölçümler yapılmıştır. Ölçüm süreci Şekil 4.1’de görülmektedir.

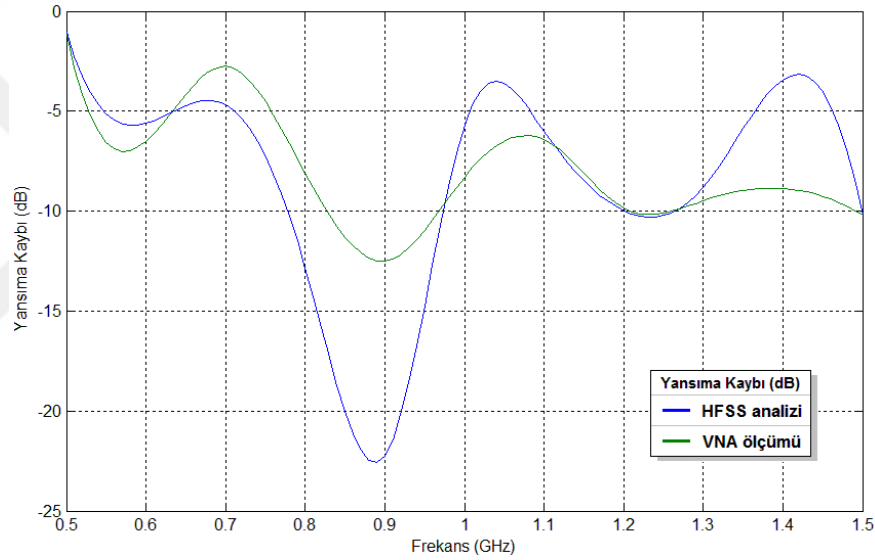


Şekil 4.1: Vector Network Analyzer ile EM KB algılayıcısının ölçümü.

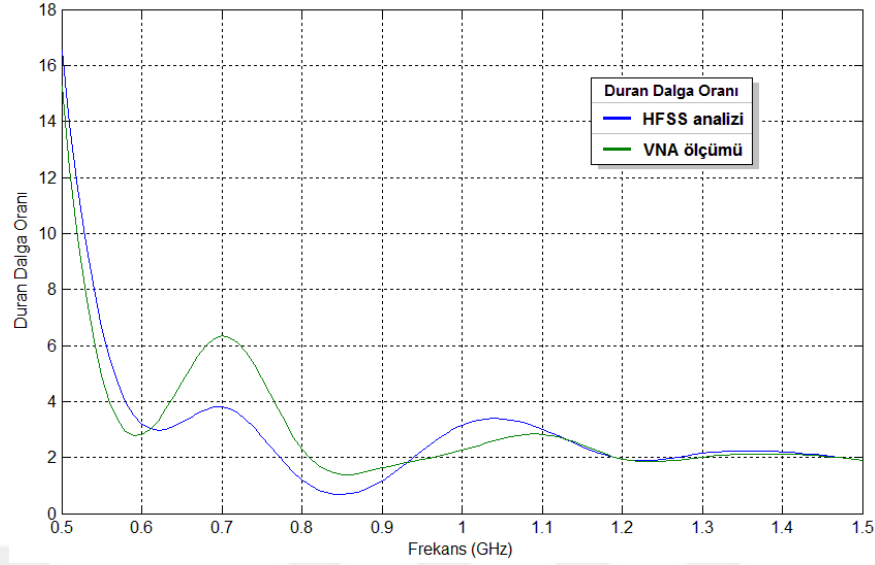
VNA kullanılarak EM KB algılayıcısının yansıma kaybı (return loss) ve duran dalga oranı (VSWR) parametreleri, 500 MHz - 1.5 GHz frekans aralığı için ölçülmüştür. Yansıma kaybı parametresinin HFSS analiz sonuçları ve VNA ölçüm sonuçları Tablo 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir. Duran dalga oranı parametresinin HFSS analiz sonuçları ve VNA ölçüm sonuçları Tablo 4.2 ve Şekil 4.3’de verilmiştir. Tablo 4.1 ve Şekil 4.2 incelenirse, yansıma kaybı parametresinin analiz ve ölçüm sonuçları grafiklerinin eğim (slope) açısından tutarlı olduğu ve bir çok noktada birbirine yakın değerlerde oldukları, en büyük farkın 0.9 GHz frekansında olduğu görülür. Tablo 4.2 ve Şekil 4.3 incelenirse, duran dalga oranı parametresinin analiz ve ölçüm sonuçları grafiklerinin de eğim (slope) açısından tutarlı olduğu ve bir çok noktada birbirine yakın değerlerde oldukları, en büyük farkın 0.7 GHz frekansında olduğu görülür.

Tablo 4.1: Yansıma kaybı parametresinin benzetim ve ölçüm karşılaştırması.

Frekans (GHz)	Yansıma Kaybı (dB) HFSS analizi	Yansıma Kaybı (dB) VNA ölçümü
0.5	-1.052	-1.142
0.6	-5.615	-6.503
0.7	-4.665	-2.758
0.8	-12.84	-8.110
0.9	-22.25	-12.52
1.0	-5.701	-8.283
1.1	-6.010	-6.425
1.2	-9.970	-9.850
1.3	-8.818	-9.476
1.4	-3.435	-8.875
1.5	-10.22	-10.22

**Şekil 4.2:** Yansıma kaybı parametresinin benzetim ve ölçüm karşılaştırması.**Tablo 4.2:** Duran dalga oranı parametresinin benzetim ve ölçüm karşılaştırması.

Frekans (GHz)	Duran Dalga Oranı HFSS analizi	Duran Dalga Oranı VNA ölçümü
0.5	16.53	15.24
0.6	3.20	2.80
0.7	3.81	6.35
0.8	1.20	2.30
0.9	1.17	1.62
1.0	3.16	2.25
1.1	3.01	2.83
1.2	1.93	1.95
1.3	2.14	2.01
1.4	2.20	2.12
1.5	1.89	1.89



Şekil 4.3: Duran dalga oranı parametresinin benzetim ve ölçüm karşılaştırması.

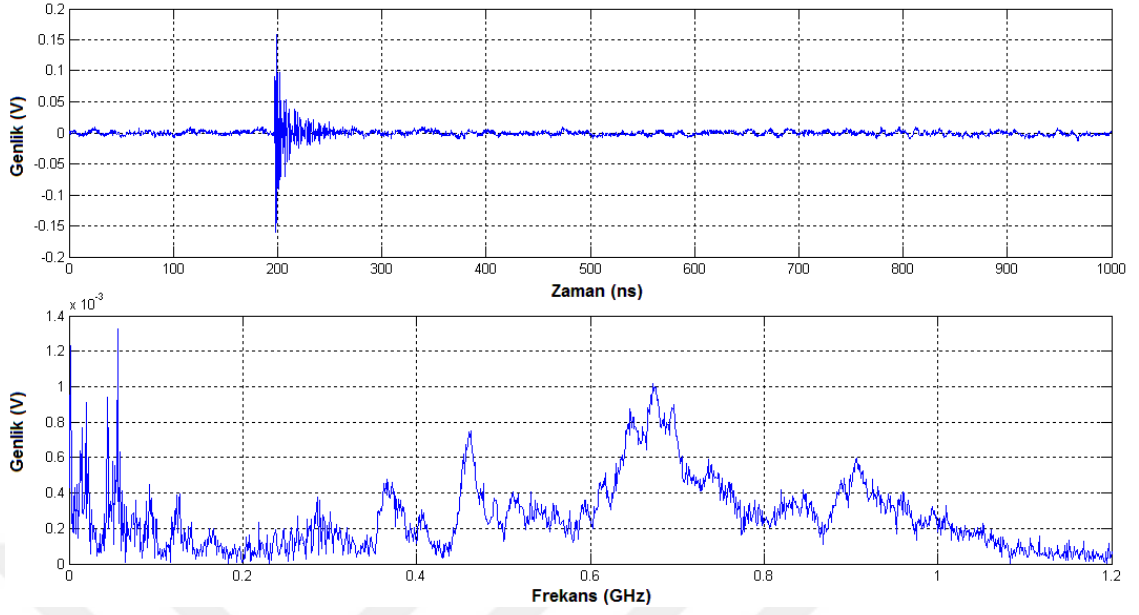
Bilgisayar ile gerçekleştirilen analizler için, gerçek uygulamaya mümkün olan en yakın modelin oluşturulmasına çalışılır, fakat her zaman model ile uygulama arasında farklar vardır ve hata getirebilir. Şekil 3.20 incelenirse, HFSS analiz modelinin uyartım noktasının (modelin merkezindeki kare nokta) simetrik olduğu görülür. Uygulamada ise, uyartım noktası SMA tipi bir konnektör olacağı için şekil olarak farklı yapıdadır. Şekil 3.22 incelenirse, EM KB algılayıcı baskılı devre plaketinin merkezinin tam simetrik olmadığı görülür. Bunun sebebi, SMA konnektör takılacak yerin oluşturulabilmesidir. Bunun yanında Şekil 3.26 incelenirse, yapımı tamamlanmış bir EM KB algılayıcıda SMA konnektör montajından gelen lehim noktaları görülür. Bu tür durumlar, bilgisayar analizleri ile gerçek ölçümler arasında fark oluşturabilmektedir. Analiz modeli ne kadar gerçeğe yakın olsa da ortam parametrelerinin tanımlanması bir yaklaşım ile olur ve hata kaynağıdır. Modeller oluşturulurken, modelin dış hatlarının bitiminin $\lambda/10$ kadar uzağından modeli içine alan bir sanal kutu çizilir. Bu kutunun $\lambda/4$ kadar dışında da ikinci bir sanal kutu çizilir. Birinci kutu “radiation box”, ikinci kutu “air box” adını alır. Sonlu elemanlar yönteminde sınır koşullarını bu yapılar belirler ve bunlara göre analiz yapılır. Bu sınırlı yapılardan dolayı da analizler ile ölçümler arasında farklar oluşur. Ayrıca daha önce bahsedilen, analiz için modelin tetrahedral biçimli sonlu elemanlara bölünmesi de bir hata kaynağıdır. Ne kadar çok elemana bölünebilirse o kadar çok işlem gücü gerekir fakat analiz sonuçları da gerçeğe o kadar yaklaşacaktır.

4.2. YÜKSEK GERİLİM İLE ÜRETİLEN KISMİ BOŞALMA İŞARETLERİNİ ALGILAMA SONUÇLARI

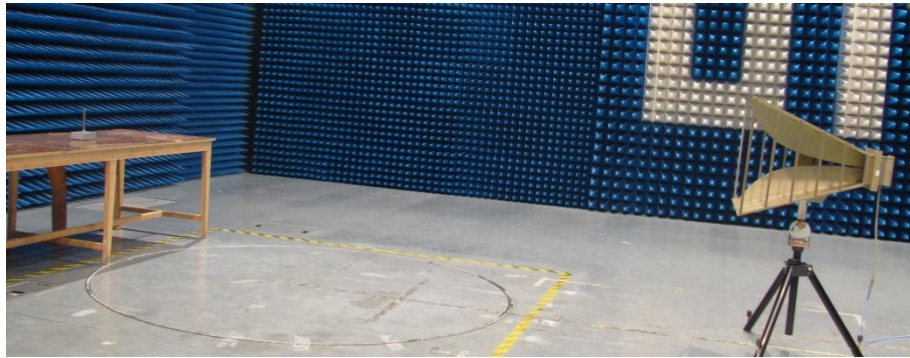
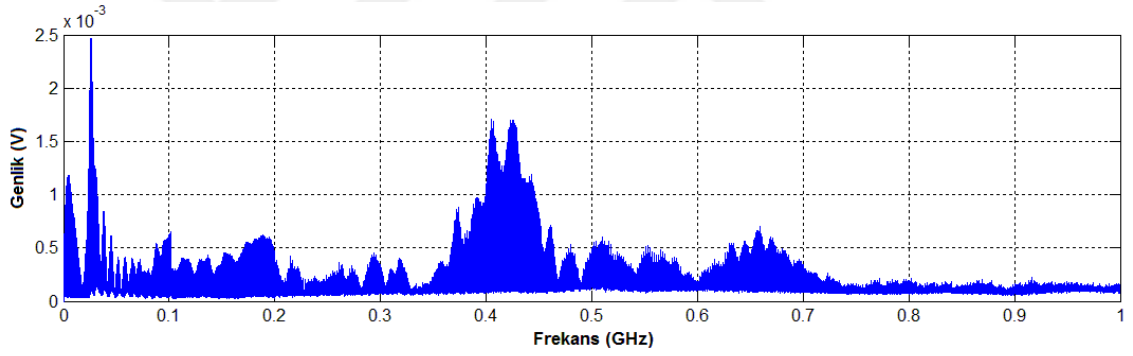
Laboratuvar ortamında, YG altında kontrollü bir şekilde KB oluşturulması ve ölçümü Bölüm 3.3’de, oluşan KB’lerin sonucunda ortaya çıkan EM dalga yayılımının algılanması ile ilgili deneysel düzenek Bölüm 3.4’de verilmiştir. Bu bölümde, elde edilen sonuçlar analiz edilecektir.

İlk olarak, KB sonucu ortaya çıkan EM dalga yayılımının algılanması için kurulan deneysel ölçüm düzeneğinin, EM dalga yayılımını algılama performansı test edilmiştir. Bu işlem için YG kaynağına bağlı elektrotların yerine FRS cihazı yerleştirilmiştir. Özellikle EMC laboratuvarlarında deneysel amaçlarla kullanılan FRS cihazı, belirli aralıklarla “electromagnetic burst pulse” tabir edilen işaretler yayar. Bu işaretler, KB sonucu ortaya çıkan EM dalga yayılımına benzer yapıdadır. Bu cihazın yaydığı EM dalgaların EM KB algılayıcı kullanılarak yapılan ölçümü, zaman ve frekans domeninde Şekil 4.4’de görülmektedir.

Tez çalışması için kullanılan FRS cihazı TÜBİTAK UME EMC Laboratuvarı’ndan temin edilmiştir. EM KB algılayıcı performans testi için referans olarak kullanılan bu cihazın referans bir ölçüm sistemi ile de ölçülmesi gereklidir. Bu amaçla, cihazın yaydığı EM dalgaların TÜBİTAK UME EMC Laboratuvarı’nda yapılan ölçüm sürecinden bir görüntü ve ölçüm sonucu Şekil 4.5’de verilmiştir. EMC laboratuvarındaki ölçümlerde, referans ölçüm sistemi olarak Rohde & Schwarz marka, ESIB40 model, EMI Test Receiver sistemi kullanılmıştır. 30 MHz - 200 MHz frekans aralığındaki ölçümler için bikonik algılayıcı, 200 MHz - 1000 MHz frekans aralığındaki ölçümler için horn tipi algılayıcı kullanılmıştır. Şekil 4.5’deki resimde, horn tipi algılayıcı ile ölçüm görüntüsü yer almaktadır. EMC laboratuvarları genel olarak zaman domeninde ölçümler yapmamakta, doğrudan frekans domeninde çalışmakta ve sonuçlarını da frekans domeninde ifade etmektedirler. Bu nedenle Şekil 4.5’de verilen ölçüm sonucu frekans domenindedir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de verilen ölçüm sonuçları karşılaştırılırsa, FRS cihazı tarafından yayımlanan geniş spektrumlu EM işaretin, EM KB algılayıcıyla ve EMI Test Receiver sistemi ile alınan ölçümlerinin benzer frekans spektrumuna sahip olduğu, fakat tam olarak bire bir örtüşmediği görülür. Buradaki benzerlik, frekans spektrumlarının form benzerliğidir.



Şekil 4.4: EM KB algılayıcı ile yakalanan işaret (“Field Reference Source” tarafından yayılan).



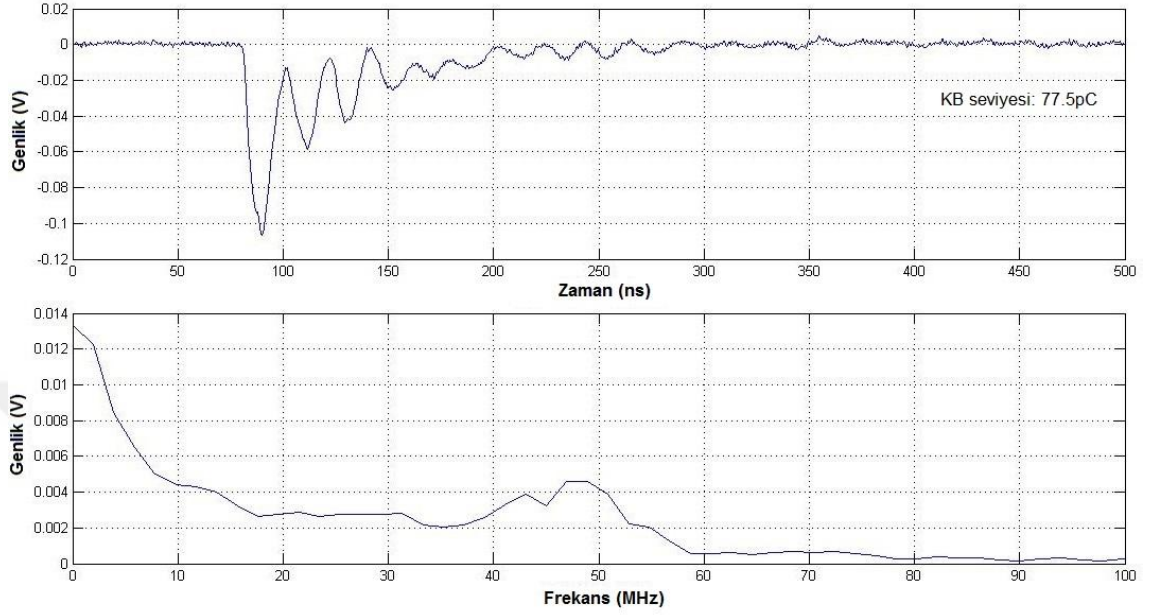
Şekil 4.5: “Field Reference Source” cihazının TÜBİTAK UME EMC Laboratuvarında ölçümü.

Belirli frekans bölgelerinde kayıt edilen spektrumlar oldukça tutarlı olmakla birlikte, bazı bölgelerde biçimsel olarak benzer fakat genlik olarak oldukça farklı sonuçlar gözlenmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi EMC laboratuvarında yapılan

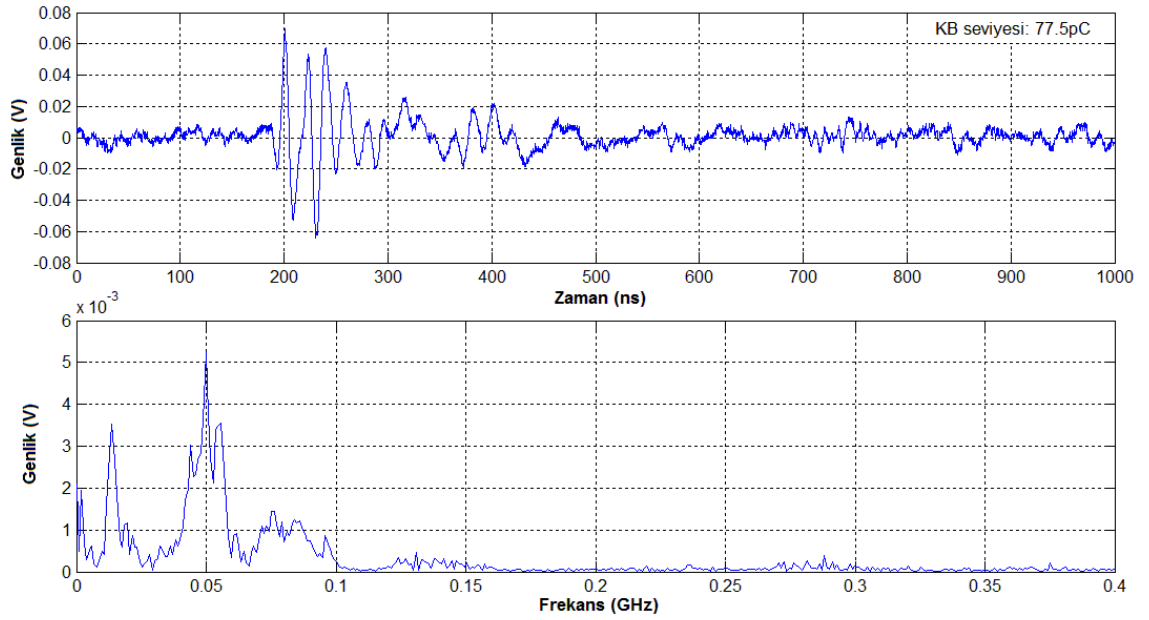
ölçümlerde, farklı ölçüm bölgeleri için bu frekans bölgesine uygun türde (biconic ve horn) referans algılayıcılar kullanılmıştır. Yine daha önceki analiz ve ölçüm sonuçlarına bakıldığında, tüm frekans bölgesi için EM KB algılayıcı doğrusal bir performans sergileyememektedir. Bu durum, ölçüm sonuçları arasındaki farkların kaynağıdır. Geniş bir frekans spektrumuna sahip EM dalga yayınının algılanması durumu göz önüne alındığında, tek bir algılayıcı yapısı ile elde edilen algılama başarımının yeterli olduğu görülmektedir.

Laboratuvar ortamında, YG altında kontrollü bir şekilde oluşturulan KB'ler ve bunlara bağlı olarak ortaya çıkan EM dalga yayınılarının algılanması ile ilgili deneysel sonuçlar Şekil 4.6 - Şekil 4.21'de verilmiştir. Bu şekillerin yer aldığı sayfalarda, ilk olarak KB akımının geçtiği R_m ölçüm direnci üzerine düşen gerilim işaretinin zaman ve frekans domenindeki gösterimi verilmiştir. Zaman domenindeki işaretin alan integrasyonu kullanılarak KB yük seviyesi bulunmuştur. Her şekil üzerinde, bulunan KB yük seviyesi belirtilmiştir. Bu şekillerin yer aldığı sayfaların devamında, EM KB algılayıcı tarafından algılanan ve osiloskop ile örneklenen EM işaretin zaman ve frekans domenindeki gösterimi verilmiştir.

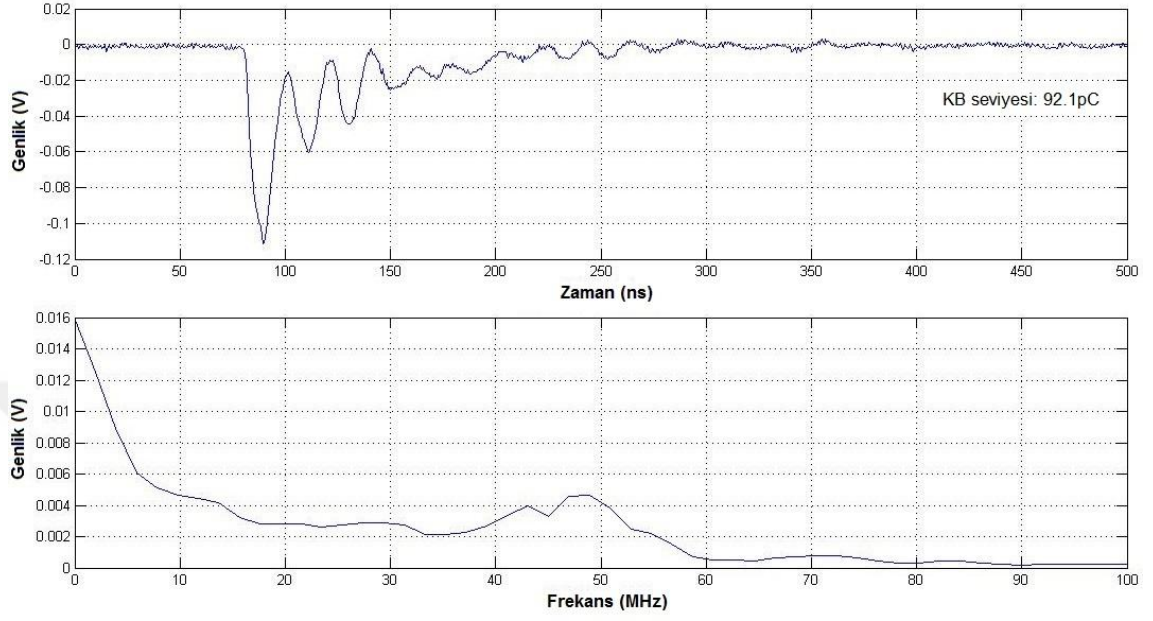
Verilen sonuçlar incelendiğinde ilk olarak, picocoulomb cinsinden elde edilen KB yük seviyelerinin nominal değerlerde olmayıp rastgele oluşları dikkat çekmektedir. KB işaretlerinin YG altında kontrollü bir şekilde elde edilmesi, istediğimiz herhangi bir değeri tekrarlanabilir bir şekilde üretebileceğimiz anlamına gelmemektedir. Önceki bölümlerde anlatıldığı üzere, KB yapısı gereği rastgele süreçlere bağlı bir oluşumdur. Elektrotlara uygulanan gerilim değerinin kontrollü bir şekilde artırılması ile bir noktada biriken yüklerin (elektronlar, iyonlar ve fotonlar) akışı başlar. Kontrol edebileceğimiz tek parametre, gerilim değerinin artırılması ve azaltılması ile belirli bir değer aralığında KB seviyesinin de artırılıp azaltılabilmesidir. Fakat, örneğin 100 pC, 200 pC, 300 pC gibi nominal değerlerde ve tekrarlanabilir bir şekilde kontrollü KB üretebilmek mümkün değildir. Örneğin 77.5 pC gibi bir seviyede KB oluşmuş ise, o noktada uyguladığımız gerilim değerini biraz arttırarak 77.5 pC değerinin biraz üzerinde bir KB'nin oluşmasını bekleyebiliriz. Elbette gerilim değerinin arttırılmasının bir sınırı vardır. Bu sınır aşıldığında, KB'den tam boşalma durumuna geçiş olacaktır ve yalıtkan ortam delinecektir.



