

**RADAR KESİT ALAN ANALİZİ İÇİN YAKIN ALANDAN
UZAK ALANA MAKİNE ÖĞRENMESİ TABANLI
DÖNÜŞÜM ALGORİTMASI GELİŞTİRİLMESİ**

**DEVELOPMENT OF A MACHINE LEARNING-BASED
TRANSFORMATION ALGORITHM FROM NEAR FIELD
TO FAR FIELD FOR RADAR CROSS SECTION
ANALYSIS**

ÇAĞLAR YILDIZ

PROF. DR ÖZLEM ÖZGÜN

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim - Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2024

ÖZET

RADAR KESİT ALAN ANALİZİ İÇİN YAKIN ALANDAN UZAK ALANA MAKİNE ÖĞRENMESİ TABANLI DÖNÜŞÜM ALGORİTMASI GELİŞTİRİLMESİ

Çağlar YILDIZ

Yüksek Lisans, Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Özlem ÖZGÜN

Haziran 2024, 80 sayfa

Radarlar doğası gereği elektromanyetik dalgaların uzak alan bölgesinde çalışırlar. Radarlar ile yapılan ölçümler uzak alan bölgelerinde kapalı veya açık alanda yapılır. Açık alanda ölçüm yapmanın geniş gözlem alanı ve daha kapsamlı veri toplamı gibi avantajları olmasına rağmen çevre koşulları, hava durumu ve diğer dış etkenler nedeniyle, radar sinyalleri üzerinde istenmeyen etkilere sebebiyet vermesi gibi dezavantajları da vardır. Bu kontrolsüz durumdan kaçınmak için kapalı alan ölçümleri yapılır. Kapalı alanda ölçüm yapmak, dış etkenlerin kontrol altında tutulabilmesi anlamına gelir, bu da ölçüm sürecinin daha öngörülebilir olmasını sağlar. Ancak kapalı alan için tasarlanan yankısız odaların boyutları genellikle uzak alan mesafelerini kapsamamaktadır. Bu durum, ölçümlerin yakın alanda yapılmasını ve daha sonra uzak alana dönüştürülmesini gerektirir. Bu dönüşüm süreci genellikle uzun ve maliyetlidir. Bu tez çalışmasında, bu sorunun çözümü olarak, radar ölçümlerinin yakın alandan uzak alana dönüşümünde makine öğrenmesi algoritması kullanılarak bu sürecin daha etkin ve verimli hale getirilmesi hedeflenmektedir. Elektromanyetik dalga ile aydınlatılan hedeflerden, X bandını (8-12 GHz) kapsayacak şekilde, farklı açı ve frekanslarda toplam 3 milyon adet geri saçılan uzak ve yakın elektrik alan bilgisi ALTAIR FEKO programı aracılığıyla toplanmıştır. Bu veriler MATLAB uygulamasında bulunan regresyon algoritmaları ile eğitilmiş ve uzak alan verileri ile karşılaştırılmıştır. Makine öğrenmesi algoritması, yakın

alan verilerini kullanarak uzak alan verilerini tahmin etmek üzere eğitilmiştir. Tahmin edilen veriler MATLAB ile işlenerek Ters Yapay Açıklıklı Radar (TYAR) görüntüleri oluşturulmuştur. Sonrasında tahmin verileri ile saçılma merkezleri hesaplanmış ve hesaplanan saçılma merkezleri ile TYAR görüntüleri tekrar oluşturularak orijinal görüntüler ile karşılaştırılmıştır. Laboratuvardan veya ölçüm ekipmanlarından dolayı meydana gelen istenmeyen gürültü sinyallerinin makine öğrenmesi algoritması üzerindeki etkisi incelenmiş ve TYAR görüntüsündeki sonuçları karşılaştırılmıştır. Makine öğrenmesi algoritması ile gürültüsüz ve gürültülü sinyaller için başarılı TYAR görüntüleri oluşturulmuş, eğitim verilerinin artmasıyla daha etkili sonuçlar alınabileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Radar Kesit Alanı (RKA), Dalga Açılımı, Yakın Alandan Uzak Alana Dönüşümü, Ters Yapay Açıklıklı Radar (TYAR), MATLAB, ALTAIR FEKO

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A MACHINE LEARNING-BASED TRANSFORMATION ALGORITHM FROM NEAR FIELD TO FAR FIELD FOR RADAR CROSS SECTION ANALYSIS

Çağlar YILDIZ

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Özlem ÖZGÜN

January 2024, 80 pages

Radar systems inherently operate in the far-field region of electromagnetic waves. Measurements with radars are conducted in either indoor or outdoor environments in the far-field region. While outdoor measurements offer advantages such as a wide observation area and comprehensive data collection, they also come with disadvantages due to environmental conditions, weather, and other external factors that can introduce unwanted effects on radar signals. To avoid this uncontrolled situation, measurements are performed in indoor environments. Conducting measurements indoors allows for the control of external factors, making the measurement process more predictable. However, the dimensions of anechoic chambers designed for indoor measurements typically do not cover far-field distances. As a result, measurements need to be performed in the near-field and then transformed into the far-field, which often involves a lengthy and costly conversion process. As a solution to this problem, the aim is to make this transformation process more efficient and effective by using machine learning algorithms in the conversion of radar measurements from the near-field to the far-field. The data comprising of a total of three million scattered electric field information from targets illuminated by electromagnetic waves, covering the X-band (8-12 GHz) in different angles and frequencies, has been collected through the ALTAIR FEKO program. These data were trained with regression algorithms available in MATLAB application and

compared with far-field data. The machine learning algorithm was trained to predict far-field data using near-field data. The predicted data were processed with MATLAB to create images of Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR). Subsequently, scattering centers were calculated with the predicted data, and ISAR images were reconstructed with the calculated scattering centers and compared with the original images. The impact of unwanted noise signals arising from the laboratory or measurement equipment on the machine learning algorithm was examined, and the results in the ISAR images were compared. The machine learning algorithm successfully generated ISAR images for both noisy and noiseless signals, demonstrating that more effective results could be obtained with an increase in training data.

Keywords: Radar Cross Section (RCS), Wave Expansion, Near-Field to Far-Field Transformation, Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR), MATLAB, ALTAIR FEKO

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans ve tez dönemi boyunca bana yol gösteren ve numerik elektromanyetiği anlamamı sağlayan Sn. Prof. Dr. Özlem Özgün'e, tüm hayatım boyunca her an yanımda olan ve beni her zaman destekleyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
KISALTMALAR	xi
1.GİRİŞ.....	1
1.1.Literatür Taraması	2
1.2.Tez Akışı	9
2.TEORİ.....	12
2.1.Radar Temelleri	12
2.1.1.Radar Denklemi	14
2.1.2. Elektromanyetik Saçılma	15
2.1.3. Radar Kesit Alanı (RKA)	18
2.1.4. Radar Frekansları	19
2.2. Ters Yapay Açıklıklı Radar (TYAR)	19
2.2.1. Ters Yapay Açıklıklı Radar Görüntü Oluşumu	21
2.2.2. Saçılma Merkezi Modeli.....	26
2.3. Yakın Alan Ölçüm Temelleri.....	28
2.3.1. Yakın Alan Ölçüm Türleri.....	30
2.4. Geleneksel Yakın Alandan Uzak Alana Dönüşüm Yaklaşımları	36
2.4.1. Düzlem Dalga Açılımı	36
2.4.2. Küresel Dalga Açılımı	39
2.5. Makine Öğrenmesi Algoritmaları.....	42
2.5.1. Sınıflandırma ve Regresyon Ağaç Algoritmaları.....	43
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	45
3.1. Veri Üretimi	45
3.2. Geleneksel Yakın Alandan Uzak Alana Dönüşüm Algoritma Sonuçları	47