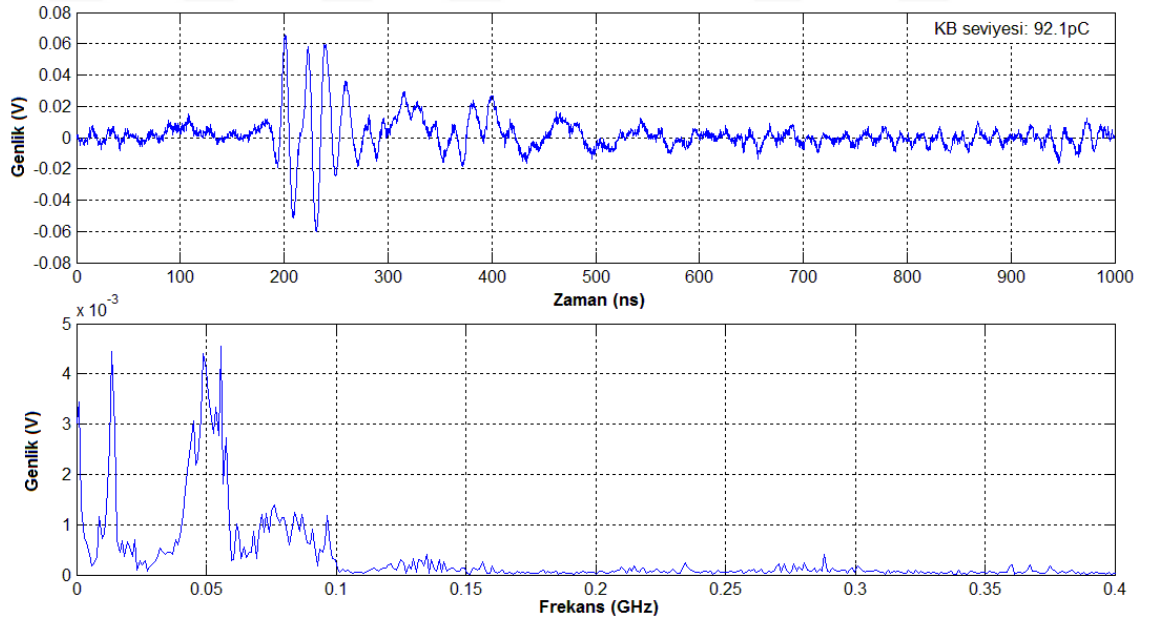
Şekil 4.6: R_m ölçüm direnci üzerindeki işaret (hesaplanan KB seviyesi: 77.5 pC).



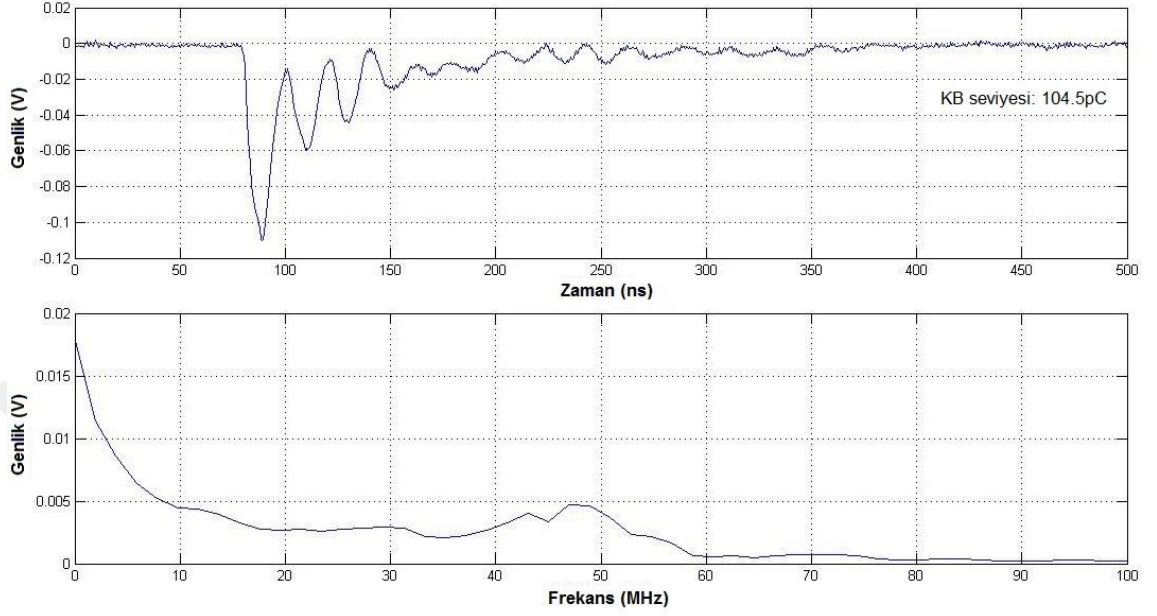
Şekil 4.7: EM KB algılayıcı ile yakalanan işaret (77.5 pC için).



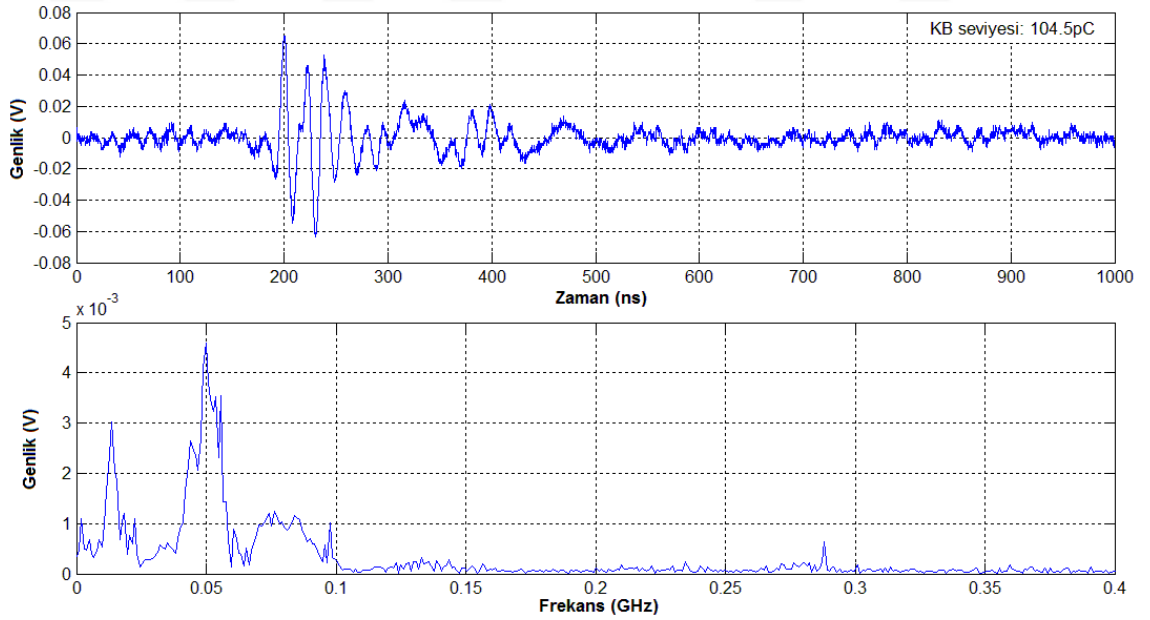
Şekil 4.8: R_m ölçüm direnci üzerindeki işaret (hesaplanan KB seviyesi: 92.1 pC).



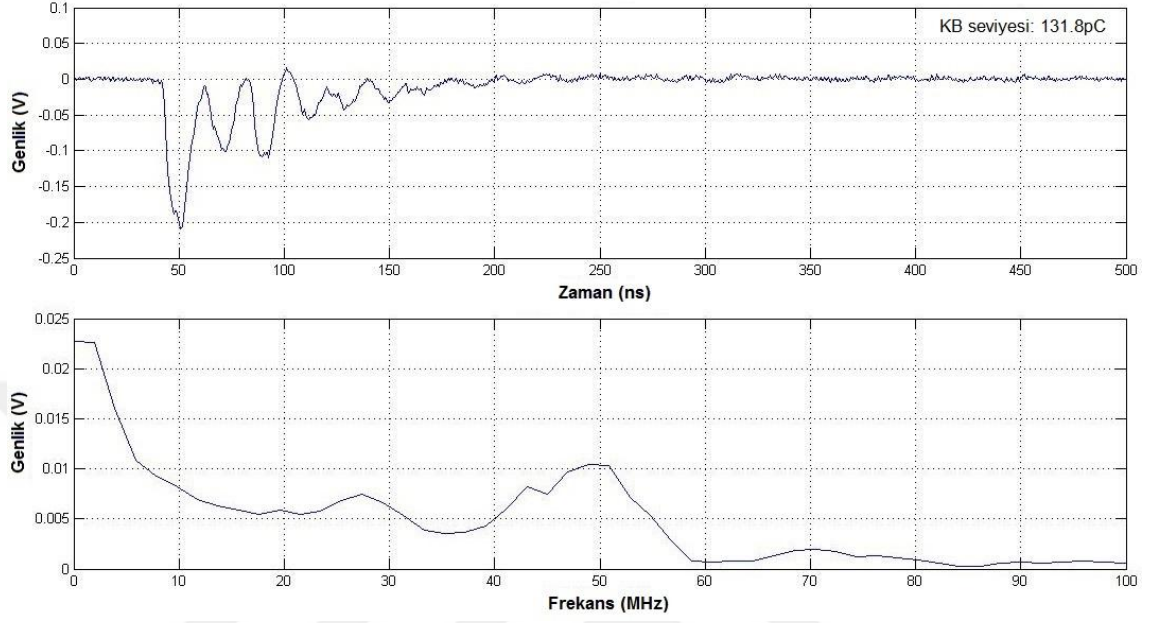
Şekil 4.9: EM KB algılayıcı ile yakalanan işaret (92.1 pC için).



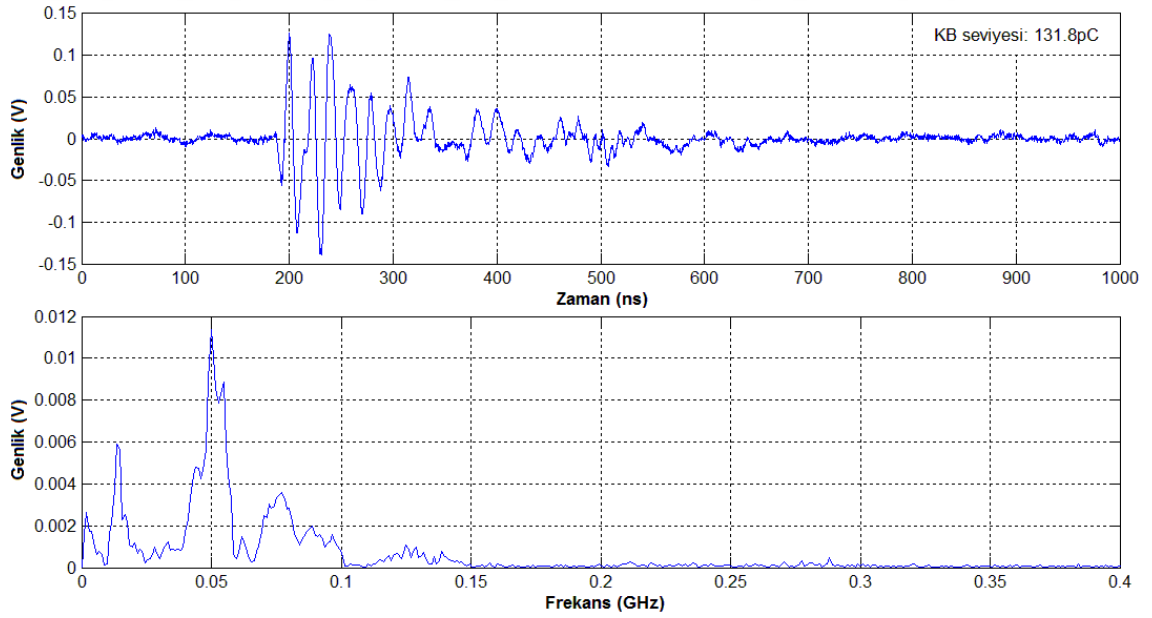
Şekil 4.10: R_m ölçüm direnci üzerindeki işaret (hesaplanan KB seviyesi: 104.5 pC).



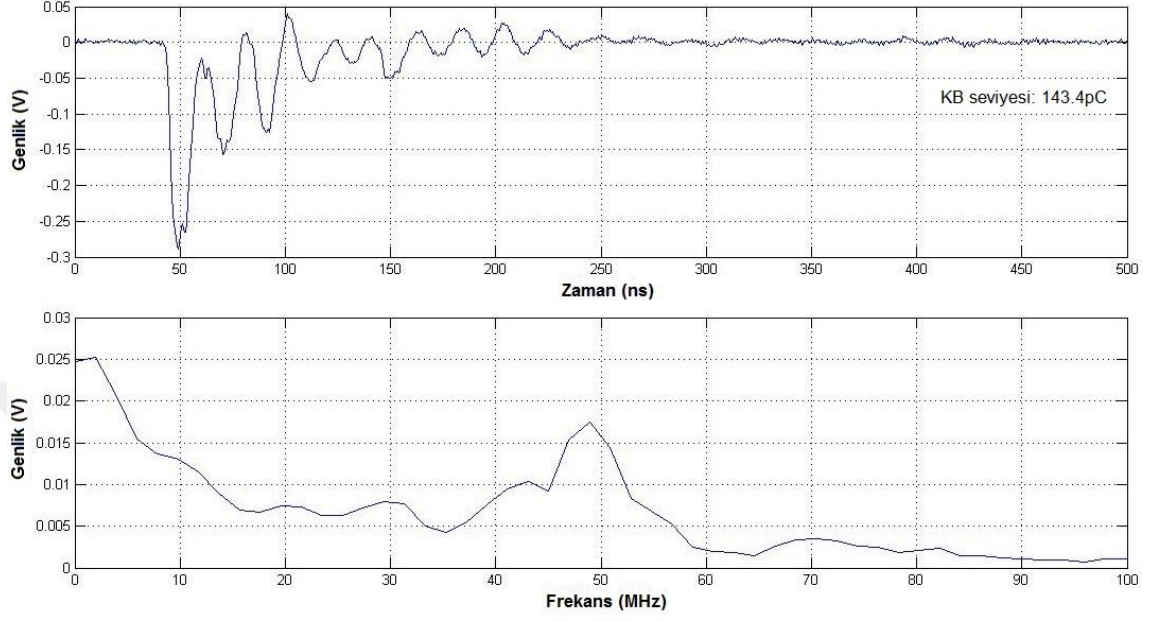
Şekil 4.11: EM KB algılayıcı ile yakalanan işaret (104.5 pC için).



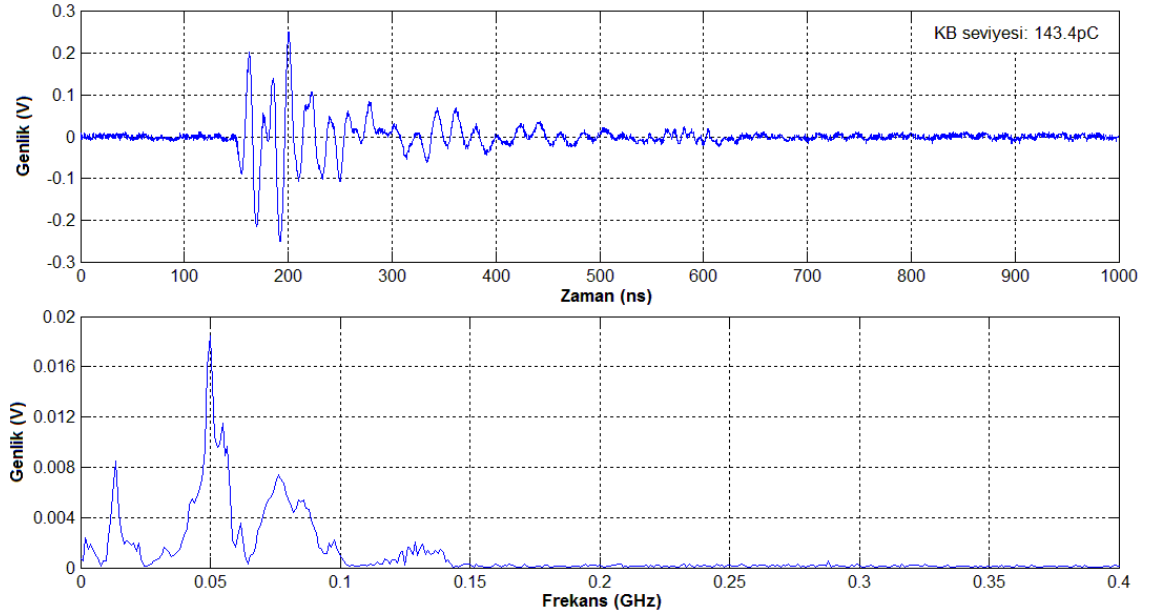
Şekil 4.12: R_m ölçüm direnci üzerindeki işaret (hesaplanan KB seviyesi: 131.8 pC).



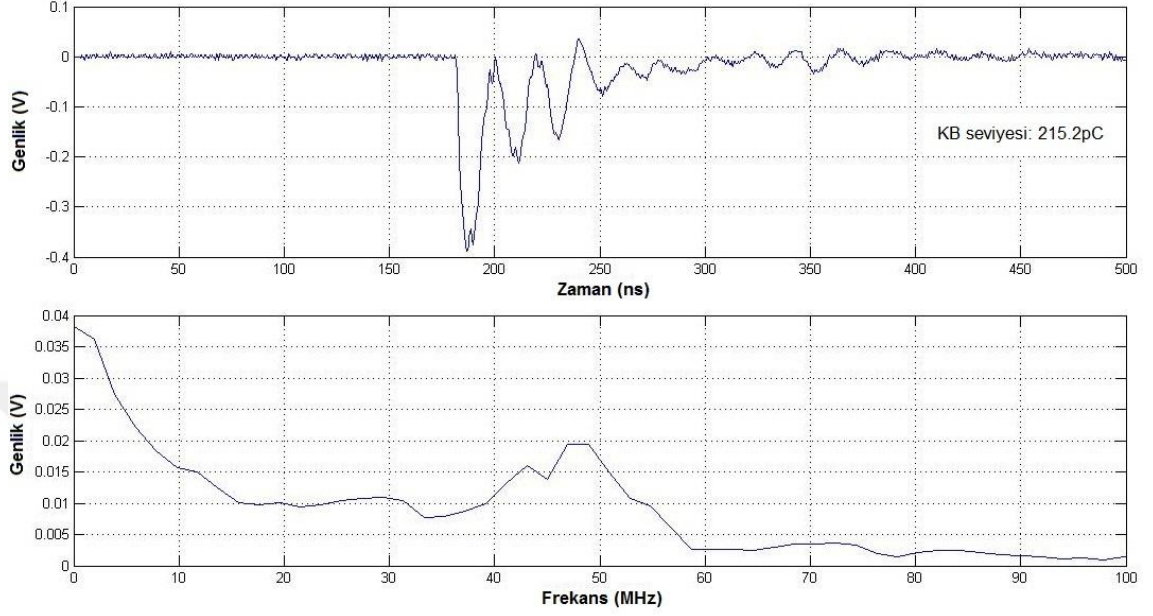
Şekil 4.13: EM KB algılayıcı ile yakalanan işaret (131.8 pC için).



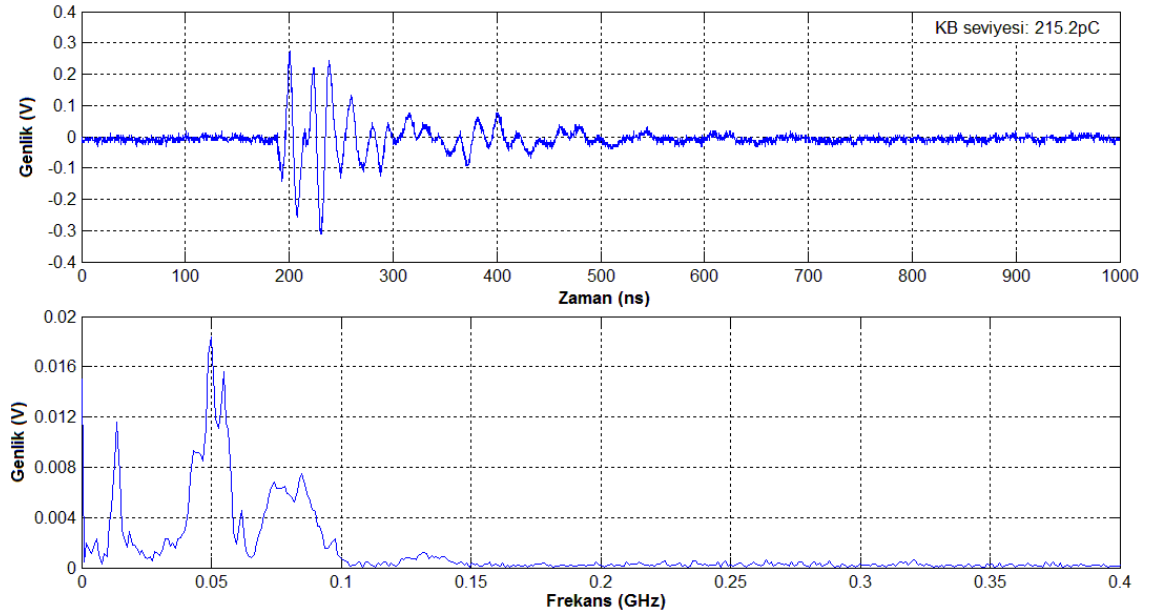
Şekil 4.14: R_m ölçüm direnci üzerindeki işaret (hesaplanan KB seviyesi: 143.4 pC).



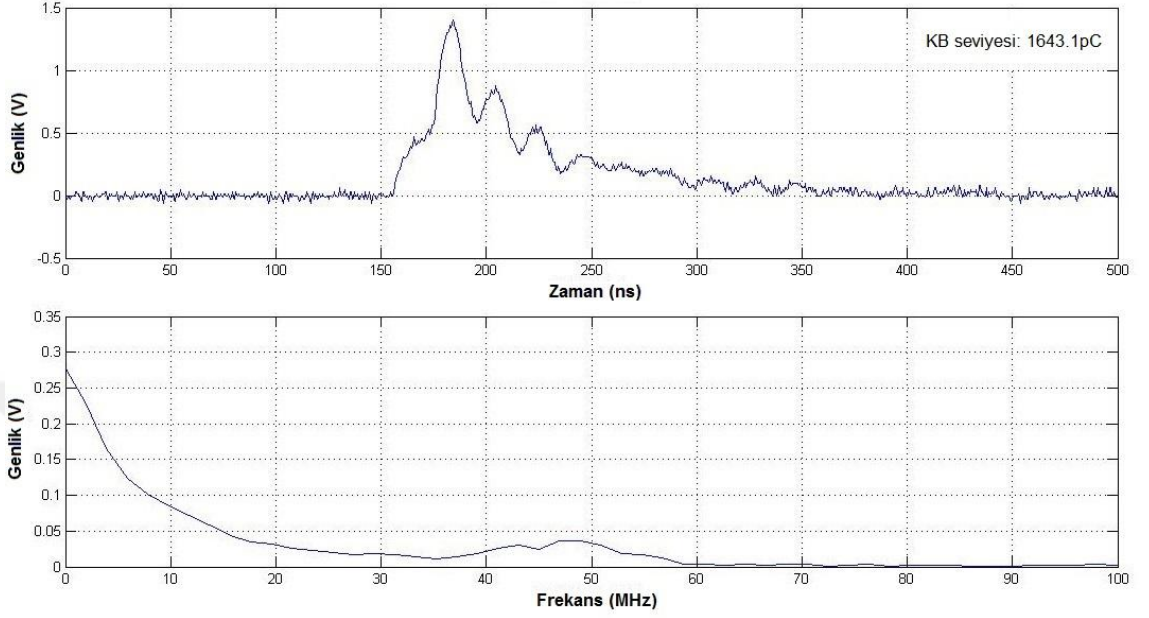
Şekil 4.15: EM KB algılayıcı ile yakalanan işaret (143.4 pC için).