3.2.1. Yakın Alan Prob Hatalarının Ölçüm Sonuçlarına Etkisi	50
3.3. Makine Öğrenmesi Algoritma Sonuçları	53
3.3.1. Farklı Test ve Eğitim Verilerinin Algoritmaya Etkisi.....	58
3.4. Ters Yapay Açıklıklı Görüntü Sonuçları.....	61
3.4.1. TYAR Görüntülerinde Gürültünün Etkisi	63
3.4.2. Gürültünün Saçılma Merkezlerine ve Yeniden Oluşturulan TYAR Görüntülerine Etkisinin Sonuçları	65
3.4.3. Yakın Alan TYAR Sonuçları.....	69
3.4.4. İnterpolasyon Metodunun Yakın Alan Ölçümü Sayısına Etkisi	70
4.SONUÇ VE ÖNERİLER.....	74
5. KAYNAKLAR.....	77

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Basitleştirilmiş Radar Blok Diyagramı.....	13
Şekil 2.2 Monostatik Radar Sistemi.....	13
Şekil 2.3 Bistatik Radar Sistemi.....	13
Şekil 2.4 Mükemmel Elektrik İletken İçin Fiziksel Optik Yaklaşımı	16
Şekil 2.5 Eşdeğerlilik Prensibi ve Fiziksel Optik Yaklaşımı	17
Şekil 2.6 Yapay Açıklıklı Radar	20
Şekil 2.7 Ters Yapay Açıklıklı Radar	21
Şekil 2.8 Monostatik TYAR sistemi	21
Şekil 2.9 Saçılma Merkez Modeli için Gerçek ve Eşdeğer Problem	26
Şekil 2.10 Yankısız Oda	29
Şekil 2.11 Kompakt Uzunluklu Yankısız Oda	29
Şekil 2.12 Düzlemsel Yakın Alan Tarama Sistemi.....	30
Şekil 2.13 θ v Doğruluk Açısı için Düzlemsel Tarama Sistemi	33
Şekil 2.14 Silindirik Yakın Alan Tarama Sistemi.....	33
Şekil 2.15 Küresel Yakın Alan Tarama Sistemi	35
Şekil 2.16 Düzlemsel Yakın Alan Ölçüm	36
Şekil 2.17 Ağaç Algoritma Örneği	43
Şekil 3.1 Seken Işın Yöntemi	45
Şekil 3.2 Işınlardan Düzlem Dalga Davranışı.....	46
Şekil 3.3 Yakın Alan Ölçüm Düzenegi	48
Şekil 3.4 Hedef Geometrisinin Üçgen Ağ Yapısı	49
Şekil 3.5 Radar Kesit Alanı Analizi Karşılaştırması	49
Şekil 3.6 Farklı Uzaklıktaki Yakın Alan Problemlerinin Ölçüme Etkisi.....	51
Şekil 3.7 Yakın Alan Problemlerinin Uzaklığının Arttırılması İle Elde Edilen Radar Kesit Alanı	52
Şekil 3.8 Yakın Alan Probleminin Geniş Taraması İle Elde Edilen Radar Kesit Alanı	53
Şekil 3.9 Yaprak Sayısı Değişiminin Algoritmaya Etkisi	56
Şekil 3.10 Farklı Frekanslardaki Test Verilerinin Sonuçları.....	57
Şekil 3.11 (a) Farklı sayıdaki eğitim verileri ile eğitilmiş algoritmaların elektrik alan ..	59

Şekil 3.12 (a) Farklı gürültü seviyesindeki test verilerinde algoritmanın ürettiği elektrik	61
Şekil 3.13 (a) MATLAB ile elde edilen TYAR görüntüsü (b) FEKO TYAR modülü ..	62
Şekil 3.14 %10 varyans gürültülü elektrik alan verisi ile elde edilen TYAR görüntüsü	64
Şekil 3.15 %25 varyans gürültülü elektrik alan verisi ile elde edilen TYAR görüntüsü	64
Şekil 3.16 (a) Gürültüsüz elektrik alan bilgisi ile elde edilen saçılma merkezleri	66
Şekil 3.17 (a) %10 varyans gürültülü elektrik alan bilgisi ile elde edilen saçılma	67
Şekil 3.18 (a) %25 varyans gürültülü elektrik alan bilgisi ile elde edilen saçılma	68
Şekil 3.19 Yakın alan TYAR görüntüsü için FEKO düzeneği.....	69
Şekil 3.20 Yakın Alan Verileri ile elde edilen TYAR görüntüsü	70
Şekil 3.21 (a) %25 örneklenen elektrik alan verisi, (b) %25 örneklenen elektrik alan verisinin interpolasyon edilmiş hali, (c) %34 örneklenen elektrik alan verisi (d) %34 örneklenen elektrik alan verisinin interpolasyon edilmiş hali (e) %50 örneklenen elektrik alan verisi (f) %50 örneklenen elektrik alan verisinin interpolasyon edilmiş hali	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Radar Frekans Bantları	19
Çizelge 3.1 Makine Öğrenmesi Algoritmaları İçin Veri Seti.....	54
Çizelge 3.2 Makine Öğrenmesi Algoritmalarının Sonuçları	55

KISALTMALAR

RKA (RCS)	: Radar Kesit Alanı (Radar Cross Section)
TYAR (ISAR)	: Ters Yapay Açıklıklı Radar (Inverse Synthetic Aperture Radar)
YAR (SAR)	: Yapay Açıklıklı Radar (Synthetic Aperture Radar)
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
MIMO	: Çok Giriş Çok Çıkış (Multiple-Input and Multiple-Output)
RADAR	: Radyo ile Tespit Etme ve Menzil Tayini (Range Detection and Ranging)
SNR	: Sinyal Gürültü Oranı (Signal to Noise Ratio)
PEC	: Mükemmel Elektrik İletkeni (Perfect Electric Conductor)
CART	: Sınıflandırma ve Regresyon Ağaç Algoritmaları (Classification and Regression Trees)
RMSE	: Kök Toplamların Karesi (Root Mean Square Error)
VHF	: Çok Yüksek Frekans (Very High Frequency)
UHF	: Ultra Yüksek Frekans (Ultra High Frequency)
IFT	: Ters Fourier Dönüşümü (Inverse Fourier Transform)

1.GİRİŞ

Radar (Radyo ile Tespit etme ve Menzil Tayini), elektromanyetik dalgaları kullanarak çevredeki nesnelere tespit etmek ve konumlarını belirlemek için kullanılan bir teknolojidir. Radar sistemleri genellikle radyo dalgalarını kullanır. Radarlar anten aracılığıyla bu dalgaları gönderir, çevredeki nesnelere tarafından yansıtılan sinyalleri alır ve işler. Bu işlem, nesnelere mesafe, hız, yön ve bazen de şekil gibi özelliklerini belirlemek için kullanılır. Çeşitli radar türleri ve uygulamaları mevcuttur. Genel olarak radarlar güvenlik, keşif ve izleme gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılır [1].

Hedef tespitinde, radar türleri, çevre koşulları, radar frekansı ve gücü gibi parametrelerin yanında önemli olan diğer parametre Radar Kesit Alanı (RKA) bilgisidir. RKA bir nesnenin radar dalgalarını yansıtma yeteneğini ifade eden bir ölçümdür. Büyük RKA değerine sahip bir nesne, daha fazla radar sinyali yansıtır ve bu da nesnenin daha kolay tespit edilmesini sağlar. RKA bilgisi askeri strateji ve savunma planlaması için kritik bir faktördür [2]. Hava araçları ve deniz araçları, RKA analizi yapılarak radar izleme sistemlerinden kaçınmak veya kendilerini radar tarafından daha az algılanabilir hale getirmek üzere tasarlanmıştır. Bu nedenle RKA analizi, gizlilik stratejilerini anlamak ve karşı önlemler almak için önemlidir.