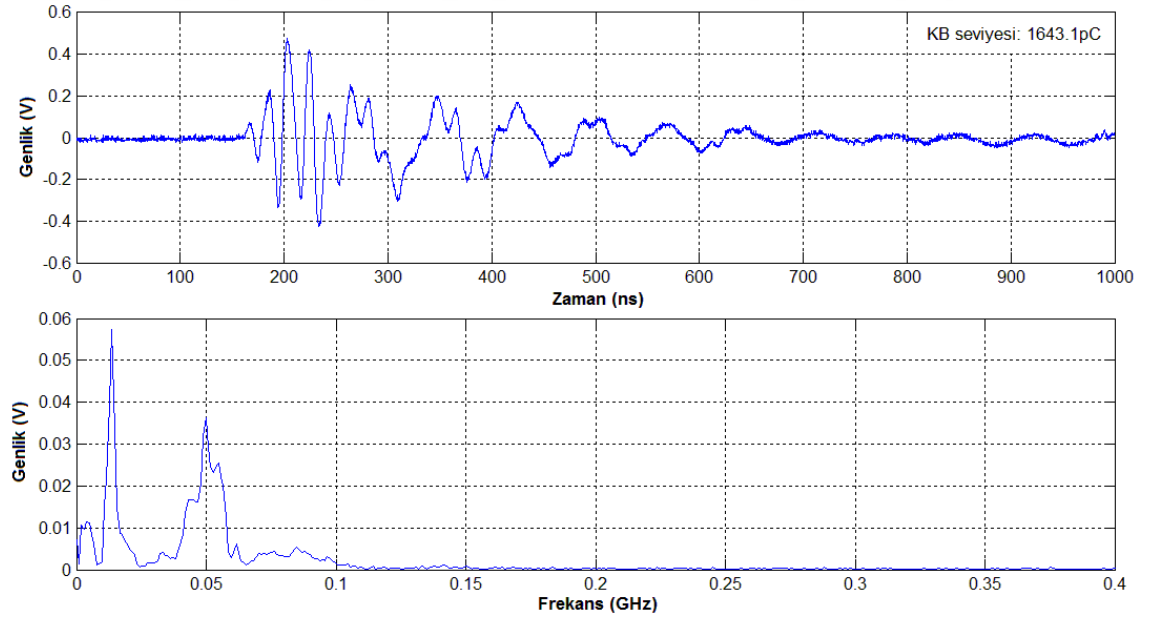
Şekil 4.16: R_m ölçüm direnci üzerindeki işaret (hesaplanan KB seviyesi: 215.2 pC).



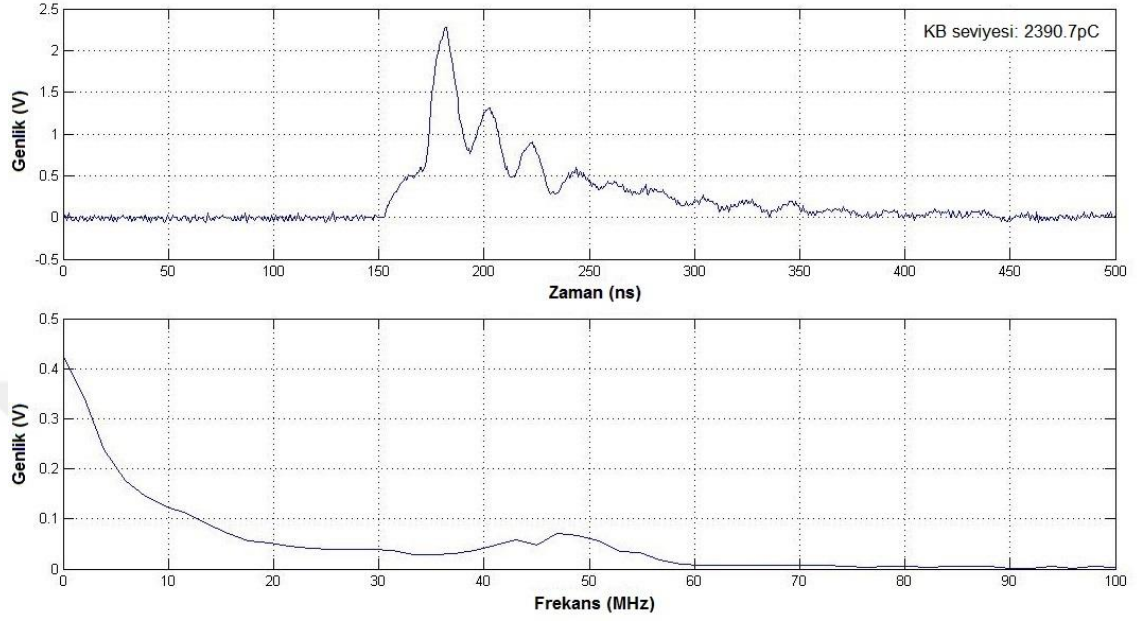
Şekil 4.17: EM KB algılayıcı ile yakalanan işaret (215.2 pC için).



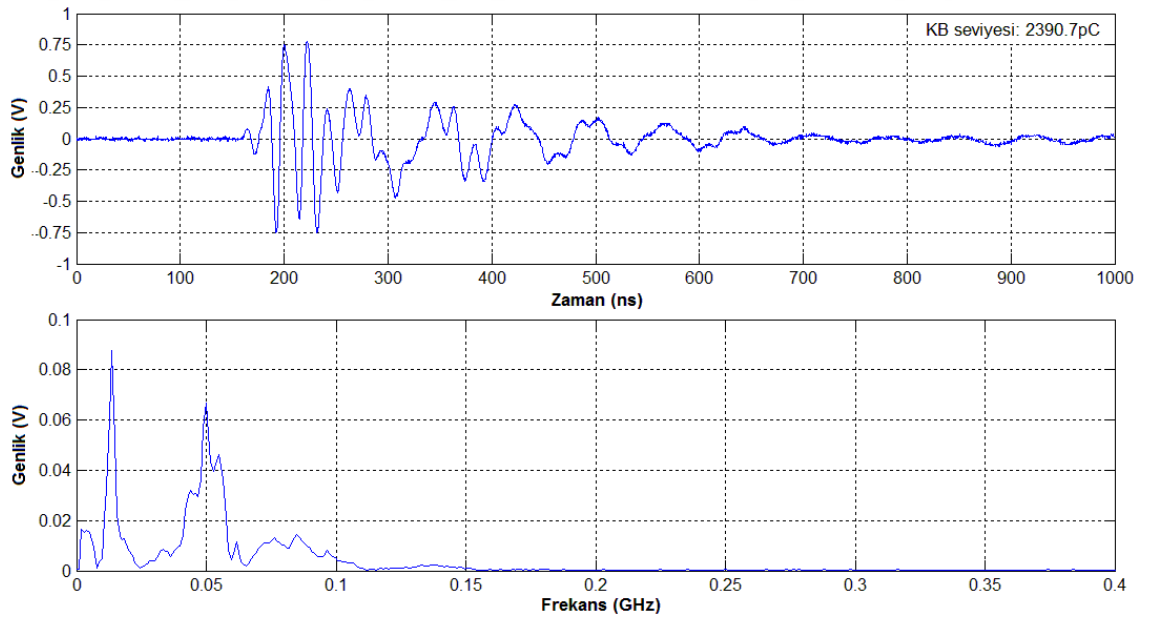
Şekil 4.18: R_m ölçüm direnci üzerindeki işaret (hesaplanan KB seviyesi: 1643.1 pC).



Şekil 4.19: EM KB algılayıcı ile yakalanan işaret (1643.1 pC için).

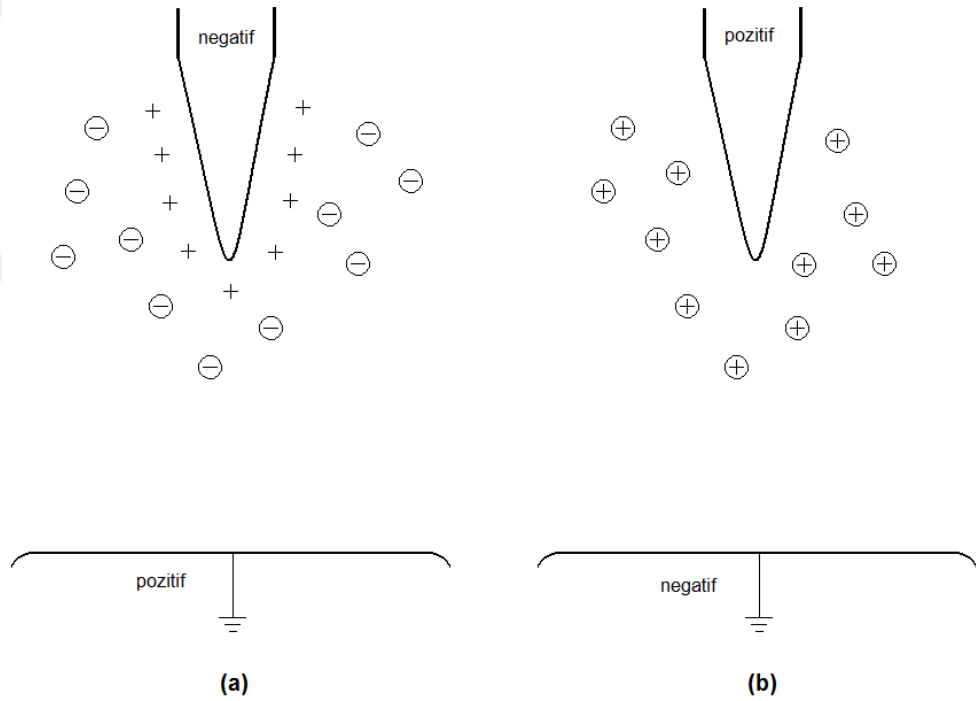


Şekil 4.20: R_m ölçüm direnci üzerindeki işaret (hesaplanan KB seviyesi: 2390.7 pC).



Şekil 4.21: EM KB algılayıcı ile yakalanan işaret (2390.7 pC için).

Şekil 4.18 ve Şekil 4.20 incelenirse, R_m ölçüm direnci üzerine düşen KB akım darbelerinin (1643.1 pC ve 2390.7 pC için) pozitif işaretler olduğu görülür. Halbuki diğer şekillerde verilen KB işaretleri negatif akım darbeleri şeklindedir ve pozitif işaretlerden çok daha düşük KB seviyelerine sahiptirler. Bu durum tümüyle YG altında KB üretmek için kullanılan elektrot düzeneğinin yapısı ile ilgilidir. Şekil 4.6, Şekil 4.8, Şekil 4.10, Şekil 4.12, Şekil 4.14 ve Şekil 4.16 ile verilen KB işaretleri, sivri uçlu çubuk elektrota bağlı YG kaynağının negatif yarı periyodunda oluşmuşlardır. Bu süreç, negatif sivri uçlu çubuk elektrot - pozitif düzlem elektrot düzeneği şeklinde incelenmelidir. Şekil 4.18 ve Şekil 4.20 ile verilen KB işaretleri ise, YG kaynağının pozitif yarı periyodunda oluşmuşlardır. Bu süreç ise, pozitif sivri uçlu çubuk elektrot - negatif düzlem elektrot düzeneği şeklinde incelenmelidir.



Şekil 4.22: Sivri uç - düzlem elektrot düzeneğinin pozitif ve negatif periyotlardaki davranışı.

Sivri uç - düzlem elektrot düzeneğinin, YG kaynağının pozitif ve negatif periyotlardaki davranışı sonucu ortaya çıkan KB ve hatta tam boşalma mekanizmaları birbirinden oldukça farklıdır. Şekil 4.22 (a) ile gösterilen durumda (YG kaynağının negatif periyotta olduğu), Townsend türü boşalma mekanizmasına bağlı olarak negatif KB akım darbeleri gözlenir. Sivri uçlu çubuk elektrottan elektronların çevreye yayılması sonucunda pozitif elektriksel yükler de oluşur. Fakat bu bölgenin ilerisindeki serbest elektronlar, başka

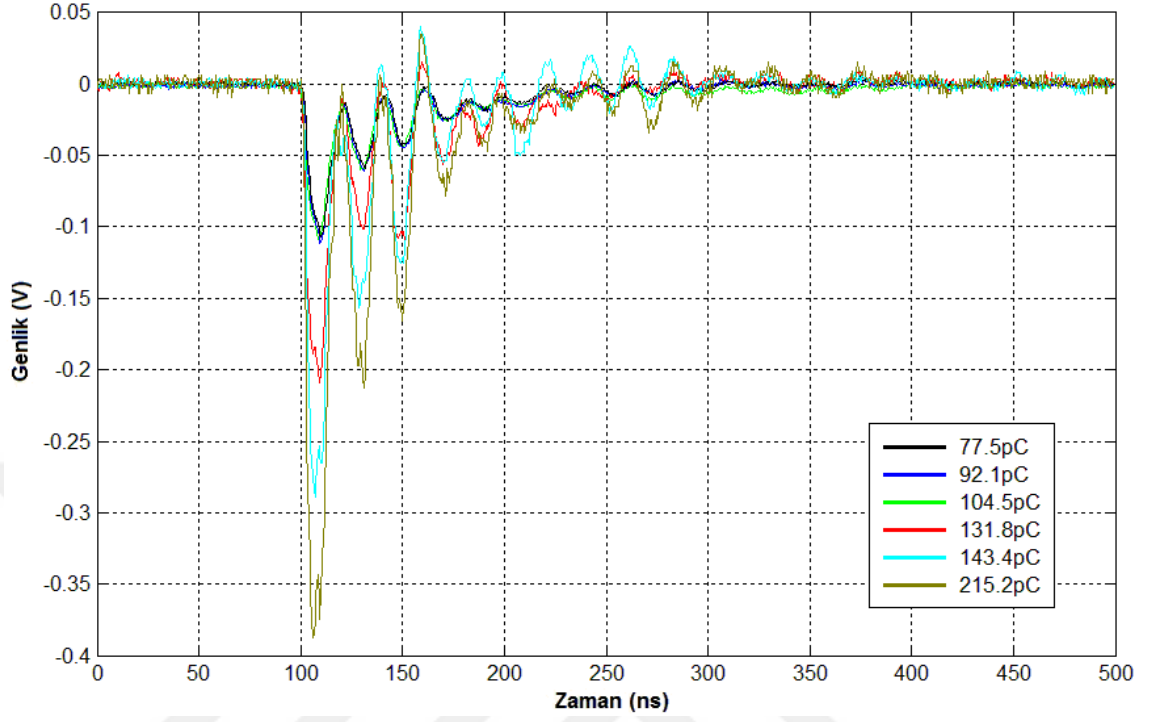
serbest elektronlarında oluşmasını sağlar. Bu nedenle sivri uçlu çubuk elektrotun sivri ucuna etkiyen elektrik alanın şiddeti azalır. Yüklerin kısa sürede elektrotun ucundan uzaklaşması ile elektrik alan güçlenir ve KB'ler başlar.

Şekil 4.22 (b) ile gösterilen durumda ise (YG kaynağının pozitif periyotta olduğu) boşalma mekanizması farklılık gösterir. Kanal boşalma teorisine göre yalıtkan gaz ortamının plazma kanalı oluşumu sonrası delinmesi ile tamamlanan süreç, sivri uçlu çubuk elektrotun bağlı olduğu YG kaynağının pozitif periyodunda gerçekleşmektedir. Yüksek elektrik alanda negatif yüklü bir katodun bulunmayışı nedeniyle KB oluşumları daha yüksek gerilim seviyelerinde gözlenir. sivri uçlu çubuk elektrot anot durumunda olduğu için oluşan pozitif yükler, anot civarındaki yüksek elektrik alanın etkisini azaltırlar. Yüklerin dağılması sonrası elektrik alan güçlenir ve KB oluşumu başlar.

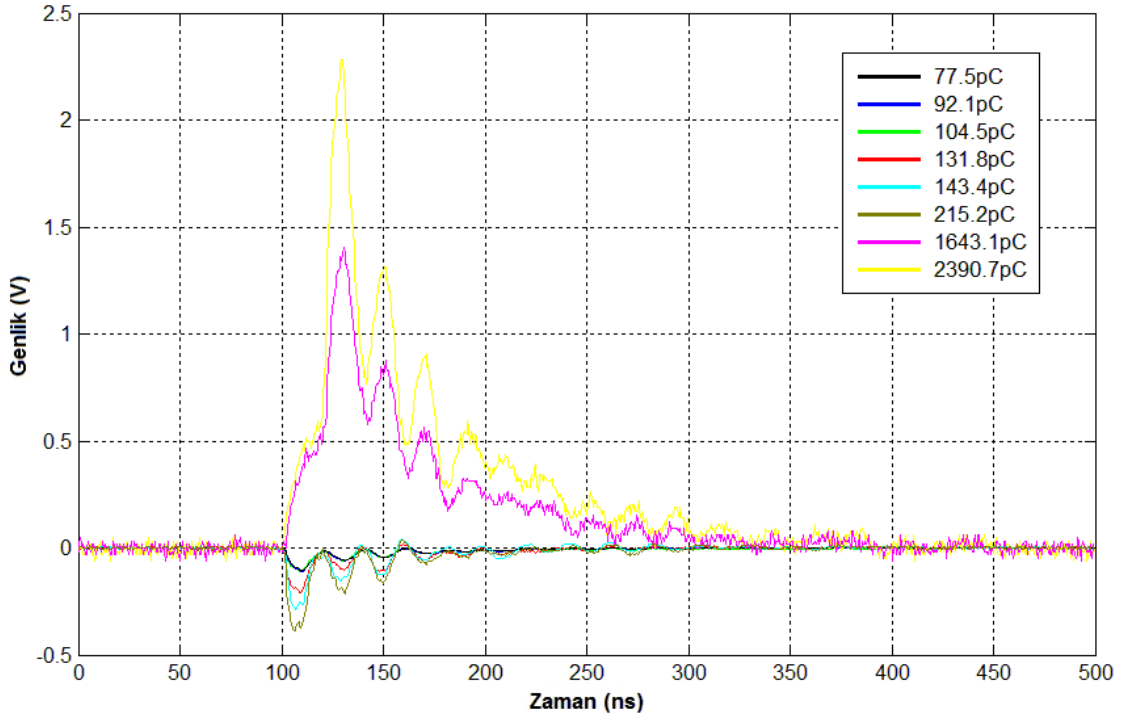
Gerçektende yapılan deneysel ölçümlerde, uygulanan gerilim değerinin göreceli olarak düşük olduğu noktalarda, düşük değerli ve negatif yönlü KB işaretleri elde edilmiştir. YG değeri arttırıldığında ise, belirli bir noktadan sonra Şekil 4.18 (1643.1 pC) ve Şekil 4.20 (2390.7 pC) ile verilen türde, yüksek değerli ve pozitif yönlü KB işaretleri elde edilmiştir. Gerilim değerinin bu bölgede tutulmasının ve çok az miktarlarda arttırılmasının bile, KB'den tam boşalmaya geçilmesine neden olduğu görülmüştür. Çünkü kanal boşalması sonucu oluşan pozitif KB akım darbeleri, daha büyük genliğe sahiptir ve düzensizdirler.

Şekil 4.6 – Şekil 4.21 ile verilen grafiksel sonuçların bir arada değerlendirilmesi daha uygun olacaktır. Ayrıca, pozitif ve negatif periyotlarda ortaya çıkan farklı iki boşalma mekanizmasının etkisinin sonuçlarını görebilmek için pozitif periyotta oluşan yüksek seviyeli KB'lerin hem yer aldığı hem de yer almadığı durum ayrı ayrı verilmelidir. Elde edilen grafiksel sonuçlar Şekil 4.23 – Şekil 4.30'da verilmiştir.

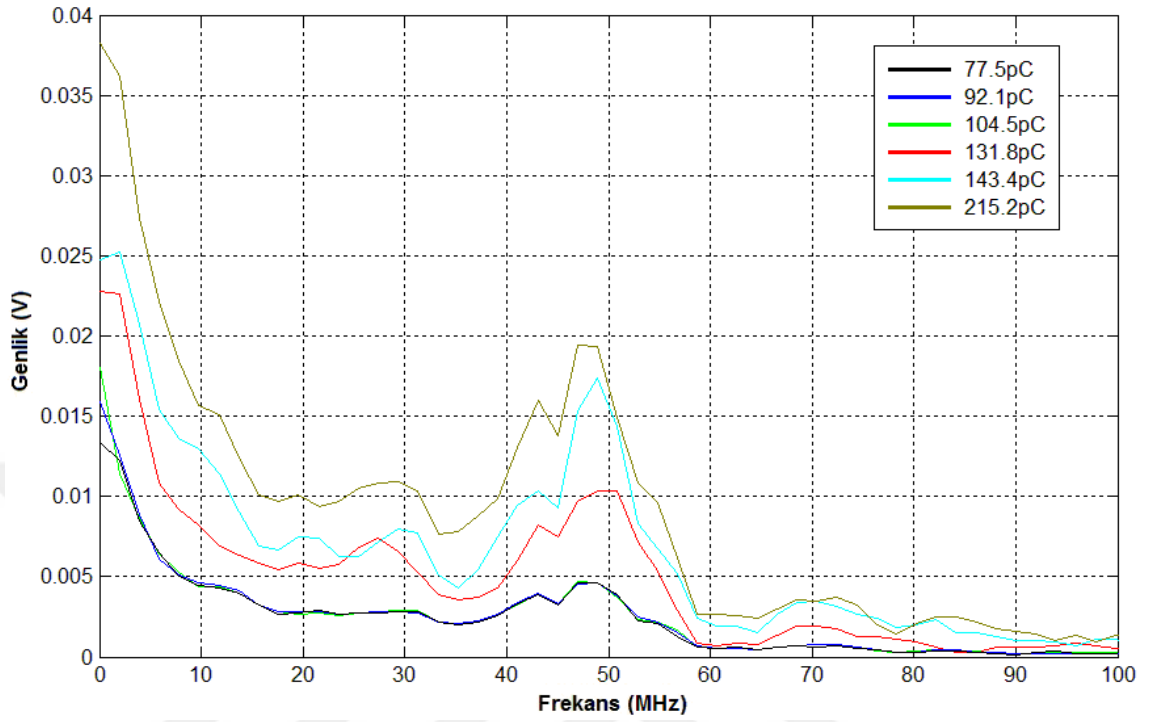
Şekil 4.23 ve Şekil 4.24 incelenirse, uygulanan YG değerinin arttırılması ve KB mekanizmasının değişimi ile birlikte, ortaya çıkan elektriksel işaretin de oldukça değiştiği görülür. Fakat Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'ya bakıldığında, bu elektriksel işaretlerin frekans domenindeki bileşenlerinin fazla değişmediği, sadece düşük frekans bölgesindeki bileşen genliklerinin arttığı görülmektedir. R_m ölçüm direncinin değeri de bu noktada önemli bir etkendir.