Radar sistemlerinden kaçınmak için sadece RKA analizi yeterli bilgiyi sağlamayabilir. Hava ve deniz araçları için saçılma merkezlerinin tespit edilmesi, bu araçların radarlara karşı önlem alması açısından önemlidir. Saçılma merkezleri tespiti, Ters Yapay Açıklıklı Radar (TYAR) işlemi sırasında hedefin farklı konumlarından algılanan radar sinyallerinin karakteristiklerinin belirlenmesidir. RKA bilgisi bir hedefin radar tarafından algılanma olasılığını belirlerken, Ters Yapay Açıklıklı Radar (TYAR) teknolojisi, hedefin hareketini izleyerek, hedefin şekli, boyutu ve saçılma merkezleri bilgilerini içeren yüksek çözünürlüklü görüntüler oluşturur [3].

RKA analizi, açık ve kapalı ortamlarda yapılabilmektedir. Kapalı ortamların analiz için daha avantajlı olmasının sebebi, dış etkenlerin etkisinin daha az olması ve daha kontrol edilebilir bir ortamın olmasıyla ilişkilidir. Ancak kapalı ortamlarda yapılan analizlerde, kapalı ortamın boyutlarından dolayı ölçümün yakında yapılması ve sonrasında uzak alana dönüştürülmesi gerekmektedir. Dönüşüm, genellikle Fresnel integralleri veya Fourier dönüşümleri gibi matematiksel yöntemler kullanılarak gerçekleştirilir [4]. Bu

yöntemlerin doğruluğu yüksek olmasına rağmen çok sayıda ölçüm alınması gerekmektedir. Bu da ölçüm işleminin uzun ve maliyetli olmasına yol açmaktadır.

Bu tez kapsamında az sayıda yakın alan verisi ile doğruluğu yüksek uzak alan verisinin kısa sürede elde edilebilmesi için makine öğrenmesi algoritması geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda regresyon algoritmaları kullanılmıştır. Bu amaç doğrultusunda farklı sayıdaki hedeften yakın ve uzak elektrik alan bilgisi ALTAIR FEKO programı kullanılarak elde edilmiş ve bu veriler MATLAB programında bulunan regresyon algoritmaları için giriş verisi oluşturmuştur. Düşük sayıdaki test verisi ile kısa sürede ve doğruluğu yüksek uzak alan verisi elde edilmesi amaçlanmıştır.

1.1.Literatür Taraması

Yakın alandan elde edilen elektrik alanlar ile radar kesit alanı bilgisine ulaşmak için yakın alan ifadelerinin uzak alana dönüştürülmesi gerekmektedir. Cisimden geri saçılan elektrik alan ifadesinin karesi radar kesit alanı olarak ifade edilir ve radar kesit alanı uzak alan ifadesidir. Yakın alandan uzak alana dönüşüm için çeşitli yöntemler kullanılır. Fourier dönüşüm yöntemleri [5], küresel dalga açılım yöntemi [6], integral denklem yöntemleri [7], ters saçılma problemi yöntemi ve makine öğrenmesi tabanlı yöntemi [8] gibi yöntemler geliştirilmiştir. Her yöntemin avantajları ve kısıtlamaları vardır. Yöntemin seçimi, problemin doğasına, doğruluk gereksinimine, hesaplama kaynaklarına ve zaman gibi kriterlere bağlıdır. Yakın alandan uzak alan elde etmek için kullanılan temel iki yöntem; eş değeri yöntemine dayanan Huygens-Fresnel prensibi ve elektromanyetik dalga modal açılım yöntemidir. Huygens prensibine göre elektromanyetik dalganın üzerindeki her nokta ikincil kaynak gibi davranır ve yeni elektromanyetik dalgaları oluşturur. Schelkunoff tarafından geliştirilen eş değeri yöntemi Green teoremine dayanır. Bu teorem integral denklem yaklaşımı olarak da bilinir. İntegral denklem yaklaşımı, elektrik ve manyetik alanların bir hacim içinde akım yoğunluğu olarak ifade edilmesine dayanır. Bu yaklaşım sayesinde ortamda bulunan elektromanyetik alan ifadeleri için eşdeğer kaynak değerleri hesaplanarak, uzak alan ifadeleri bulunur. Temel yöntemlerden diğeri modal açılım yöntemidir. Modal açılım yöntemleri düzlem dalga, silindirik dalga ve küresel dalga olmak üzere üç farklı açılım yöntemini içerir. Modal açılım yöntemi elektromanyetik alanların düzlemsel, silindirik veya küresel dalga fonksiyonları türünden ifade edilme yöntemidir. Yakın alan ifadelerini dalga fonksiyonlarının katsayıları ile ifade ederek, uzak alan ifadeleri hesaplanır. Yakın alan ölçümleri sonlu bir düzlemde yapıldığı için kesme hataları meydana gelir. İntegral