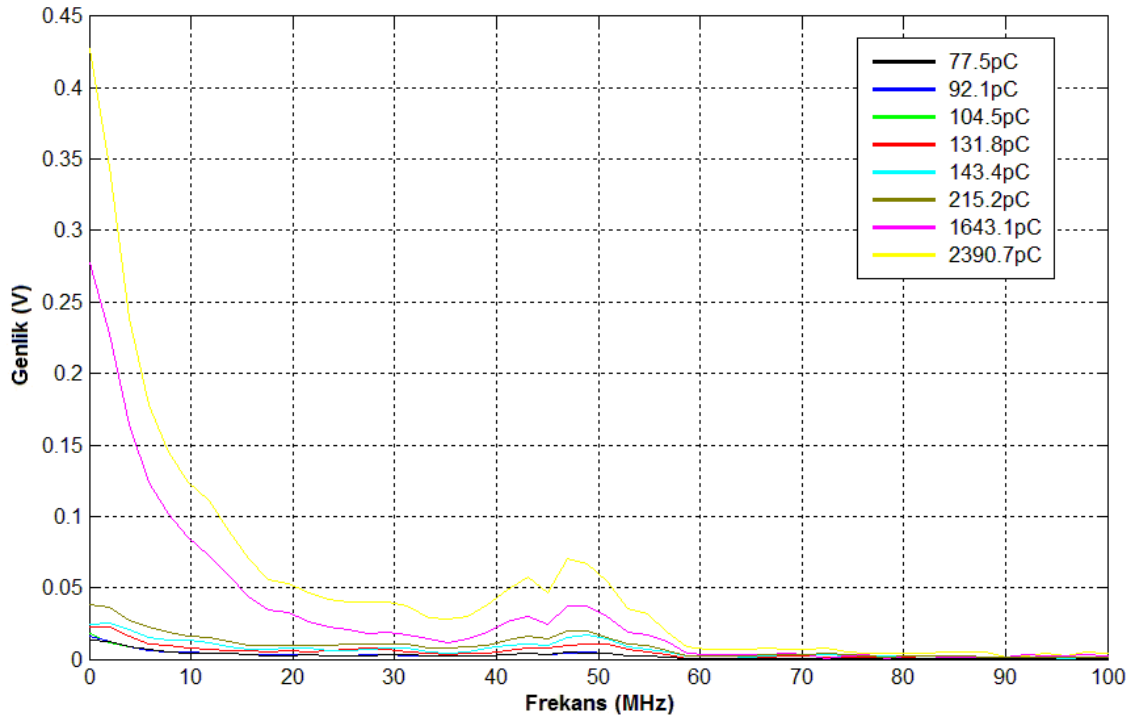
Şekil 4.23: R_m ölçüm direnci üzerindeki işaretler (negatif KB darbeleri, zaman domeni).



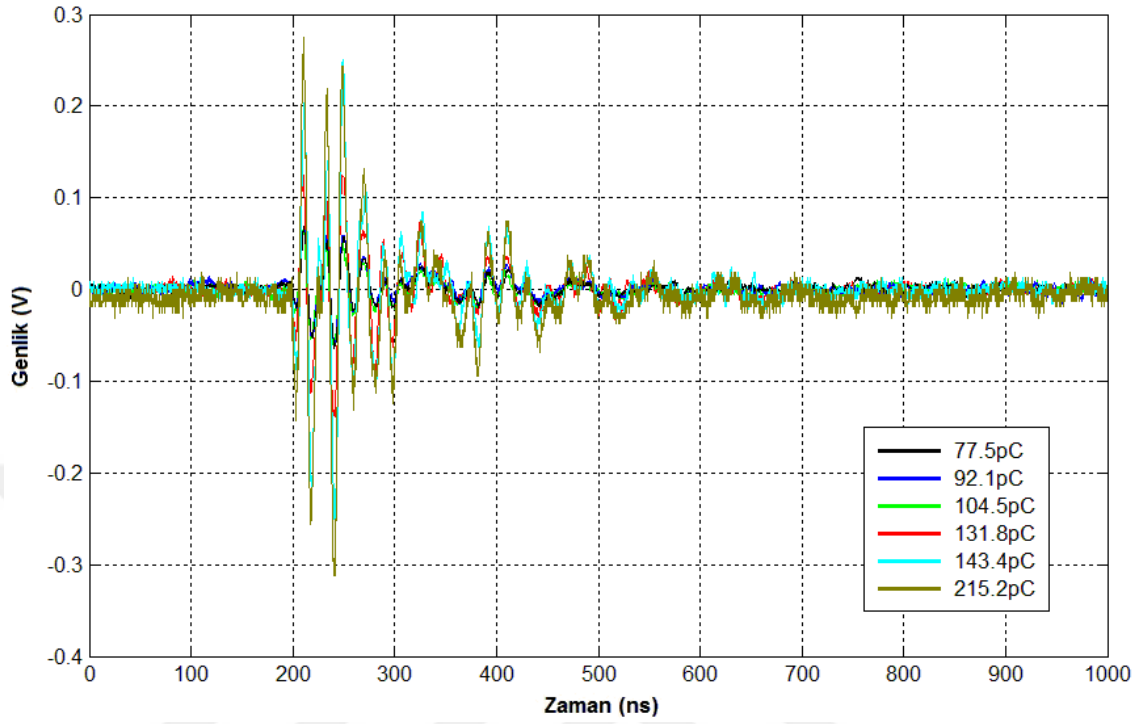
Şekil 4.24: R_m ölçüm direnci üzerindeki işaretler (negatif ve pozitif KB darbeleri, zaman domeni).



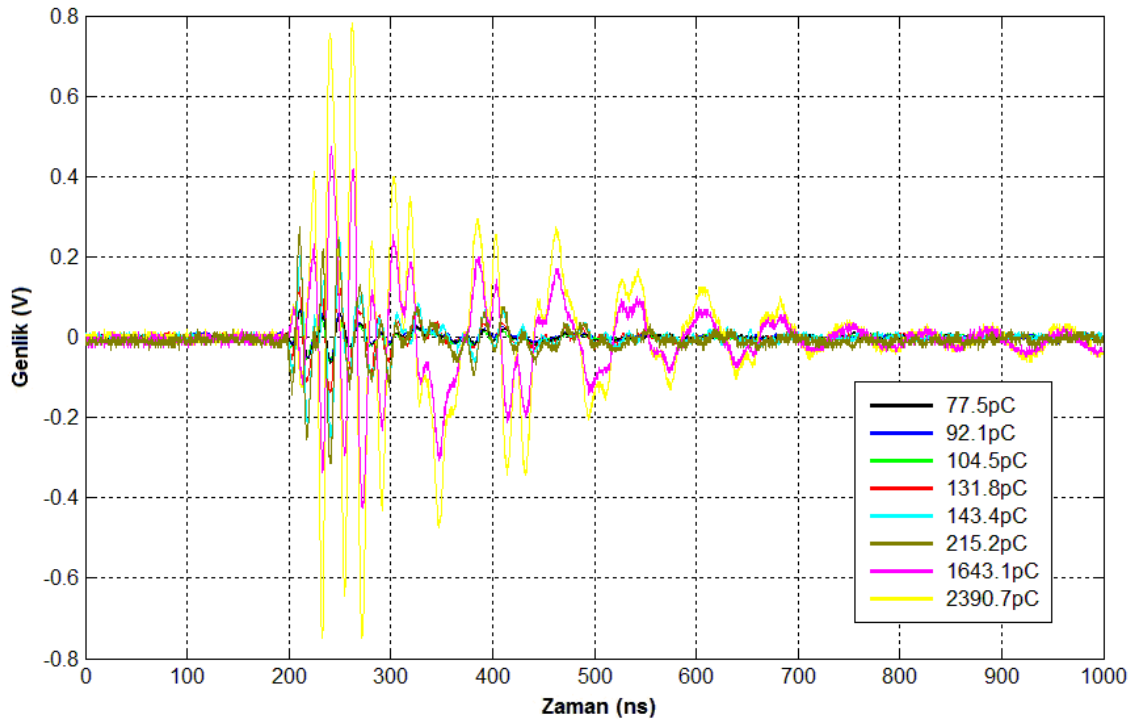
Şekil 4.25: R_m ölçüm direnci üzerindeki işaretler (negatif KB darbeleri, frekans domeni).



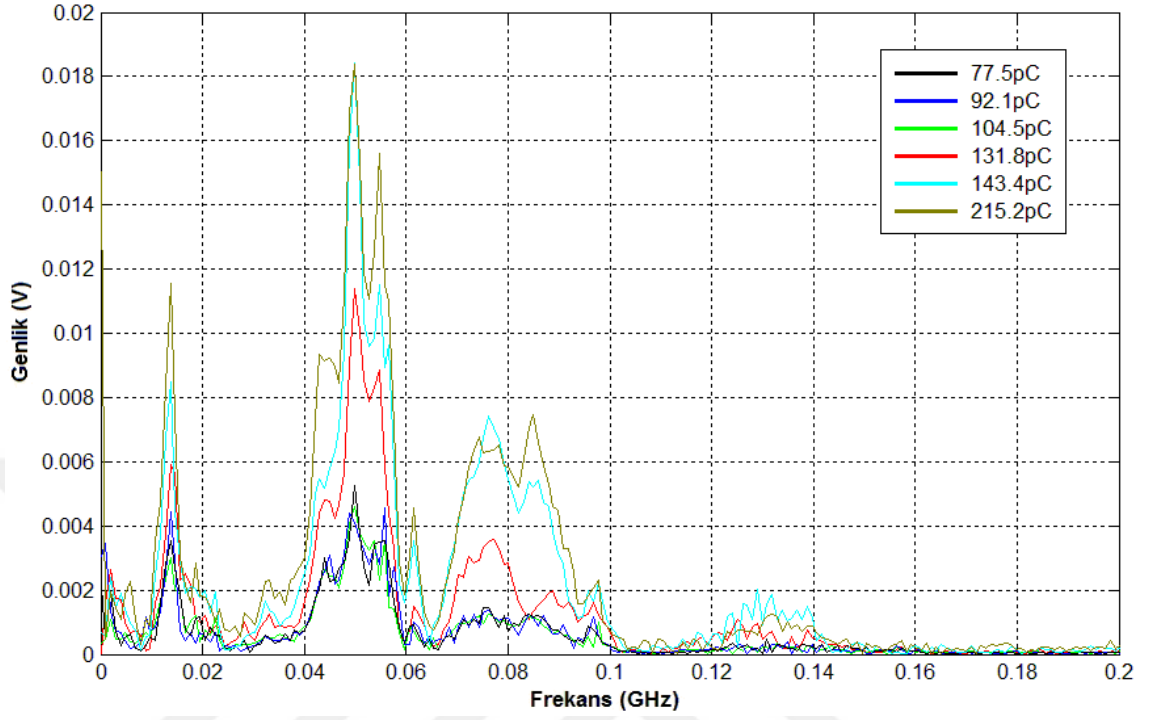
Şekil 4.26: R_m ölçüm direnci üzerindeki işaretler (negatif ve pozitif KB darbeleri, frekans domeni).



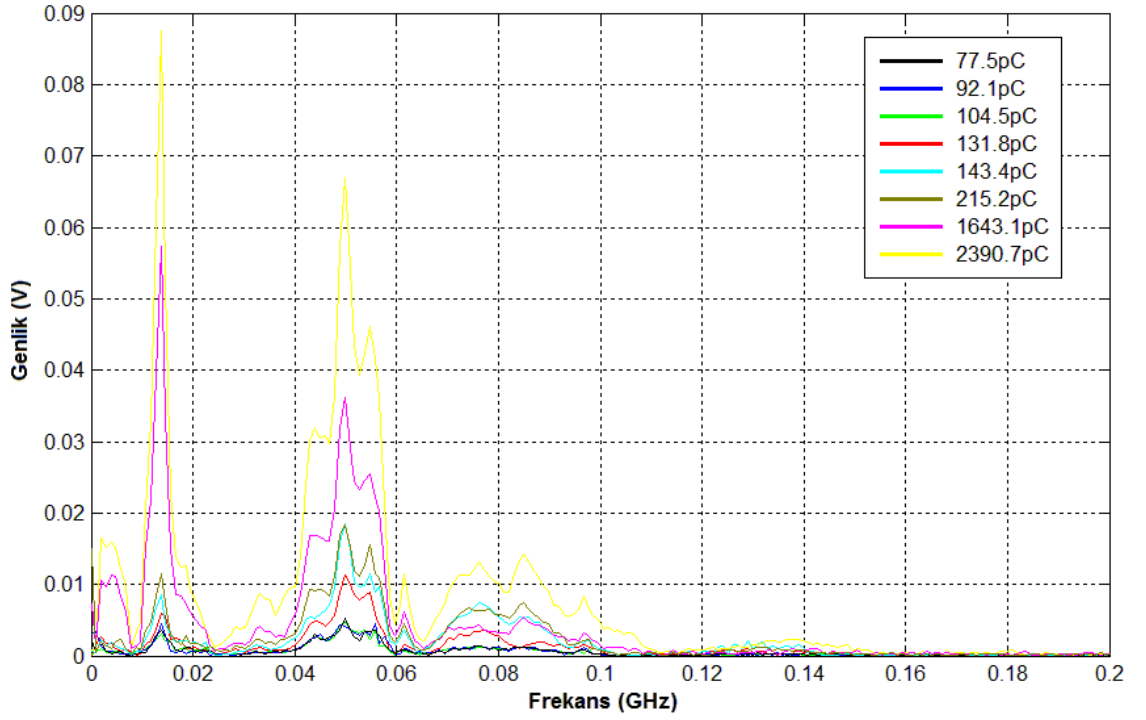
Şekil 4.27: EM KB algılayıcı ile yakalanan işaretler (negatif KB darbeleri, zaman domeni).



Şekil 4.28: EM KB algılayıcı ile yakalanan işaretler (negatif ve pozitif KB darbeleri, zaman domeni).



Şekil 4.29: EM KB algılayıcı ile yakalanan işaretler (negatif KB darbeleri, frekans domeni).



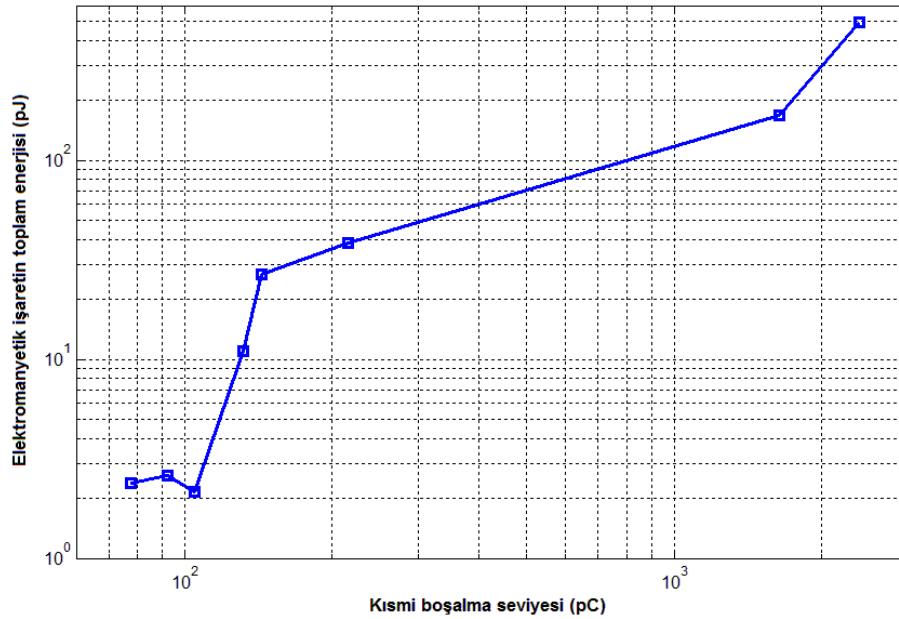
Şekil 4.30: EM KB algılayıcı ile yakalanan işaretler (negatif ve pozitif KB darbeleri, frekans domeni).

Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’de, ortaya çıkan EM dalga yayınının EM KB algılayıcı ile alınan ölçümleri görülmektedir. Şekil 4.27’de verilen işaretlerin hepsi negatif KB işaretleri ile oluşmuş EM dalgalarıdır. Pozitif KB işaretleri ile oluşan EM dalga yayını ise zaman domeninde oldukça farklı davranış göstermektedir (Şekil 4.28). Bu duruma bağlı olarak Şekil 4.29 ve Şekil 4.30 incelenirse, farklı KB mekanizmalarının farklı EM yayını spektrumları ortaya çıkarttığı görülmektedir. Bölüm 3.4.1.1’de (3.35) ve (3.36) denklemleri ile tanımlanmış olan toplam enerji değeri, Şekil 4.28 ile verilen EM işaretler için hesaplanmış ve Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3: KB seviyeleri ve oluşan EM KB işaretlerinin toplam enerjisi.

KB seviyesi (pC)	EM KB işaretinin toplam enerjisi (pJ)
77.5	2.3754
92.1	2.6002
104.5	2.1728
131.8	10.998
143.4	26.877
215.2	38.398
1643.1	168.09
2390.7	496.64

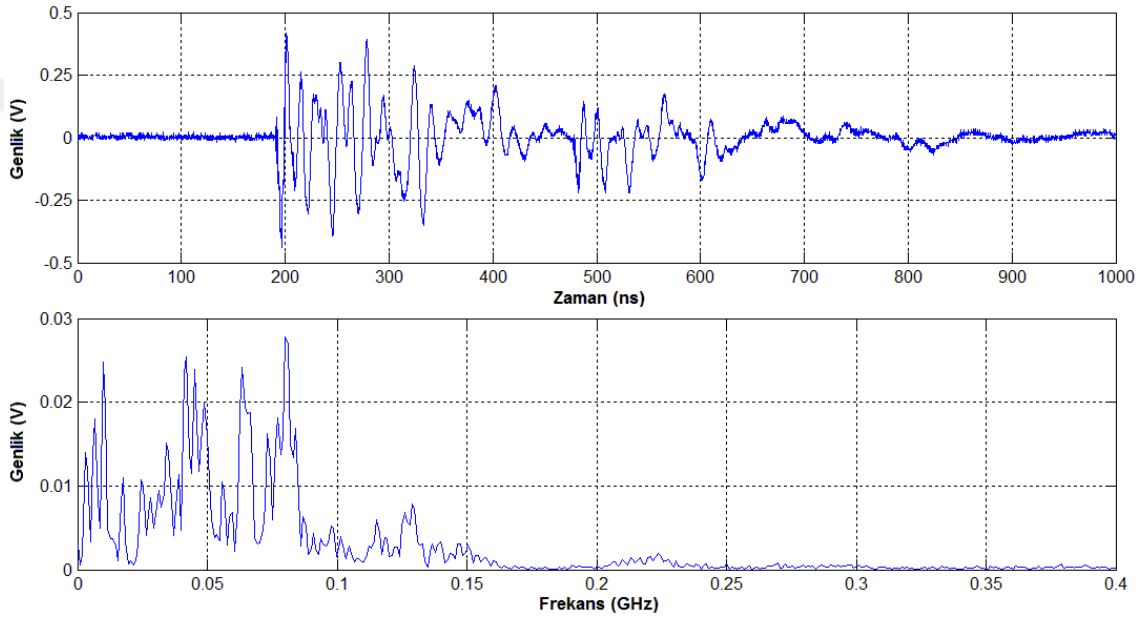
Şekil 4.31’de, picocoulomb cinsinden KB seviyesi ile picojoule cinsinden EM KB seviyesi arasındaki ilişki incelenmiş, herhangi bir korelasyon olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.31: KB seviyesi ile EM KB işaretlerinin toplam enerjisi arasındaki ilişki.

4.3. KONUM BELİRLEME DENEYİ SONUÇLARI

Bölüm 3.4.2’de belirtildiği gibi, KB kaynağının konumunu belirlemek için geliştirilen yöntem ve algoritmanın denenmesi amacı ile bir deney düzeneği kurulmuştur. Farklı koordinatlara yerleştirilebilir yapıda bir EM KB benzetimcisi geliştirilmiştir. Bu benzetimcinin yaydığı EM işaretin, EM KB algılayıcı tarafından alınmış kaydı Şekil 4.32’de görülmektedir. Zaman ve frekans domeninde verilen işaret incelenirse, YG altında sivri uçlu çubuk elektrot - düzlem elektrot takımı ile elde edilen KB’ler sonucunda ortaya çıkan EM KB işaretlerine oldukça benzer olduğu görülür.

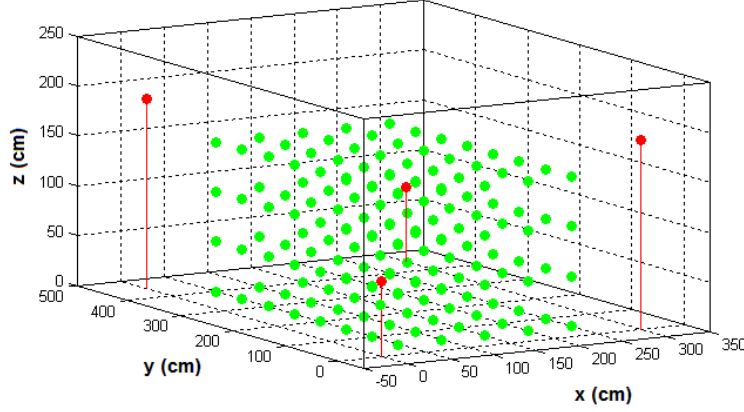


Şekil 4.32: EM KB algılayıcı ile alınan işaret (EM KB benzetimcisi tarafından yayılan).

Yaklaşık bir güç transformatörü tankının içini temsil edecek $300 \times 450 \times 200 \text{ cm}^3$ ’lük bir hacmin içinde, (x, y, z) koordinatlarının 50 cm ’lik değişimi ile toplam 160 ayrı ölçüm noktası belirlenmiştir. Bu noktaların tümü Şekil 4.33’de verilmiştir. Burada kırmızı renkli noktalar ile EM KB algılayıcılar ve yeşil renkli noktalar ile EM KB benzetimcisinin yerleştirildiği 160 ayrı nokta görülmektedir. Bu şekilde KB kaynağının 160 farklı yerleşim noktası için deneysel ölçümler alınmıştır.

Her bir ölçüm noktasında EM KB benzetimcisi ile ard arda 10 kere EM işaret ürettirilmiş ve osiloskop kullanılarak 4 ayrı EM KB algılayıcıdan gelen işaretler örneklendirilerek kayıt edilmiştir. Şekil 3.37 ile verilen KB kaynağı konum kestirim algoritmasının Matlab ortamında yazılan uygulama kodu kullanılarak, 160 ayrı noktanın

her birinde ard arda 10 kere tekrarlanan EM dalga yayınının koordinatları belirlenmiştir. Bu şekilde toplamda 1600 noktanın koordinatı hesaplanmıştır.



Şekil 4.33: Konum belirleme deneyi için tanımlanan 160 adet ölçüm noktası.

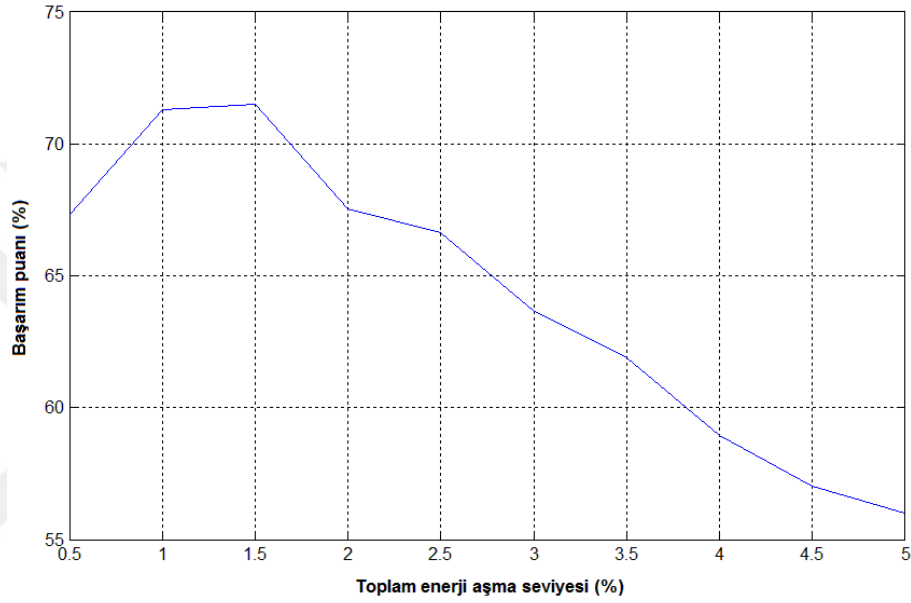
Daha önce belirtildiği gibi, konum kestirim algoritmasının başarımına etkiyen en önemli faktör, TDOA yani EM KB algılayıcılara EM dalga yayınının ulaşım zamanlarının farklarının doğru bulunmasıdır. Yine Bölüm 3.4.1.1’de tanımlanan enerji seviyesi yöntemine göre TDOA zaman farklarının bulunmasında, EM işaretlerinin toplam enerjilerinin belirli bir yüzde değerini aşma noktasının tesbiti gerekmektedir. Farklı toplam enerji aşım seviyeleri için farklı başarımlar elde edilmektedir.

Başarım değerinin hesaplanabilmesi için $50 \times 50 \times 50 \text{ cm}^3$ ölçülerinde sanal bir hata kübü düşünülmüştür. EM KB benzetimcisinin yerleştirildiği gerçek koordinat değeri, sanal hata kübünün merkezindedir. Eğer ölçümler sonrası hesaplanan KB kaynağı koordinatı bu hata kübünün içinde yer alıyorsa, konum kestiriminin başarılı olduğu varsayılmıştır. Gerçek bir güç transformatörünün büyüklüğü ve fiziksel ölçüleri göz önüne alınarak, bu ölçülerdeki bir hata kübünün içinde bulunabilen koordinatların başarılı kabul edilmesi yeterli bulunmuştur. Hata kübünün dışında fakat bir güç transformatörü tankının içini temsil eden $300 \times 450 \times 200 \text{ cm}^3$ ’lük hacimin içinde bulunan koordinatlar ise başarısız kabul edilmiştir. Bu noktada başarımların;

$$BP = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{S_{HKn}}{S_{TFn}} \quad (4.1)$$

ile tanımlanmıştır. Burada; BP başarımlarını, N KB kaynağı için denenen olası konum sayısını (burada 160), n konum numarasını, S_{HKn} hata kübü içinde bulunan

konum sayısını ve S_{TFn} hata kübünün dışında fakat tanımlı transformatör haciminin içinde bulunan konum sayısını göstermektedir. Her bir n 'ninci ölçüm noktasında, ard arda 10 kere tekrarlama yapıldığı için S_{HKn} ve S_{TFn} değişkenleri 10'dan büyük bir değer alamaz. Tek bir ölçüm noktası için ise başarımlı puanı $\frac{S_{HKn}}{S_{TFn}}$ ile ifade edilir. BP başarımlı puanı 0 – 1 aralığında bir değer alabilir. Grafiklerde bu değer yüzde olarak ifade edilmiştir.

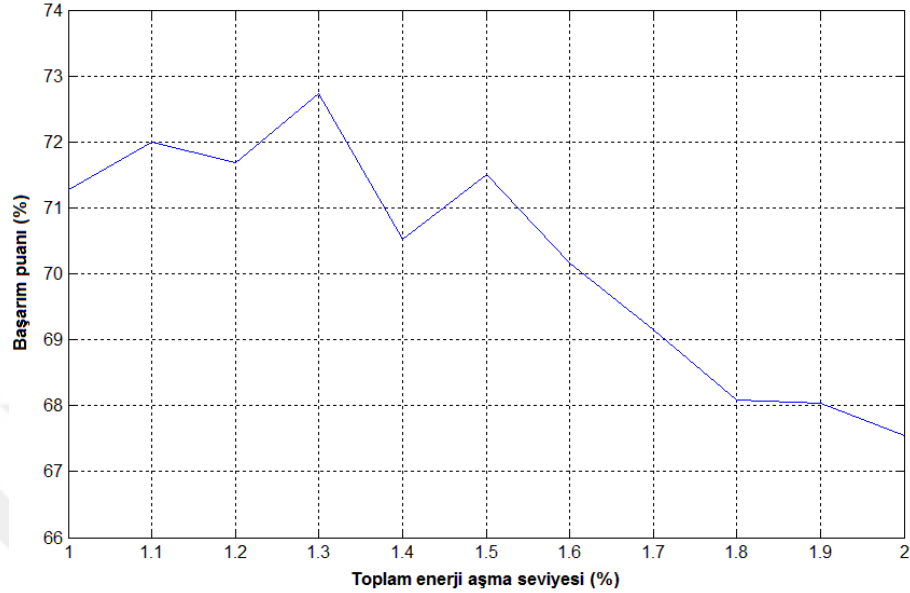


Şekil 4.34: Toplam enerji aşma seviyesi: %0.5 – %5 aralığı için elde edilen başarımlı puanı.

Matlab kodu kullanılarak konum kestirimlerinin yapılması esnasında, farklı toplam enerji aşım seviyeleri için farklı başarımlı puanları elde edilmiştir. Şekil 4.34'de toplam enerji aşım seviyesinin %0.5 – %5 aralığında ve %0.5 adımlar ile değiştirilmesi sonucunda bulunan konum kestirimlerinin başarımlı puanı sonuçları verilmiştir. Görüldüğü gibi toplam enerji aşım seviyesinin %1.5 olduğu noktada en yüksek başarımlı puanı olan %71.51 değeri elde edilmiştir.

Bulunan %1.5 enerji seviyesi değerinin bulunduğu bölge için daha dar bir bölgede ve yüksek çözünürlükte analiz işlemi tekrarlanmıştır. Bu amaçla Matlab kodu, toplam enerji aşım seviyesinin %1 – %2 aralığında ve %0.1 adımlar ile alacağı değerler için tekrar çalıştırıldığında, Şekil 4.35'de verilen sonuç elde edilmiştir. Buradan görüleceği üzere, toplam enerji aşım seviyesinin %1.3 olarak seçildiği noktada başarımlı puanı

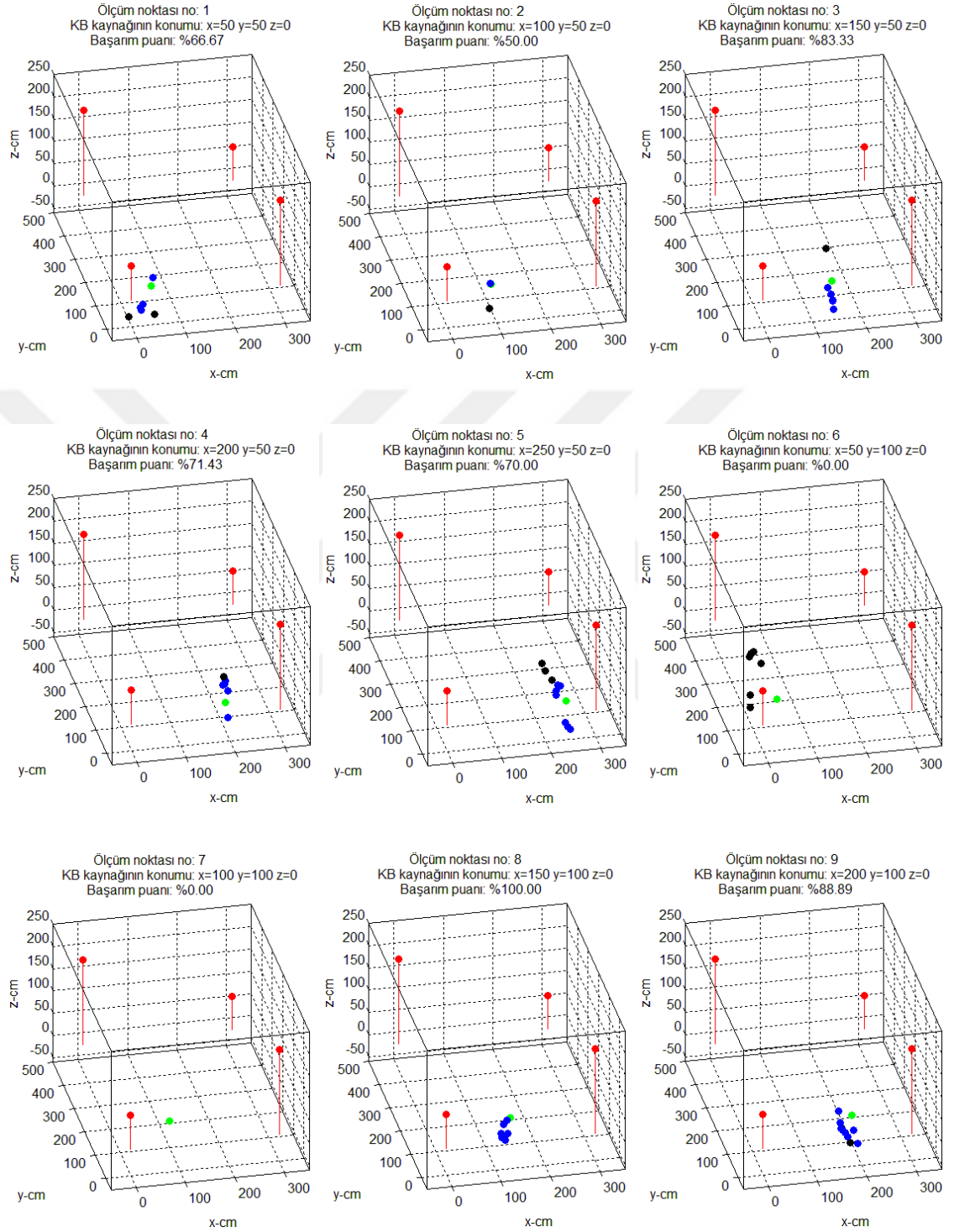
%72.73 ile en yüksek değerini almaktadır. Bu değer, önerilen konum kestirim algoritması ile elde edilebilen en yüksek başarıml puanı olmaktadır.



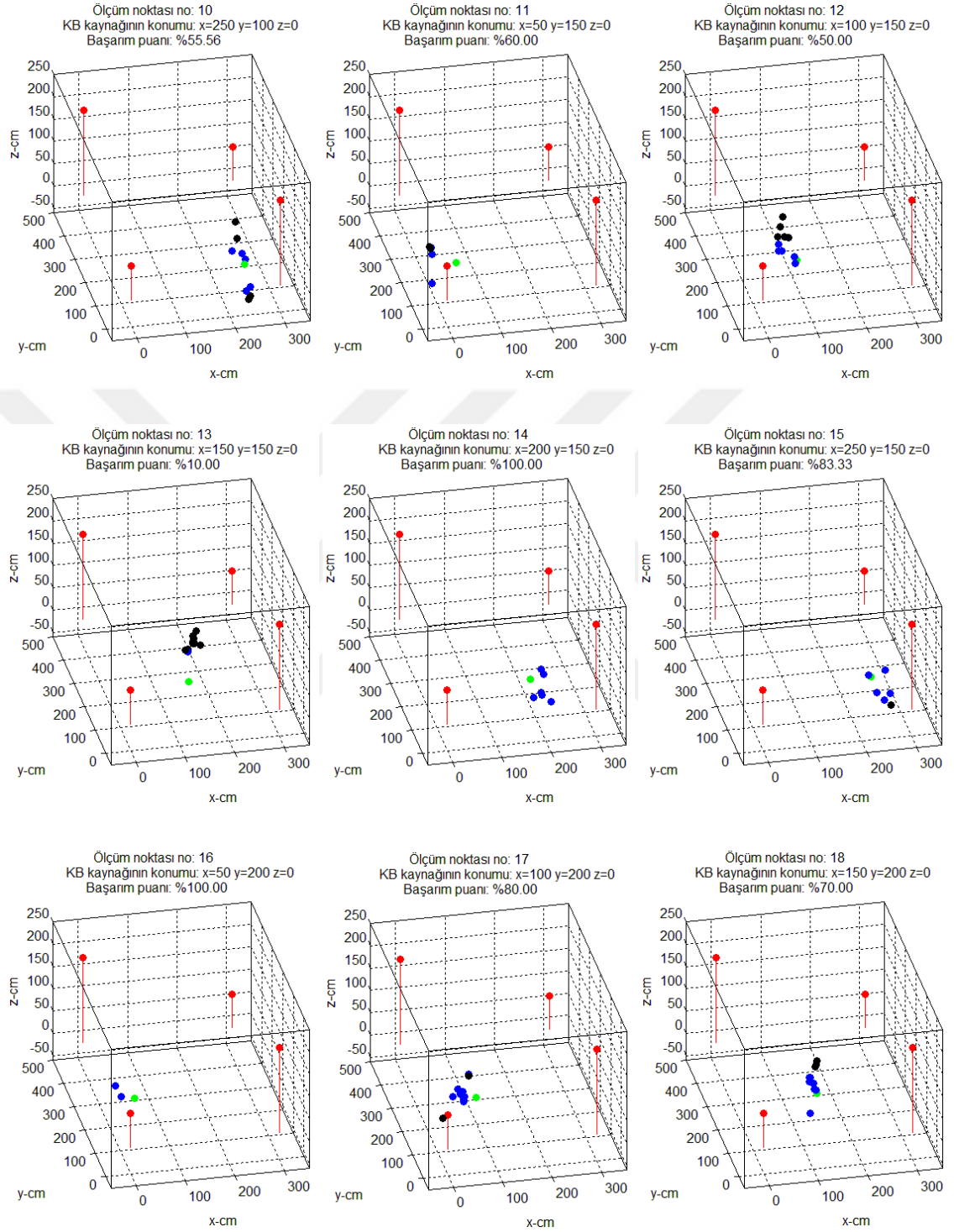
Şekil 4.35: Toplam enerji aşma seviyesi: %1 – %2 aralığı için elde edilen başarıml puanı.

Toplam enerji aşım seviyesinin %1.3 olduğu durumda elde edilen %72.73 başarıml puanı için oluşturulan 3-boyutlu grafiksel sonuçlar Şekil 4.36 – Şekil 4.53’de verilmiştir. Toplam 160 ayrı nokta için verilen bu şekillerde; kırmızı ile gösterilen noktalar EM KB algılayıcıları, yeşil ile gösterilen nokta EM KB benzetimcisinin yerleştirildiği noktayı, mavi ile gösterilen noktalar 50 x 50 x 50 cm³’lük hata kübünün içinde tesbit edilen KB kaynaklarını, siyah ile gösterilen noktalar da hata kübünün dışında fakat tanımlı transformatör haciminin içinde tesbit edilen KB kaynaklarını göstermektedir.

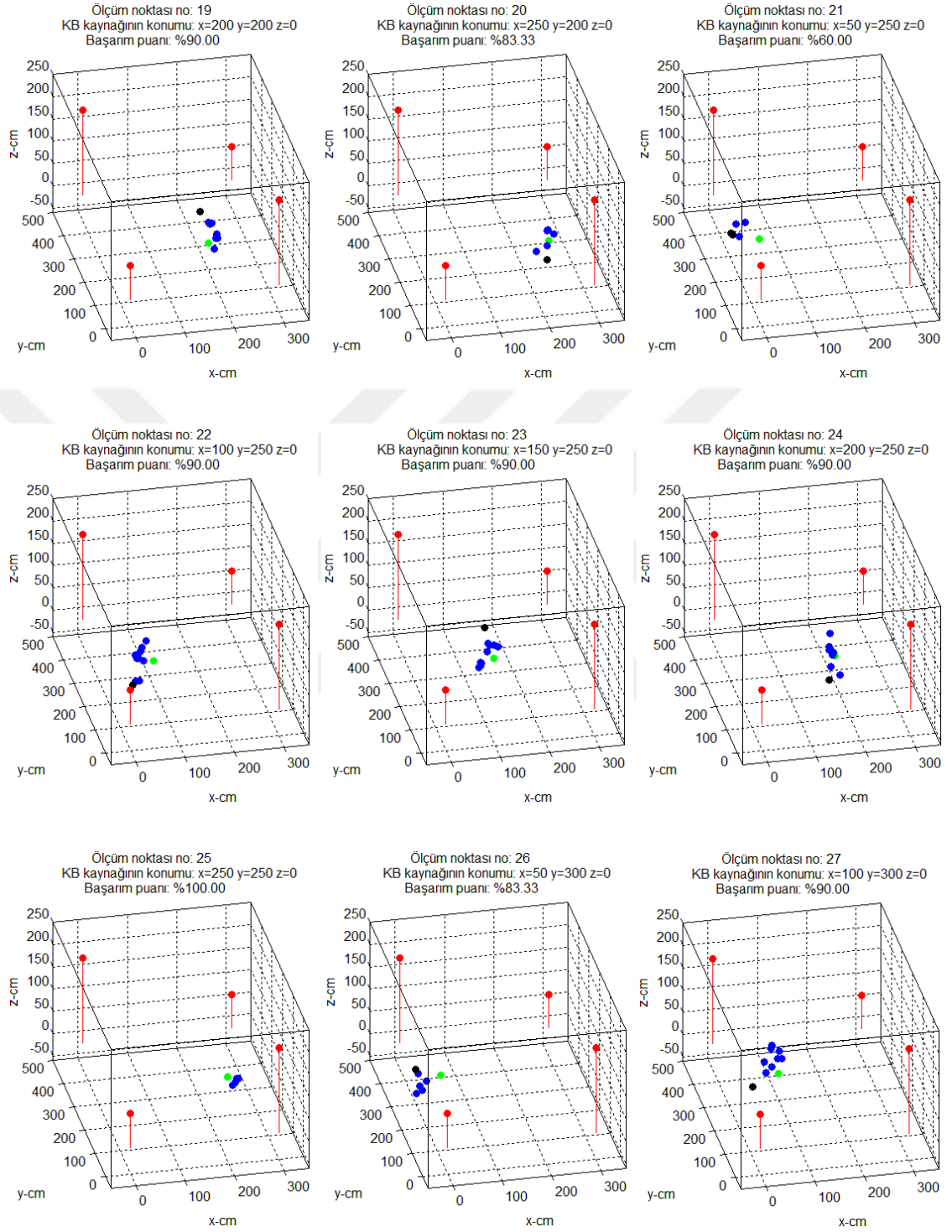
Her bir ölçüm noktası için verilen 3-boyutlu grafiğin üzerinde; ölçüm noktasının numarası, EM KB benzetimcisinin yerleştirildiği noktanın koordinatları ve bu noktada elde edilen başarıml puanı yer almaktadır.



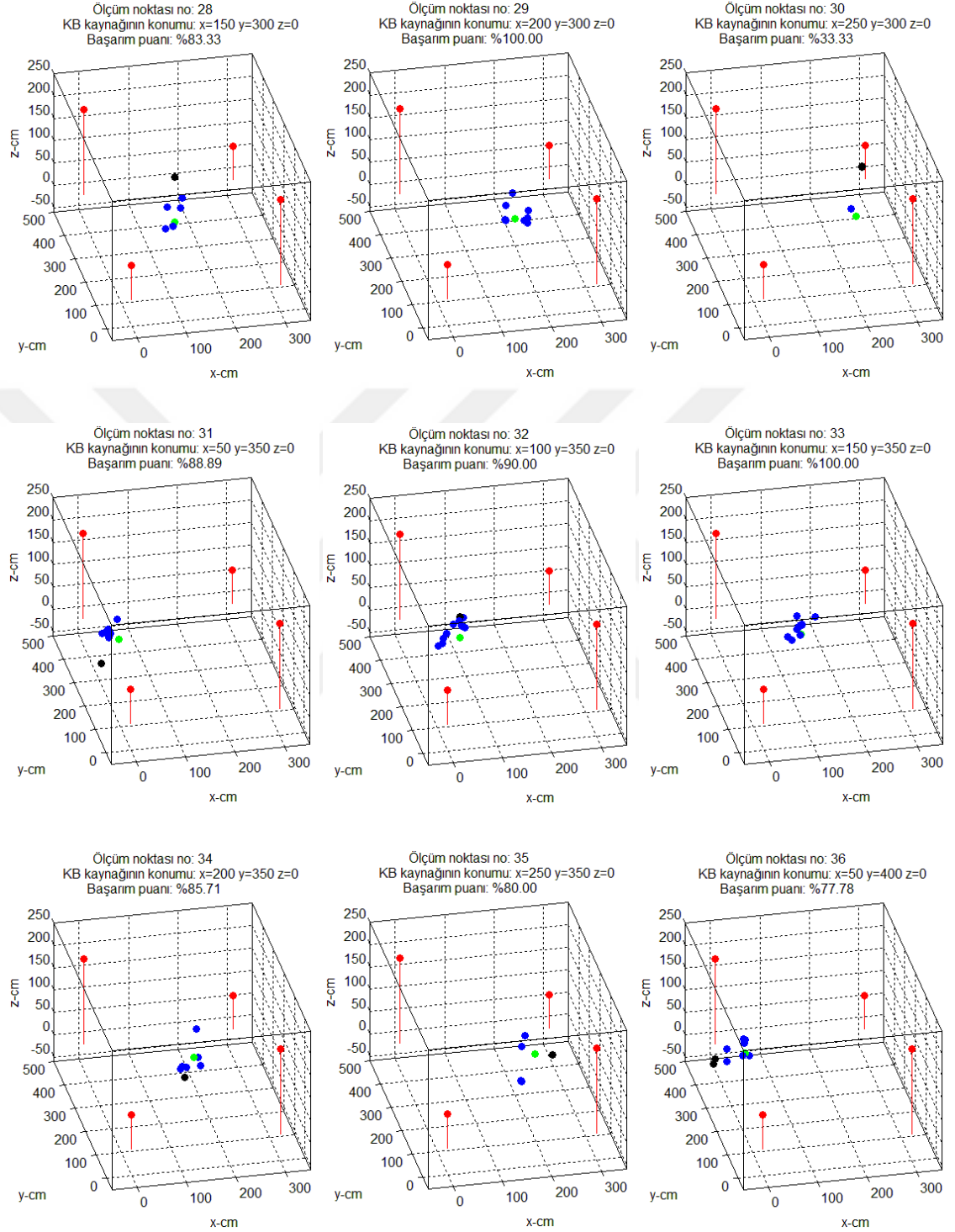
Şekil 4.36: 1 - 9 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.



Şekil 4.37: 10 - 18 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.

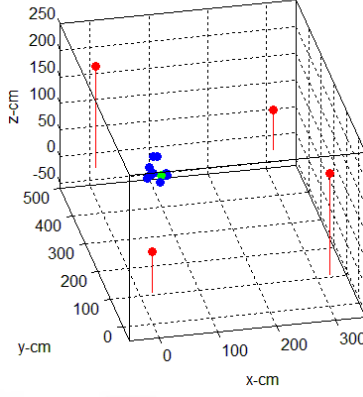


Şekil 4.38: 19 - 27 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.

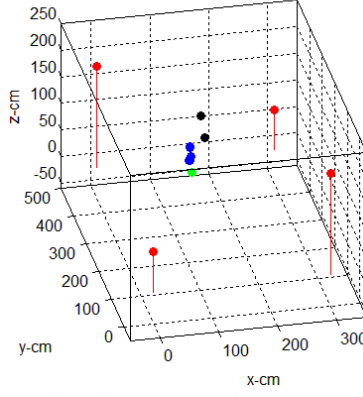


Şekil 4.39: 28 - 36 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.