denklem yöntemi modal açılım yönteminden farklı işleme tekniği kullandığı için daha düşük kesme hatasına sahiptir. İntegral denklem yöntemi, bir model tabanlı parametre tahmini tekniği olduğu için her zaman FFT tabanlı modal açılım yönteminden daha yüksek çözünürlük sağlar [10]. Daha düşük kesme hatasının elde edilmesi ölçülen yakın alan ifadelerinin eş değer akım ifadelerine dönüştürülerek eş değer kaynaklara elde edilmesine bağlıdır. Eş değer kaynakların elde edilmesi ve Fourier tekniklerinin kullanılmasıyla uzak alan ifadeleri düşük hatalar ile elde edilebilir. İntegral yaklaşımının düşük hatalar ile elde edebilmesi için daha çok işlem yapması gerekmektedir. Bu da modal yaklaşıma göre 20-25 kat daha fazla zaman almasına sebep olmaktadır.

Modal açılım yöntemleri, ölçülmek istenen antenin türüne ve ölçüm altyapısına bağlıdır [11]. Ölçüm türüne göre dönüşüm algoritmasının karmaşıklığı ve zorluğu değişmektedir. Genellikle düzlemsel sistemler yüksek kazançlı antenler ve faz dizili antenler için uygundur. Düzlemsel sistemlerde analiz süreleri düşük ve ölçülen antenin hareket ettirilmesine ihtiyaç duyulmamaktadır. Silindirik ve küresel sistemler düzlemsel sistemlere göre daha uzun analiz sürelerine sahiptir. Ölçüm yapılan antenlerin farklı eksenlerde dönmesi gerektiği için daha pahalı prob ekipmanlarına ihtiyaç vardır ve prob hizalaması daha zordur. Ancak bu sistemler ile daha düşük kazançlı antenler ve çok yönlü antenler (Omnidirectional) için uygundur. Seçilecek ölçüm sistemi antenin fiziksel ve elektriksel boyutuna bağlıdır. Antenin fiziksel boyutu ölçüm probunun tarama alanından büyük olmamalıdır. Tarama alanı, ölçüm probunun yeri değiştirilerek arttırılsa bile silindirik ve küresel sistemlerde antenin rotasyonundan kaynaklı kısıtlamalar mevcuttur. Düzlemsel ölçüm sistemleri için diğer kısıtlama, ölçüm sisteminde bulunan prob tarama yüzeyinde hareket ettikçe eksponansiyel bir asimptotik davranış gösterir. Bu asimptotik davranış iki boyutlu Fourier transformunda, tarama bölgesi sonsuza gitse bile sonlu bir sayı üreterek osilasyon oluşturacağı anlamına gelir. Bu da tarama bölgesinde, sonsuza gidilse bile hesap edilen uzak alan bölgesinde hatanın sıfıra inmeyeceğini gösterir. Düzlemsel ölçüm sisteminin avantajı silindirik ve küresel sistemlere göre prob mekanizmasının daha basit olması ve faz ölçümlerinde daha az hataya sebep olmasıdır. Aynı zamanda prob düzeltmeleri için ihtiyaç duyulan analitik dönüşümleri daha basit ve hızlı olması, düzlemsel ölçüm sisteminin avantajlarından [12]. Morse ve Feshbach uzak elektrik alanlarının yakın elektrik alanlarından türetilmesinin yüzeye dik olan vektör dalga fonksiyonlarına bağlı olduğunu ispatlamışlardır [13]. Altı adet yüzeye dik olan vektör dalga çözümü vardır. Bunlar; düzlemsel, silindirik, küresel, eliptik silindirik,