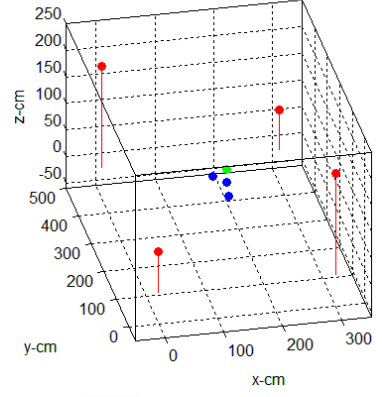
Ölçüm noktası no: 37
KB kaynağının konumu: $x=100$ $y=400$ $z=0$
Başarım puanı: %100.00



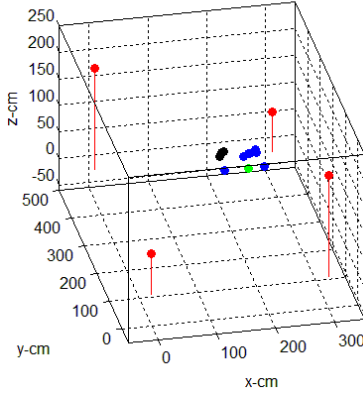
Ölçüm noktası no: 38
KB kaynağının konumu: $x=150$ $y=400$ $z=0$
Başarım puanı: %70.00



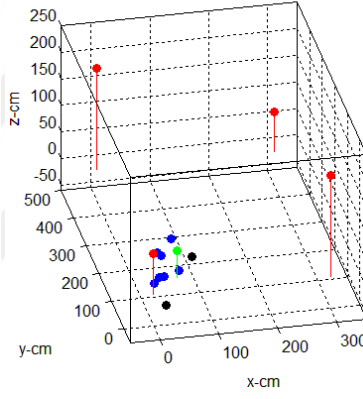
Ölçüm noktası no: 39
KB kaynağının konumu: $x=200$ $y=400$ $z=0$
Başarım puanı: %100.00



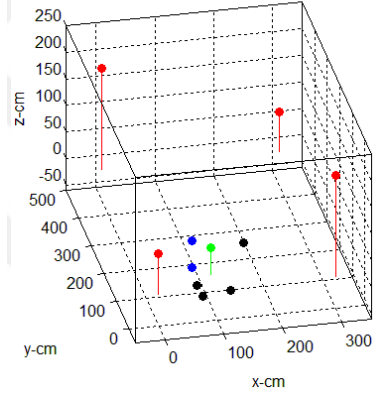
Ölçüm noktası no: 40
KB kaynağının konumu: $x=250$ $y=400$ $z=0$
Başarım puanı: %70.00



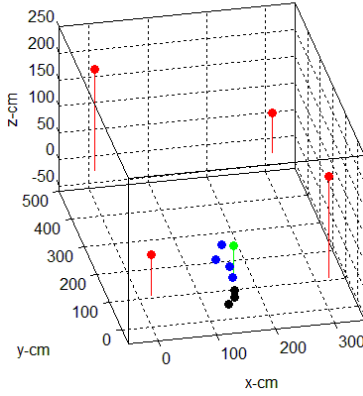
Ölçüm noktası no: 41
KB kaynağının konumu: $x=50$ $y=50$ $z=50$
Başarım puanı: %77.78



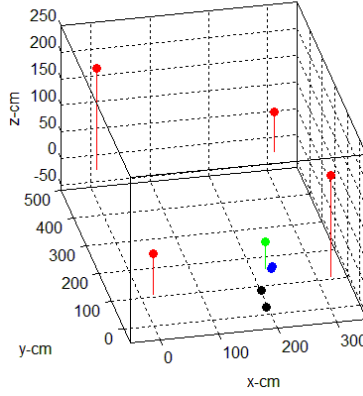
Ölçüm noktası no: 42
KB kaynağının konumu: $x=100$ $y=50$ $z=50$
Başarım puanı: %33.33



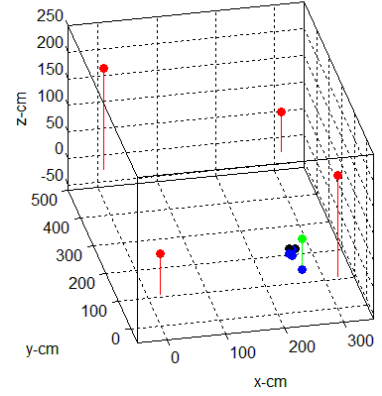
Ölçüm noktası no: 43
KB kaynağının konumu: $x=150$ $y=50$ $z=50$
Başarım puanı: %57.14



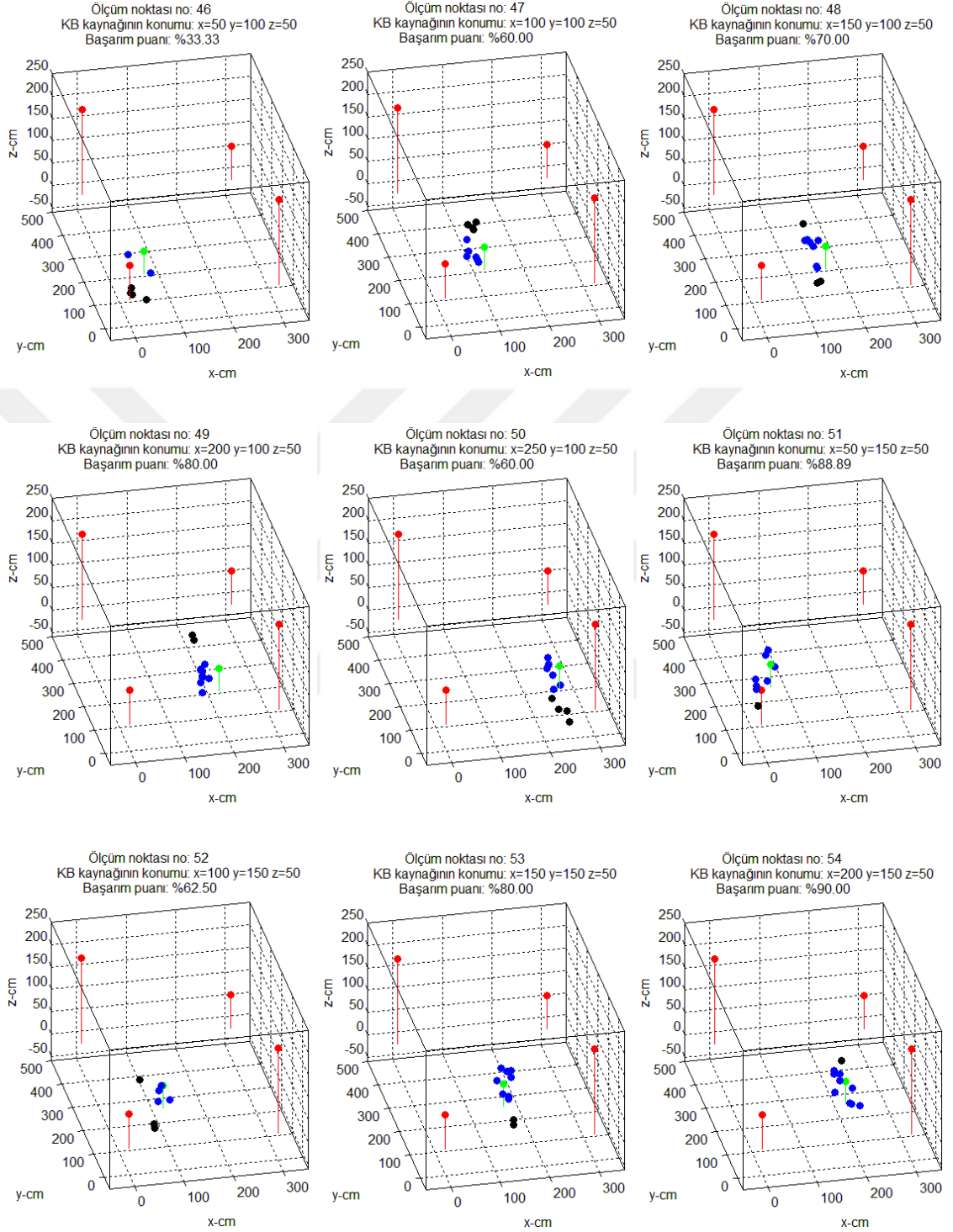
Ölçüm noktası no: 44
KB kaynağının konumu: $x=200$ $y=50$ $z=50$
Başarım puanı: %50.00



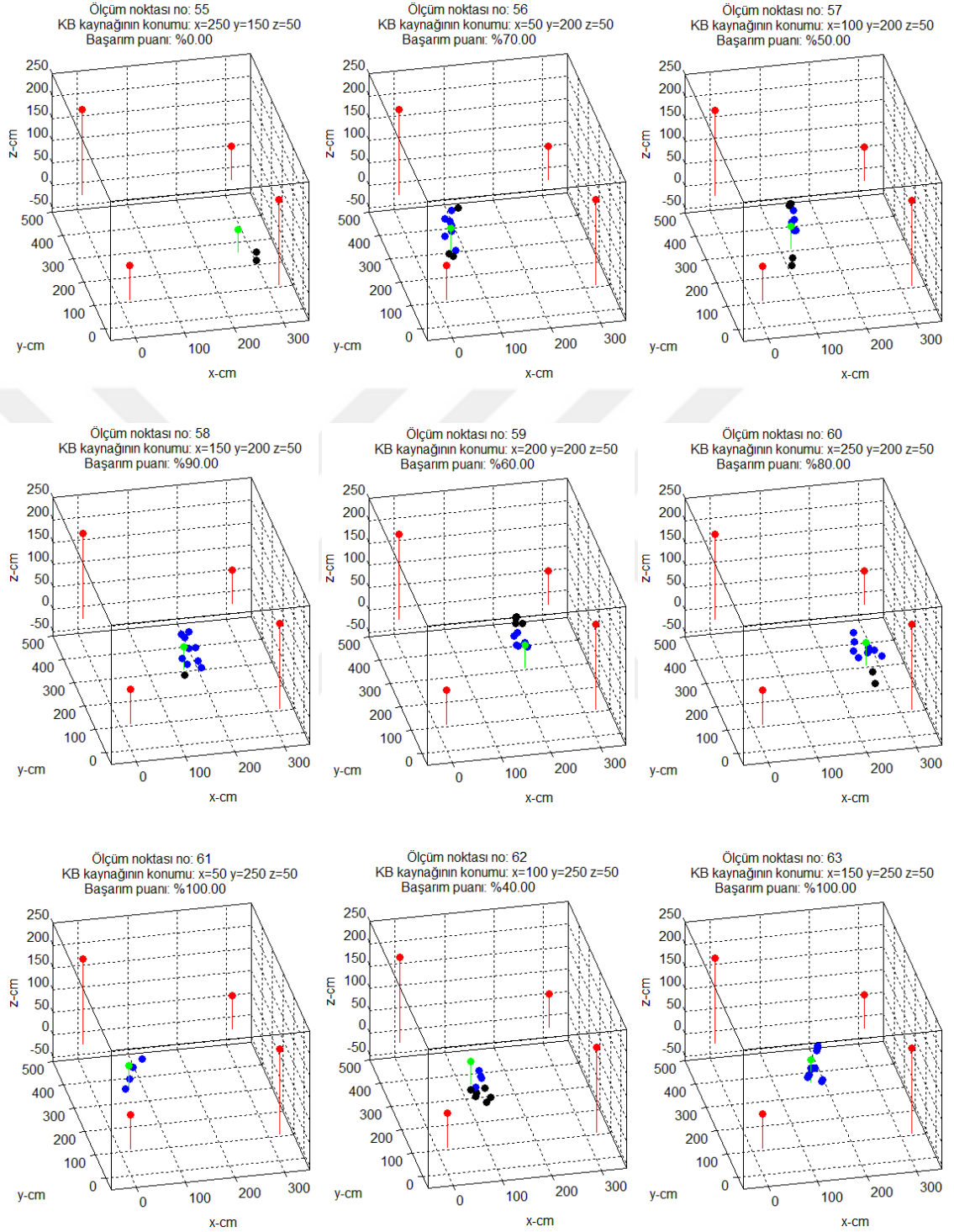
Ölçüm noktası no: 45
KB kaynağının konumu: $x=250$ $y=50$ $z=50$
Başarım puanı: %75.00



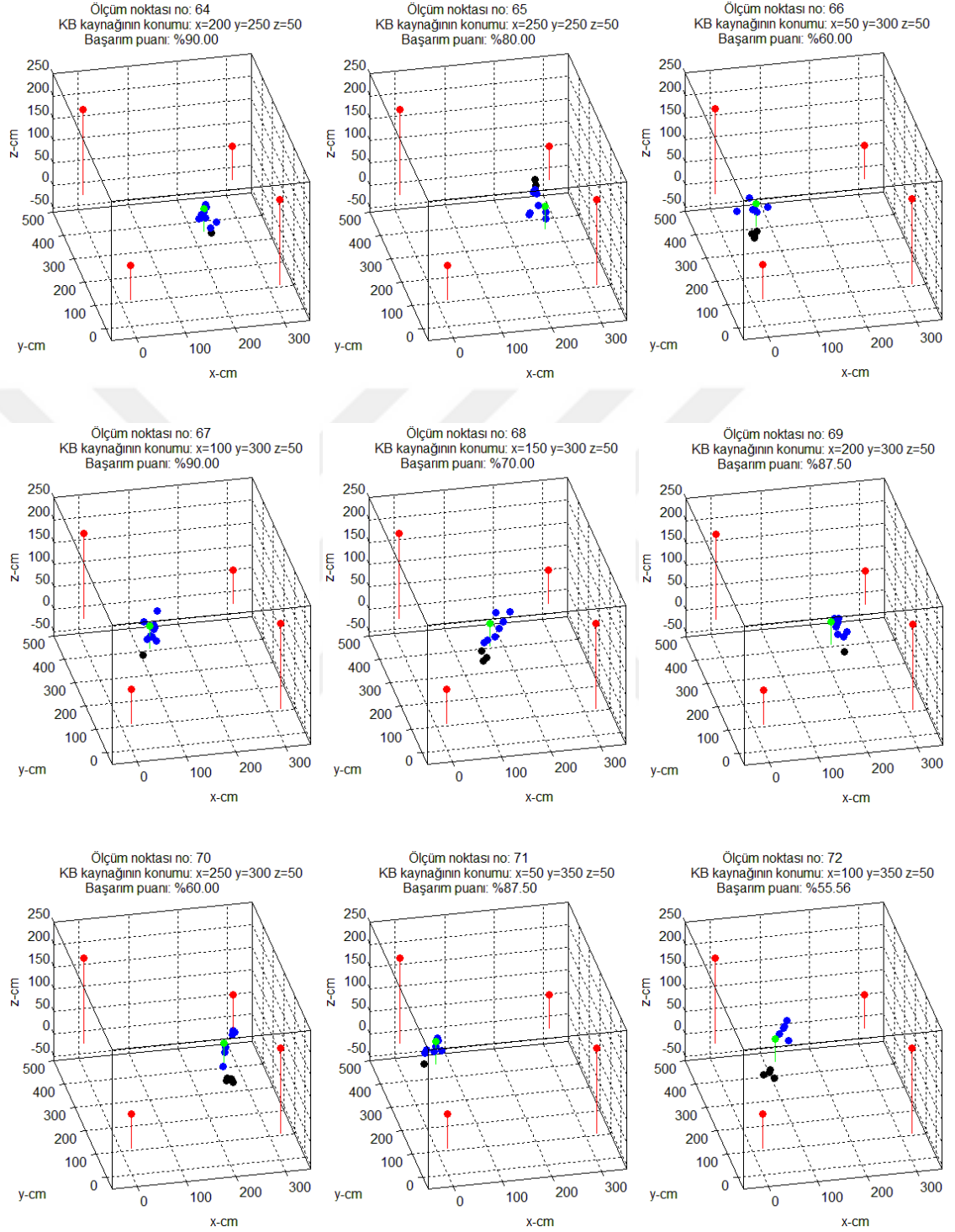
Şekil 4.40: 37 - 45 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.



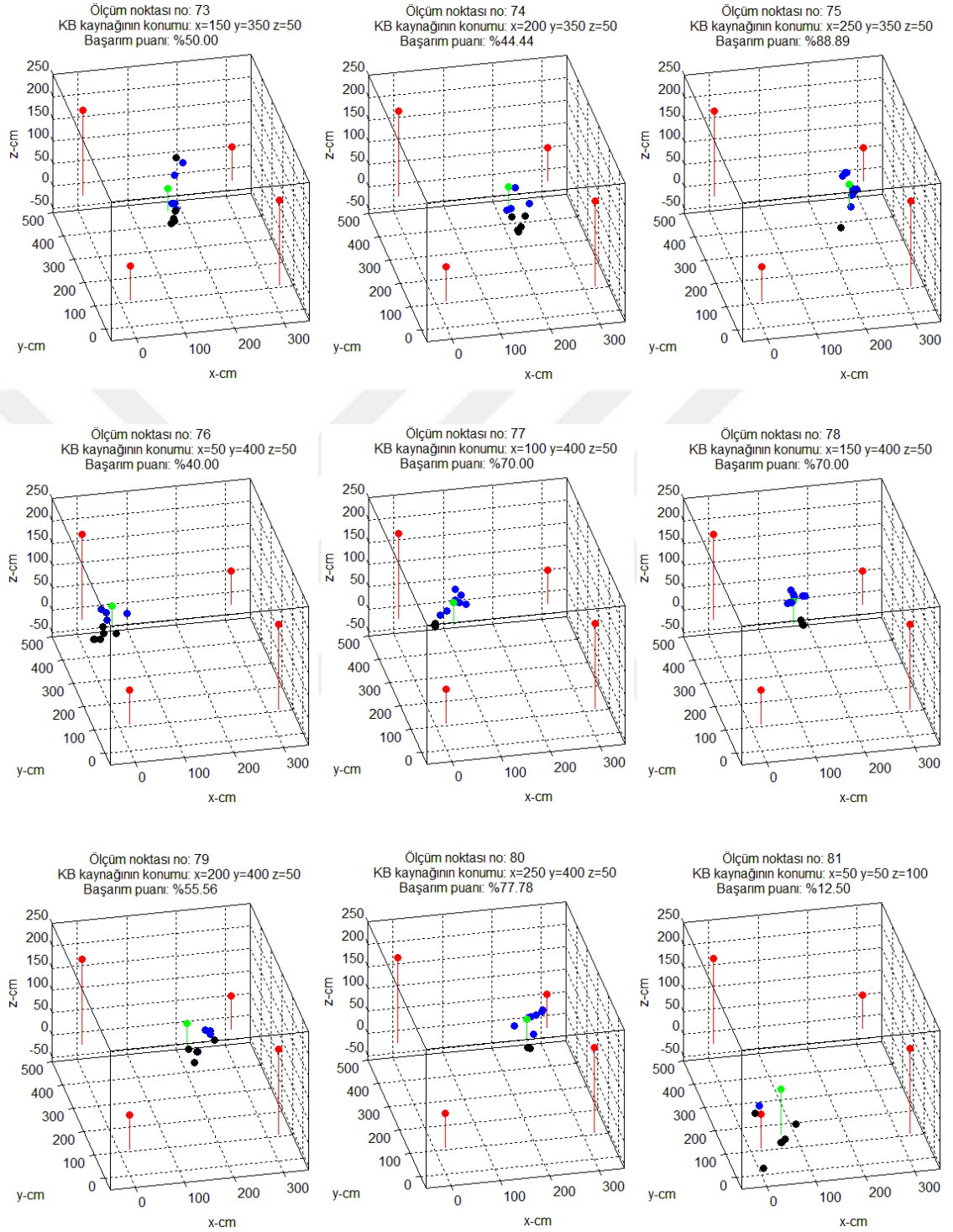
Şekil 4.41: 46 - 54 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.



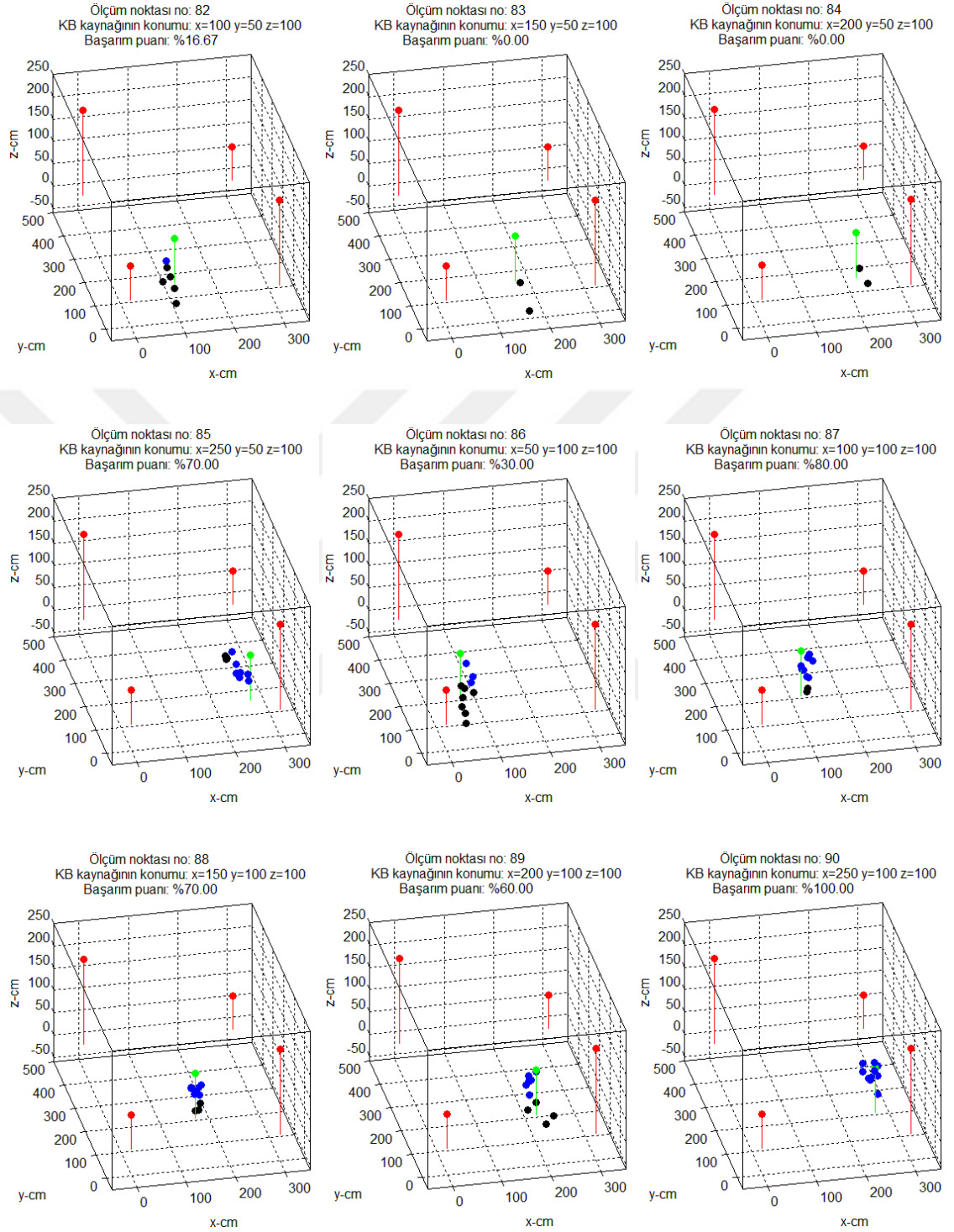
Şekil 4.42: 55 - 63 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.



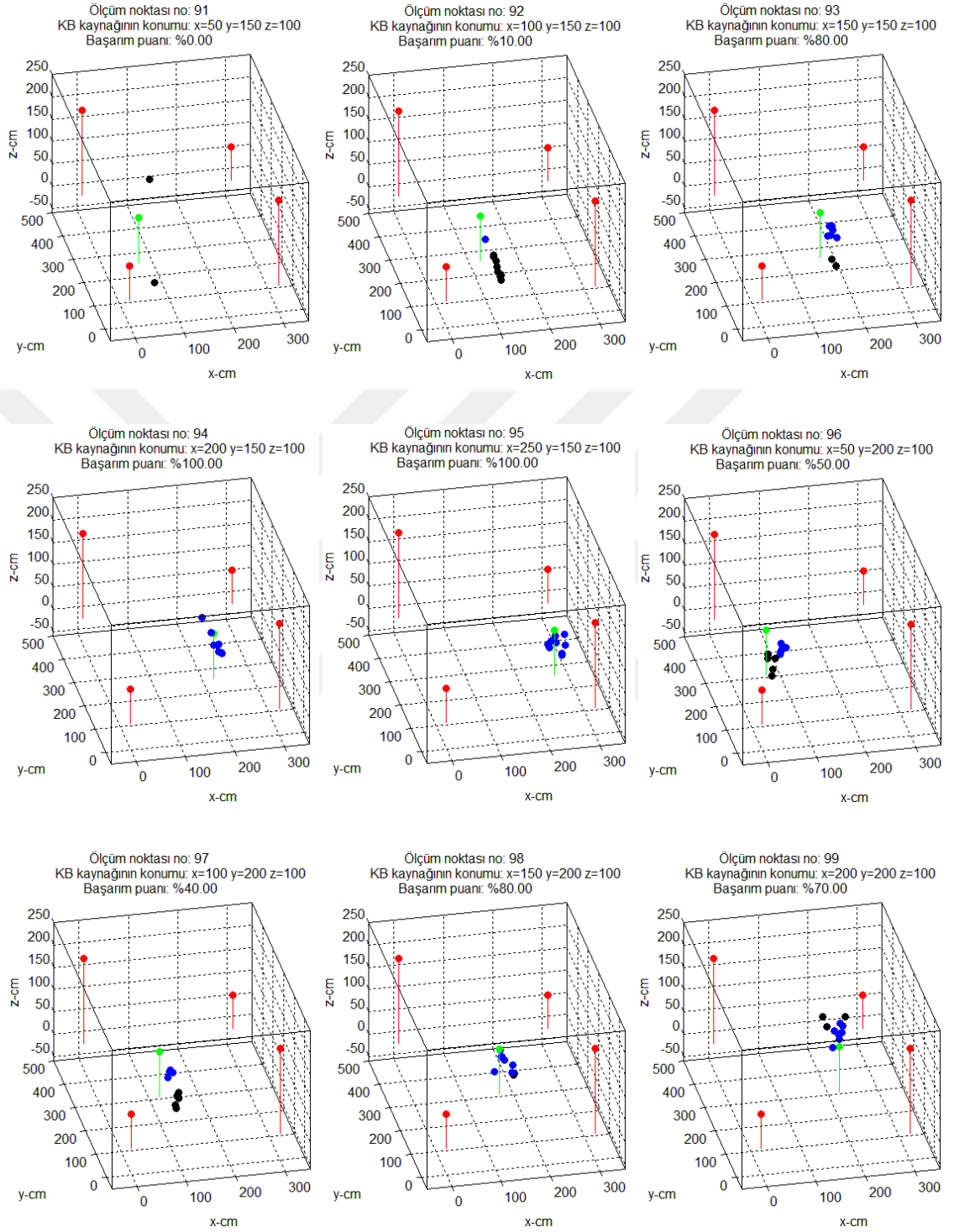
Şekil 4.43: 64 - 72 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.