parabolik silindirik, konik koordinat sistemleridir. İlk üç koordinat sistemi çoğunlukla tarama için kullanılan koordinat sistemleri olduğu için yakın alandan uzak alana dönüşüm algoritmaları ilk üç koordinat sistemi için geliştirilmiştir.

Küresel ölçüm sisteminde kullanılan dönüşüm algoritmaları yaklaşım gereği düzlemsel ölçüm sisteminden farklılık göstermektedir. D.S. Jones tarafından her elektromanyetik alan ifadesinin küresel dalga açılım formatında yazılabileceği ispatlanmıştır [14]. Küresel dalga açılımı, Maxwell denklemlerinin küresel Bessel denklemleri, Legendre polinomu, Hankel fonksiyonu ve propagasyon faktörü ile çözümlenmiş halidir. Küresel dalga açılımında yakın alan ifadeleri kullanılarak küresel harmonik fonksiyonlarının katsayıları belirlenir. Hesaplanan katsayılar kullanılarak uzak alan ifadeleri elde edilir. Uzak elektrik alan ifadeleri elde edilebildiği gibi yüzey dalgaları da elde edilebilir. Bu çalışmada [15], telefonlarda bulunan milimetre dalga antenlerinden kaynaklanan yüzey dalgalarının minimize edilmesi için kontrol portlarının tasarımı irdelenmiştir. Yüzey dalgaları, istenmeyen elektromanyetik yayımlara sebebiyet vermektedir. Antenler arası kuplajlar olmasına neden olur ve bu yüzden anten performansında düşüklüğe sebep olur. Milimetre dalga antenlerinin yakın konumuna yeni elektromanyetik alan üreten kontrol portları oluşturarak, istenmeyen yüzey dalgalarının azalması amaçlanmaktadır. Yapılan çalışmada, tasarlanan kontrol portlarının akım ve faz değerlerinin ağırlıklandırılmasını küresel dalga açılım yöntemi kullanarak bulunmuştur. Çalışmanın sonucu olarak, yüzey dalgaların yüksek derece modlarında çalıştığı analiz edilmiş olup, kontrol portlarının da yüksek modlarda akım ve faz değerlerinin hesaplanarak tasarımı yapıldığında yüzey dalgalarının azaldığı tespit edilmiştir.

Küresel dalga açılımında kullanılan küresel harmonik fonksiyonlarının katsayılarının farklı iki teknik ile kıyaslanarak birbirilerine göre avantajları tartışılmıştır. Bu çalışmada [16], iki farklı küresel dalga açılım formu olan skaler küresel harmonik katsayıları ve vektörel küresel harmonik katsayıları nitelik ve nicelik olarak kıyaslanmıştır. Her iki harmonik katsayıların sonuçlarda ciddi değişiklikler göstermediği, skaler katsayıların daha kısa ve analitik sonuçlara uygulanabilir olduğu gösterilmiştir. Kısa ve analitik sonuçlara uygulanabilirlik, modal açılım yöntemleri için önem arz etmektedir. Ölçümü yapılan yakın alanların doğru şekilde uzak alanlara dönüştürülebilmesi için ölçüm sayısının yeterli örneklemede ve boyutta yapılması gerekmektedir. Küresel dalga açılım yönteminde kullanılan küresel mod katsayıları ölçüm yapılan antenin/cismin boyutu ile doğru orantılıdır. Antenin fiziksel boyutunun artması hesaplanan küresel mod