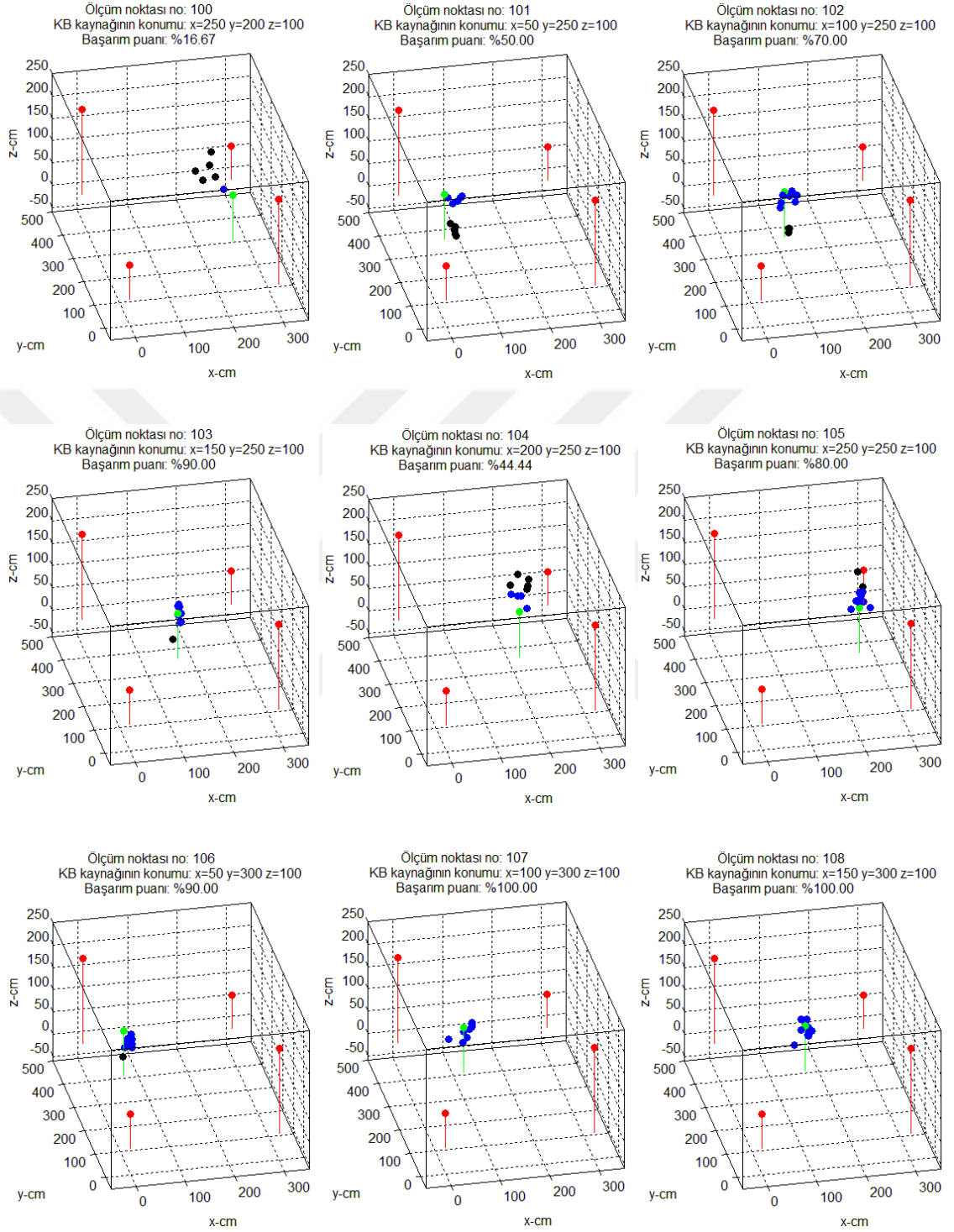
Şekil 4.44: 73 - 81 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.



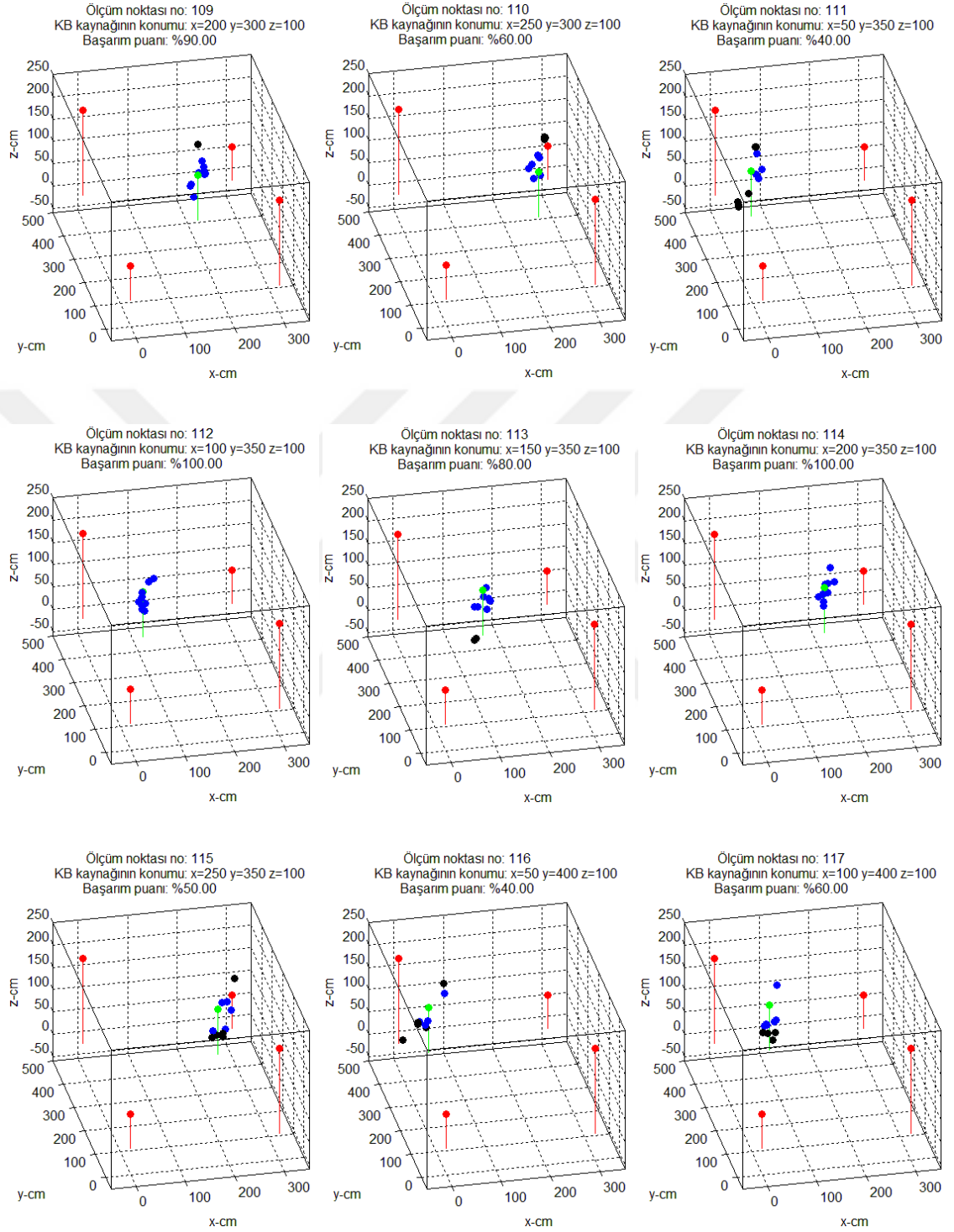
Şekil 4.45: 82 - 90 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.



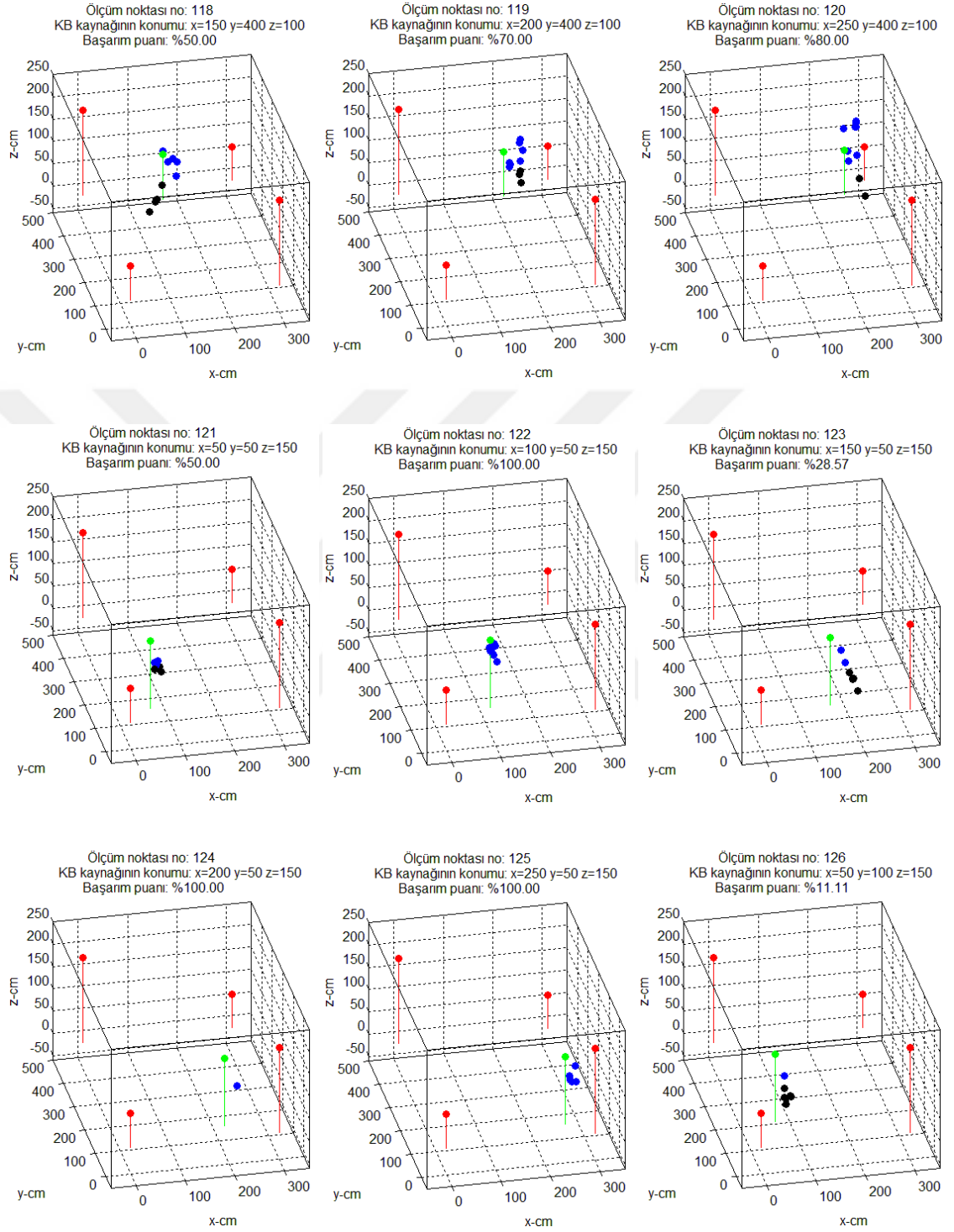
Şekil 4.46: 91 - 99 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.



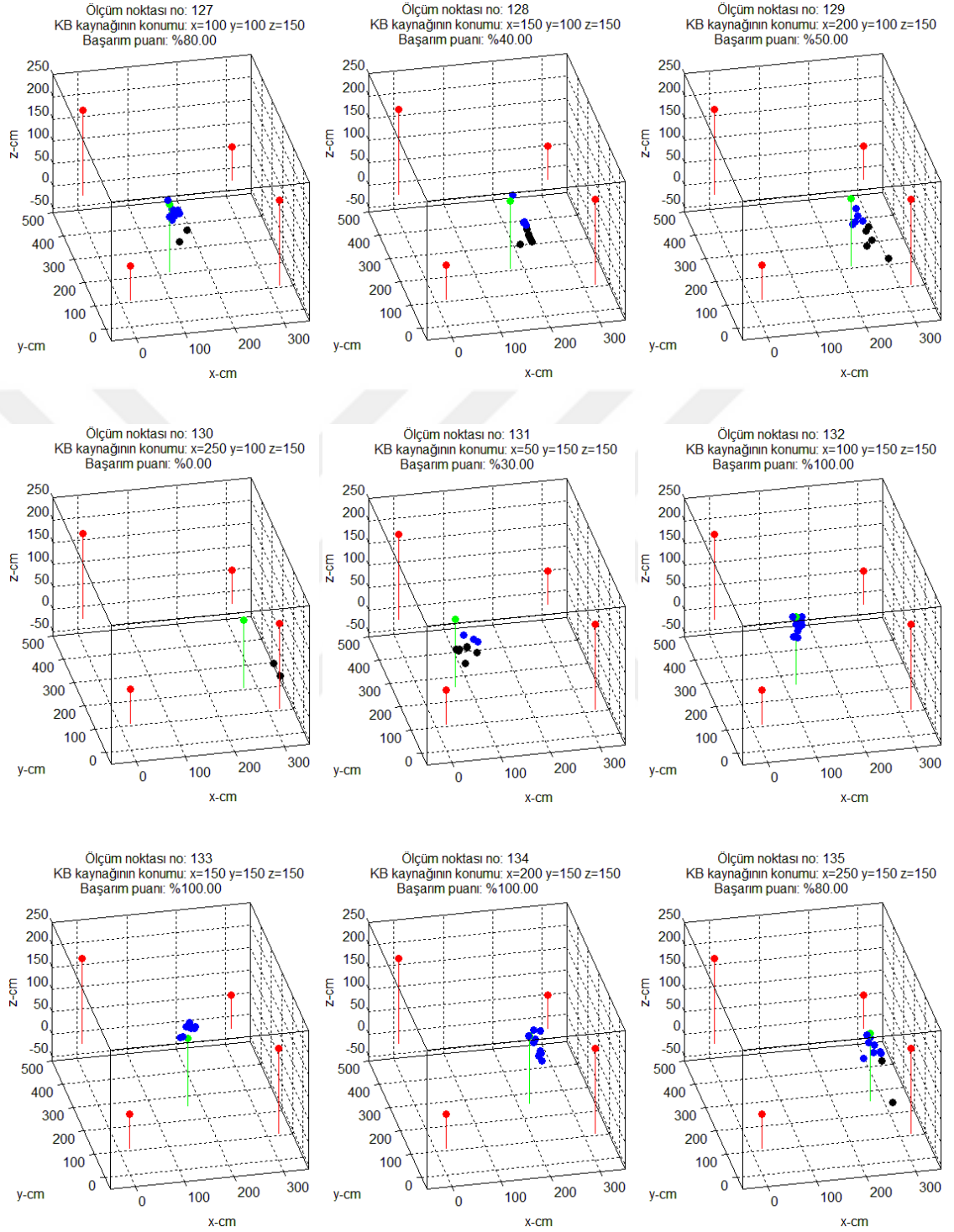
Şekil 4.47: 100 - 108 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.



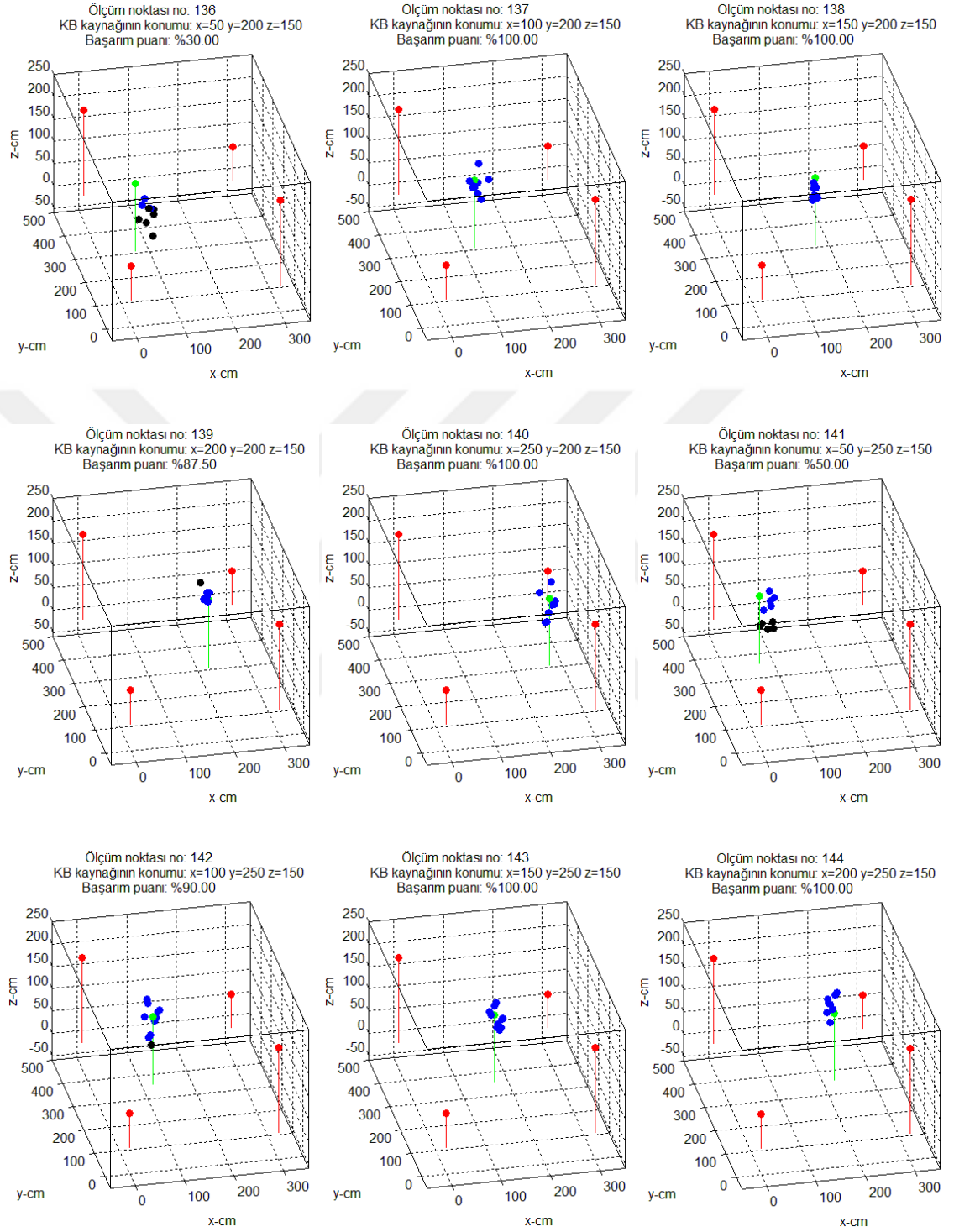
Şekil 4.48: 109 - 117 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.



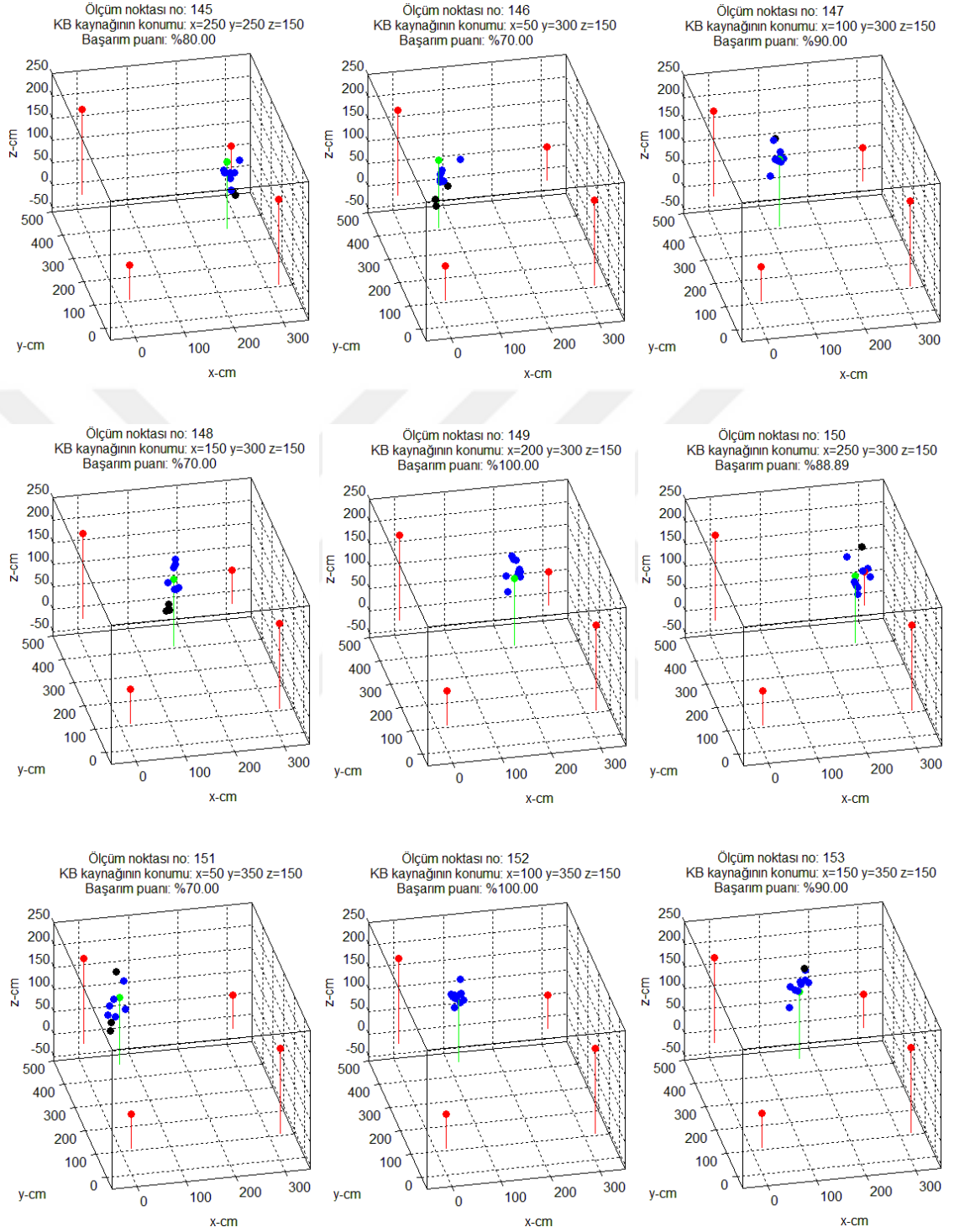
Şekil 4.49: 118 - 126 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.



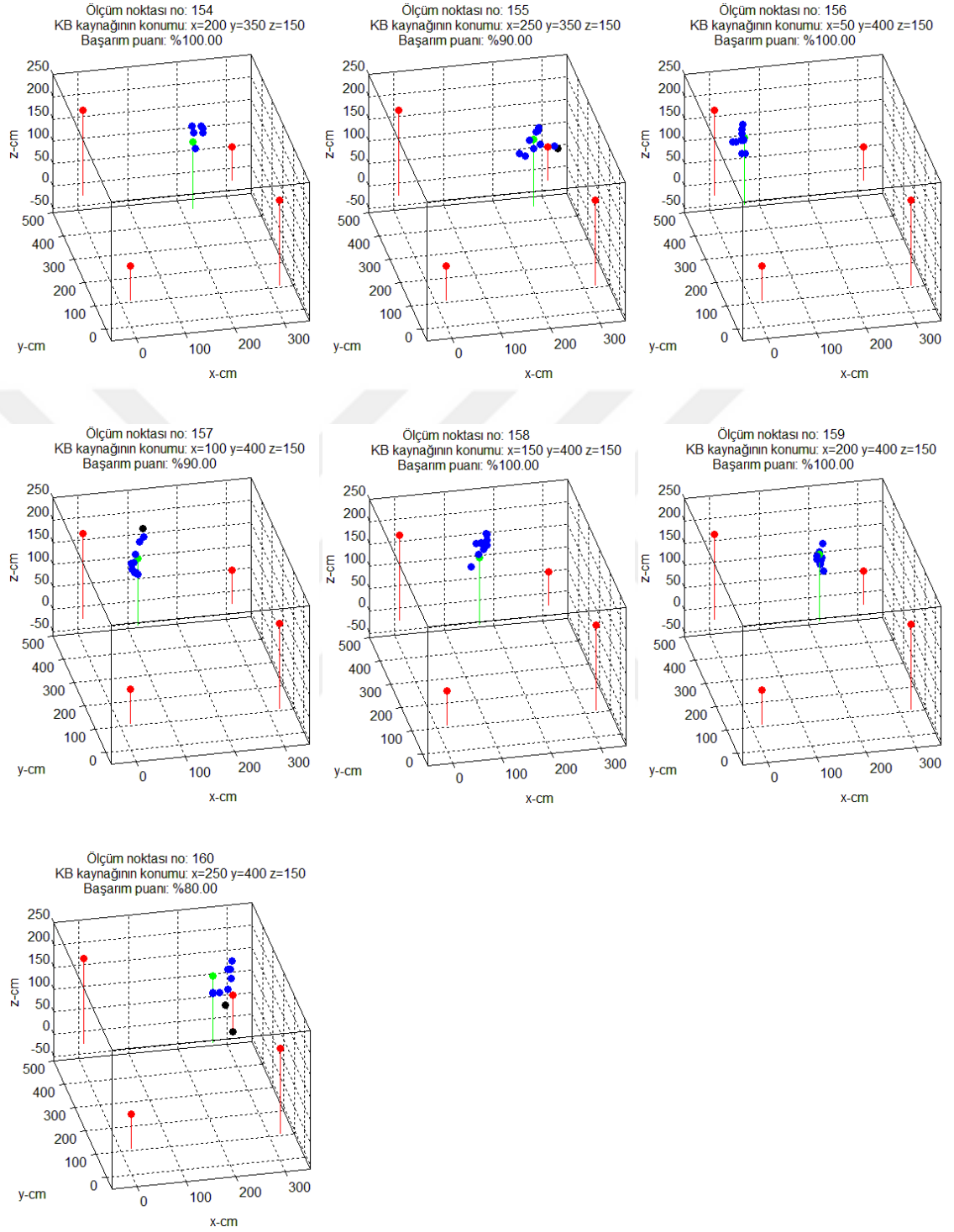
Şekil 4.50: 127 - 135 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.



Şekil 4.51: 136 - 144 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.



Şekil 4.52: 145 - 153 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.



Şekil 4.53: 154 - 160 numaralı ölçüm noktaları için sonuçlar.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Kısmi boşalma, gerek bozucu etkileri gerekse ölçüm yöntemleri üzerinde uzun yıllardır çalışılan bir konudur. Fiziğin ana konularından biri olan elektriksel boşalmalar, yapılan araştırmalar sonucunda gelinen noktaya bakıldığında, halen araştırmacıların ilgisini çekmekte ve üzerinde çalışılır bir konu olma özelliğini korumaktadır.

Bu tez çalışmasında, kısmi boşalma sonucunda ortaya çıkan fiziksel etkilerden biri olan elektromanyetik dalga yayılımı kullanılarak, transformatörlerde kısmi boşalmanın ölçümü ve kaynağının konumunun tesbiti için yeni bir yöntem ortaya konulmasına çalışılmıştır. İlk olarak kısmi boşalmaya bağlı olarak ortaya çıkan elektromanyetik dalga yayılımını tesbit etmek ve ölçmek için bir elektromanyetik kısmi boşalma algılayıcısının tasarımı ve yapımı gerçekleştirilmiştir. Anten parametrelerinin benzetim ve ölçümleri ile başarılı sonuçlar alınması sonrasında, yüksek gerilim altında oluşturulan kısmi boşalmaların ortaya çıkarttığı elektromanyetik dalga yayınımlarının ölçümü için çalışılmıştır. Elektromanyetik dalgaların toplam enerjisi ile geleneksel kısmi boşalma ölçüm yöntemi (IEC60270) sonuçları arasındaki ilişki incelenmiş fakat olumlu bir sonuç alınamamıştır.

Bir noktasal kaynağın 3-boyutlu konum tesbiti için literatürde mevcut olan yöntemler incelendikten sonra, zaman farklarına bağlı hiperbolik konum tesbiti (multilaterasyon) yöntemi geliştirilerek tez çalışmasına uyarlanmıştır. Bu aşamada, 4 ayrı algılayıcıya işaretlerin ulaşma zamanlarının farklarının hesaplanması ile ilgili “enerji seviyesi yöntemi” adı verilen yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Laboratuvar ortamında kurulan deneysel ölçüm düzenekleri ile geliştirilen yöntem ve algoritmanın uygulaması yapılarak oldukça iyi sonuçlar alınmıştır. Belirli bir hacimsel ortamda tanımlanmış 160 farklı noktada oluşturulan toplam 1600 adet kısmi boşalma işaretinin konumunun, 50 x 50 x 50 cm³’lük bir hata kübünde kestirimi için en yüksek %72.73’lük bir başarımla elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar henüz geliştirilmekte olan bir yöntemin ilk adımlarıdır. Kısmi boşalmanın elektromanyetik etkisi ve bu etkiye bağlı olarak kısmi boşalma ölçümü

gelişmeye oldukça açık bir konudur. Görüleceği üzere, gerçek bir güç transformatörü üzerinde uygulama yapılamamıştır çünkü yöntemin daha geliştirilmesi gerekmektedir. Ortaya çıkan elektromanyetik dalga yayılımının maruz kalabileceği yansıma ve kırınım gibi etkiler incelenmelidir. Ayrıca dalga yayılımına, transformatör sargı ve nüveleri gibi materyallerin yapacağı engellemeler ve zayıflatma etkileri önem kazanacaktır. Yapılan bu tez çalışmasında önerilen yöntemlerin ve alınan sonuçların ileride yapılacak benzer çalışmalara kaynak olması hedeflenmektedir.



KAYNAKLAR

- [1]. Fessenden, R. A., 1898, Insulation and Conduction, *123rd Meeting of the American Institute of Electrical Engineers*, New York, USA, March 23, 1898, pp. 119-151.
- [2]. Perrine, F. A. C., 1903, *Conductors for Electrical Distribution*, D. Van Nostrand Company, New York.
- [3]. Townsend, J. S., 1904, The Theory of Ionization by Collision, *International Electrical Congress*, St. Louis, USA, September 12-17, 1904, pp. 106-121.
- [4]. Petersen, W., 1912, Beitrage zur Berechnung der Hochspannungsisolierung, *Archiv für Elektrotechnik*, vol. 1, pp. 28-33.
- [5]. Peek, F. W., 1915, Law of Corona and Spark-over in Oil, *General Electric Review*, vol. 18, no. 8, pp. 821-827.
- [6]. Dubsky, F., 1919, The Dielectric Strength of Air Films Entrapped in Solid Insulation, *7th Midwinter Convention of the American Institute of Electrical Engineers*, New York, USA, February 21, 1919, pp. 537-558.
- [7]. IEC 60270, 2000, High-voltage test techniques – Partial discharge measurements, *International Electrotechnical Commission Standard*, 3rd edition.
- [8]. Winders, J. J., 2002, *Power transformers – principles and applications*, Marcel Dekker Inc., New York, ISBN: 0-8247-0766-4.
- [9]. Odoğlu, H., 2005, *Transformatör deneyleri*, Bileşim Yayınevi, İstanbul.
- [10]. Farish, O., Judd, M. D., Hampton, B. F., Pearson, J. S., 2007, *SF₆ insulation systems and their monitoring*, Advances in high voltage engineering, In: Haddad, A., Warne, D. F. (ed.), Chapter 2, The Institution of Engineering and Technology, London, UK, ISBN: 978-0-85296-158-2, pp. 37-76.
- [11]. König, D., Rao, Y. N., 1993, *Partial discharges in electrical power apparatus*, VDE-Verlag Gmbh, Berlin, ISBN 3-8007-1760-3.
- [12]. Islam, M. M., Lee, G., Hettiwatte, S. N., 2017, A review of condition monitoring techniques and diagnostic tests for lifetime estimation of power transformers, *Electr. Eng.*, doi: 10.1007/s00202-017-0532-4.
- [13]. Naidu, M. S., Kamaraju, V., 1995, *High voltage engineering – Second edition*, McGraw-Hill, New York, ISBN: 0-07-462286-2.

- [14]. Kemp, I. J., 2007, *Partial discharges and their measurement*, Advances in high voltage engineering, In: Haddad, A., Warne, D. F. (ed.), Chapter 4, The Institution of Engineering and Technology, London, UK, ISBN: 978-0-85296-158-2, pp. 139-190.
- [15]. Wadhwa, C. L., 2007, *High voltage engineering (second edition)*, New Age International, New Delhi, ISBN: 978-81-224-2323-5.
- [16]. Kuffel, E., Zaengl, W. S., Kuffel, J., 2000, *High voltage engineering fundamentals (second edition)*, Butterworth - Heinemann, Oxford, ISBN: 0-7506-3634-3.
- [17]. Gockenbach, E., 2001, *Partial discharge measuring technique*, High voltage engineering and testing (2nd edition), In: Ryan, H. M. (ed.), Chapter 17, The Institution of Electrical Engineers, London, UK, ISBN: 0-85296-775-6, pp. 533-548.
- [18]. CIGRE Working Group D1.33, 2008, Guide for partial discharge measurements in compliance to IEC60270, *CIGRE*, Paris, Technical report 366, ISBN 978-2-85873-053-7.
- [19]. Zhou, L., Li, W., 2005, Characteristic estimation of partial discharge from its radiating signal, *5th International Conference on Information, Communications and Signal Processing*, Bangkok, Thailand, December 6-9, 2005, pp. 757-760.
- [20]. Pearson, J. S., Farish, O., Hampton, B. F., Judd, M. D., Templeton, D., Pryor, B. M., Welch, I. M., 1995, Partial discharge diagnostics for gas insulated substations, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 2, no. 5, pp. 893-905.
- [21]. CIGRE Working Group A2.18, 2003, Life management techniques for power transformers, *CIGRE*, Paris, Technical report 227.
- [22]. İlkahraman, M., 2007, Güç transformatörü arızalarının incelenmesi, *Türkiye Elektrik İletim A.Ş. İletim Şebekeleri İşletme Bakım Daire Başkanlığı*, Ankara.
- [23]. Krüger, M., 2009, İzolasyon hatalarının kısmi deşarj ölçümleri ile bulunması, *Omicron Seminer Kitabı – Green Park Otel Bostancı*, İstanbul, Türkiye, Kasım 19, 2009.
- [24]. Altay, Ö., Kalenderli, Ö., Merev, A., Dedeoğlu, S., Gülnihar, K., 2009, Preliminary partial discharge measurements with a computer aided partial discharge detection system, *International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, Bursa, Turkey, November 5-8, 2009, pp. 345-348.
- [25]. Illias, H. A., Chen, G., Lewin, P. L., 2009, Partial discharge measurements for spherical cavities within solid dielectric materials under different stress and cavity conditions, *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Virginia, USA, October 18-21, 2009, pp. 388-391.

- [26]. IEC 60076-3, 2000, Power transformers – Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air, *International Electrotechnical Commission Standard*, 2nd edition.
- [27]. Özkaya, M., 1996, *Yüksek gerilim tekniği – cilt 1*, Birsen Yayınevi, İkinci basım, İstanbul, ISBN 975-511-137-9.
- [28]. Pedersen, A., Crichton, G. C., McAllister, I. W., 1991, The theory and measurement of partial discharge transients, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 26, no. 3, pp. 487-497.
- [29]. Meijer, S., Gulski, E., Smit, J. J., 1998, Pattern analysis of partial discharges in SF₆ GIS, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 5, no. 6, pp. 830-842.
- [30]. Gulski, E., 1995, Discharge pattern recognition in high voltage equipment, *IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology*, vol. 142, no. 1, pp. 51-61.
- [31]. Kreuger, F. H., Gulski, E., Krivda, A., 1993, Classification of partial discharges, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 28, no. 6, pp. 917-931.
- [32]. Tsai, S. S., 2002, *Power transformer partial discharge (PD) acoustic signal detection using fiber sensors and wavelet analysis, modeling and simulation*, Thesis (MSc), Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [33]. Lazarevich, A. K., 2003, *Partial discharge detection and localization in high voltage transformers using an optical acoustic sensor*, Thesis (MSc), Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [34]. Song, L., 2004, *Detection and position location of partial discharges in transformers using fiber optic sensors*, Thesis (MSc), Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [35]. Kweon, D., Chin, S., Kwak, H., Kim, J., Song, K., 2005, The analysis of ultrasonic signals by partial discharge and noise from the transformer, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 3, pp. 1976-1983.
- [36]. Azevedo, C. H. B., Marques, A. P., Ribeiro, C. J., 2009, Methodology for the detection of partial discharges in power transformers using the acoustic method, *IEEE Eurocon 2009*, St. Petersburg, Russia, May 18-23, 2009, pp. 618-621.
- [37]. Eleftherion, P. M., 1995, Partial discharge XXI: Acoustic emission-based PD source location in transformers, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 11, no. 6, pp. 22-26.
- [38]. Sezer, M., 2009, *Trafo bakımı ve yalıtım yağı*, Çağdaş Basımevi, Balıkesir.
- [39]. Uren, J., Price, W. F., 1985, *Surveying for engineers*, Springer, Berlin, ISBN: 978-0-333-37081-0.

- [40]. Poirot, J. L., Arbid, G., 1978, Position location: Triangulation versus Circulation, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 48-53.
- [41]. Tekdas, O., Isler, V., 2010, Sensor placement for triangulation-based localization, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 681-685.
- [42]. Stewart, B. G., Nesbitt, A., Hall, L., 2009, Triangulation and 3D location estimation of RFI and partial discharge sources within a 400kV substation, *IEEE Electrical Insulation Conference*, Montreal, Canada, May 31 – June 3, 2009, pp. 164-168.
- [43]. Pradhan, S., Pyun, J., Kwon, G., Shin, S., Hwang, S., 2014, Enhanced location detection algorithms based on arrival trilateration, *IEEE 48th Asimolar Conference on Signals, Systems and Computers*, California, USA, November 2-5, 2014, pp. 1179-1183.
- [44]. Asmaa, L., Hatim, K. A., Abdelaaziz, M., 2014, Localization algorithms research in wireless sensor network based on multilateration and trilateration techniques, *IEEE International Colloquium in Information Science and Technology*, Tetouan, Morocco, October 20-22, 2014, pp. 415-419.
- [45]. Chan, Y. T., Ho, K. C., 1994, A simple and efficient estimator for hyperbolic location, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 42, no. 8, pp. 1905-1915.
- [46]. Cheng, D. K., 1989, *Field and Wave Electromagnetics (2nd edition)*, Addison-Wesley, New York, ISBN: 0-201-12819-5.
- [47]. Balanis, C. A., 2005, *Antenna Theory – Analysis and Design (3rd edition)*, John Wiley & Sons, New Jersey, ISBN: 0-471-66782-X.
- [48]. Zhou, L., Li, W., Su, S., 2005, The deduction of partial discharge pulse current from its radiating UHF signal, *7th International Power Engineering Conference*, Singapore, Singapore, November 29 – December 2, 2005, pp. 1-5.
- [49]. Tenbohlen, S., Denissov, D., Hoek, S. M., Markalous, S. M., 2008, Partial discharge measurement in the ultra high frequency (UHF) range, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 6, pp. 1544-1552.
- [50]. Judd, M. D., Yang, L., Hunter, I. B. B., 2005, Partial discharge monitoring for power transformers using UHF sensors part 1: sensors and signal interpretation, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 21, no. 2, pp. 5-14.
- [51]. Goo, S., Hyeongjun, J., Park, K., Han, K., Yoon, J., 2008, Ultra-high frequency spectral characteristics of partial discharge in insulation oil, *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Beijing, China, April 21-24, 2008, pp. 64-67.

- [52]. Dapeng, D., Letian, T., Yong, Q., Jiang, W., Chengjun, H., Yi, Z., Xiuchen, J., 2008, Experimental study and feature extraction on UHF partial discharge detection for typical model in air, *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Beijing, China, April 21-24, 2008, pp. 1040-1043.
- [53]. Gülnihar, K., Çaycı, H., Uğur, M., 2013, Design of electromagnetic partial discharge sensors for power transformers, *ISH2013, 18th International Symposium on High Voltage Engineering*, Seoul, Korea, August 25-30, 2013, pp. 832-836.
- [54]. Reid, A. J., Judd, M. D., 2009, Identification of simultaneously active PD sources using passive comparison of UHF signals, *44th International Universities Power Engineering Conference*, Glasgow, UK, September 1-4, 2009, pp. 1-4.
- [55]. Wang, G., Hao, Y., Li, Y., 2001, Study on the ultra-high-frequency sensors for PD detection in power transformers, *International Symposium on Electrical Insulating Materials*, Himeji, Japan, November 22, 2001, pp. 793-796.
- [56]. Orr, P. J. G., Reid, A. J., Judd, M. D., 2008, Sensor response characteristics for UHF location of PD sources, *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Beijing, China, April 21-24, 2008, pp. 1119-1122.
- [57]. Pinpart, T., Judd, M. D., 2009, Experimental comparison of UHF sensor types for PD location applications, *IEEE Electrical Insulation Conference*, Montreal, Canada, May 31 – June 3, 2009, pp. 26-30.
- [58]. Lopez-Roldan, J., Tang, T., Gaskin, M., 2008, Optimisation of a sensor for onsite detection of partial discharges in power transformers by the UHF method, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 6, pp. 1634-1639.
- [59]. Dyson, J. D., 1957, *The equiangular spiral antenna – Technical report no. 21*, Electrical Engineering Research Laboratory, University of Illinois, Urbana, Illinois, USA.
- [60]. Milligan, T. A., 2005, *Modern Antenna Design – second edition*, John Wiley & Sons, New Jersey, ISBN: 978-0-47145776-3.
- [61]. Huang, Y., Boyle, K., 2008, *Antennas - from Theory to Practice*, John Wiley & Sons, New Delhi, ISBN: 978-0-470-51028-5.
- [62]. Miron, D. B., 2006, *Small Antenna Design*, Elsevier, Oxford, ISBN: 978-0-7506-7861-2.
- [63]. Sevgi, L., Çakır, G., 2006, A broadband array of archimedean spiral antennas for wireless applications, *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 48, no. 1, pp. 195-200.
- [64]. Saynak, U., 2007, *Novel rectangular spiral antennas*, Thesis (MSc), İzmir Institute of Technology.

- [65]. Mayes, P. E., 1992, Frequency-independent antennas and broad-band derivatives thereof, *Proceedings of the IEEE*, vol. 80, no. 1, pp. 103-112.
- [66]. Thaysen, J., Jakobsen, K. B., Appel-Hansen, J., 2001, A logarithmic spiral antenna for 0.4 to 3.8 GHz, *Applied Microwave and Wireless*, vol. 13, no. 2, pp. 32-45.
- [67]. Nakano, H., Igarashi, T., Oyanagi, H., Iitsuka, Y., Yamauchi, J., 2009, Unbalanced-mode spiral antenna backed by an extremely shallow cavity, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 6, pp. 1625-1633.
- [68]. Yıldız, İ., 2004, *Design and construction of reduced size planar spiral antenna in the 0.5-18 GHz frequency range*, Thesis (MSc), Middle East Technical University.
- [69]. Sarathi, R., Koperundeivi, G., 2008, UHF technique for identification of partial discharge in a composite insulation under AC and DC voltages, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 6, pp. 1724-1730.
- [70]. Reid, A. J., Judd, M. D., Stewart, B. G., Fouracre, R. A., 2006, Frequency distribution of RF energy from PD sources and its application in combined RF and IEC60270 measurements, *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Kansas, USA, October 15-18, 2006, pp. 640-643.
- [71]. Cleary, G. P., Judd, M. D., 2006, UHF and current pulse measurements of partial discharge activity in mineral oil, *IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology*, vol. 153, no. 2, pp. 47-54.
- [72]. Cleary, G. P., Judd, M. D., 2002, An investigation of discharges in oil insulation using UHF PD detection, *Proceedings of IEEE 14th International Conference on Dielectric Liquids*, Graz, Austria, July 7-12, 2002, pp. 341-344.
- [73]. Judd, M. D., Pryor, B. M., Kelly, S. C., Hampton, B. F., 1999, Transformer monitoring using the UHF technique, *11th International Symposium on High Voltage Engineering*, London, UK, August 22-27, 1999, pp. 362-365.
- [74]. Judd, M. D., Farish, O., 1998, High bandwidth measurement of partial discharge current pulses, *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Virginia, USA, June 7-10, 1998, pp. 436-439.
- [75]. Gülnihar, K., Uğur, M., 2016, Development and calibration of a microcontroller based partial discharge calibrator, *Journal of Electrical & Electronics Engineering*, Engineering Faculty, Istanbul University, Vol. 16, No. 1, pp. 2011-2015.
- [76]. Gülnihar, K., Uğur, M., 2016, Güç transformatörlerinde kısmi boşalmanın konumunun ve büyüklüğünün ölçülmesi için yeni bir yöntem, *3e_Electrotech – Enerji, Elektrik, Elektronik Teknolojileri Dergisi*, Aralık 2016, sayfa: 26-30.

- [77]. Gülnihar, K., Cekli, S., Uzunoğlu, C. P., Uğur, M., 2017, Location estimation of partial discharge-based electromagnetic source using multilateration with time difference of arrival method, *Electr. Eng.*, doi: 10.1007/s00202-017-0556-9.
- [78]. Yang, L., Judd, M. D., Bennoch, C. J., 2004, Time delay estimation for UHF signals in PD location of transformers, *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Colorado, USA, October 17-20, 2004, pp. 414-417.
- [79]. Knapp, C. H., Carter, G. C., 1976, The generalized correlation method for estimation of time delay, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. 24, no. 4, pp. 320-327.
- [80]. Cekli, S., 2012, Position detection with spherical interpolation least squares based on time difference of arrivals using separated acoustic signals by independent component analysis, *Signal Processing and Communications Applications Conference*, Muğla, Turkey, April 18-20, 2012, pp. 1-4.
- [81]. Young, D. P., Keller, C. M., Bliss, D. W., Forsythe, K. W., 2003, Ultra-wideband (UWB) transmitter location using time difference of arrival (TDOA) techniques, *IEEE 38th Asimolar Conference on Signals, Systems and Computers*, California, USA, November 9-12, 2003, pp. 1225-1229.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Kaan GÜLNİHAR
Doğum Yeri	İstanbul
Doğum Tarihi	03.12.1978
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	0532 670 4916
E-Posta Adresi	kaan.gulnihar@tubitak.gov.tr
Web Adresi	www.ume.tubitak.gov.tr



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Kocaeli Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2001

Yüksek Lisans	
Üniversite	Kocaeli Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
Programı	Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
Mezuniyet Tarihi	2004

Doktora	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı
Mezuniyet Tarihi	2017

Makale ve Bildiriler

Gülrihar, K., Çaycı, H., Uğur, M., 2013, Design of electromagnetic partial discharge sensors for power transformers, *ISH2013, 18th International Symposium on High Voltage Engineering*, 25-30 August 2013, Seoul, Korea, pp. 832-836.

Gülrihar, K., Uğur, M., 2016, Development and calibration of a microcontroller based partial discharge calibrator, *Journal of Electrical & Electronics Engineering*, Engineering Faculty, Istanbul University, Vol. 16, No. 1, pp. 2011-2015.

Gülrihar, K., Uğur, M., 2016, Güç transformatörlerinde kısmi boşalmanın konumunun ve büyüklüğünün ölçülmesi için yeni bir yöntem, *3e_Electrotech - Enerji, Elektrik, Elektronik Teknolojileri Dergisi*, Aralık 2016, sayfa: 26-30.

Gülrihar, K., Çekli, S., Uzunoğlu, C. P., Uğur, M., 2017, Location estimation of partial discharge-based electromagnetic source using multilateration with time difference of arrival method, *Electr Eng.*, doi: 10.1007/s00202-017-0556-9.