katsayılarının sayısını ve dolayısıyla ölçüm süresini de arttırmaktadır. Bu çalışmada [17], küresel dalga açılımı için gerekli olan mod katsayılarının ölçülen kürenin boyutundan bağımsızlığı üzerine prosedür geliştirilmiştir. Önerilen prosedürde, ölçülen cismin koordinat merkezini cismin merkezinden farklı bir noktaya değiştirerek daha küçük bir alanda ölçüm alındığında düşük hatalar ile sonuca ulaşıldığı gösterilmiştir. Geliştirilen prosedürün dezavantajı, prob düzeltmesinin Euler dönüşümü ile yapılması ve doğrusal denklem sistemini doğrudan çözenin getirdiği zaman kaybı ve verimsizliği gösterilmiştir. Ancak ölçüm alanının küçülmesinden dolayı ölçüm süresinin kısaldığı gösterilmiştir. İşlem hızının arttığı, analiz süresinin kısaldığı diğer çalışmada, ölçümlerin tek koordinat merkezi etrafında yapılmak yerine birden fazla koordinat merkezinde daha küçük küre boyutları ile yapıldığında işlem sürelerinin kısaldığı gösterilmiştir. Bu çalışmada [18] rastgele seçilen ölçüm kürelerinin, daha az sayıda küresel harmonik katsayılar ile ifade edilerek ve iteratif şekilde uzak alanların daha hızlı bulunduğu gösterilmiştir. Düzlemsel ölçüm sistemlerinin analiz sürelerinin kısa olması sebebi ölçüm yüzeyinin küresel ve silindiriğe göre daha az yer kaplamasının yanında analiz için kullandığı yöntemin kompleks matematik yerine Fourier dönüşümü kullanılarak yapılmasıdır. Küresel ölçüm sistemlerin analizinden farklı olarak, yakın elektrik alan ifadelerinden düzlem dalga spektrum fonksiyonları elde edilir. Spektrum fonksiyonları kullanılarak uzak elektrik alan ifadeleri hesaplanır [19].

Haberleşme sistemlerinde geliştirilen klasik stokastik modeller uzak alan elektromanyetik yaklaşımına, yani düzlemsel dalga yaklaşımına göre türetilmiştir. Ancak, düşük frekanslarda dalga boyu saçıcı cisme nazaran büyük olduğu durumlarda bu yaklaşımlar hatalı sonuçlar üretmektedir. Bu çalışmada [20], yeni dalga açılımı olan Fourier düzlem dalga serisi açılımı kullanılarak düşük frekanslarda oluşan hataları minimize edilmektedir. Yapılan çalışma ile fizik tabanlı modelleri kullanılarak MIMO teknolojisinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada [21], radar kesit alanı ölçümü için yakın alandan uzak alana dönüşüm algoritması sunulmuştur. Üç boyutlu dönüşüm algoritması yerine iki boyutlu dönüşüm algoritması geliştirerek boylam uzunluğu yanal uzunluğa göre kısa olan cisimlerde ölçüm sürelerinin düştüğü gösterilmiştir. İki boyutlu diğer dönüşüm algoritmalarına göre daha doğru sonuçlar hesapladığı gösterilmiştir. Antenlerin performanslarını analiz ederken geleneksel yöntem olan düzlem dalga açılım metotları kullanılır. Ancak antenlerin ideal olmayan durumlarda çalıştığında geleneksel metotlar hatalara sebep olur. Bu çalışmada [22], T.B. Hansen gelen ve giden dalgaların

yönsel spektrumlarını içeren bir formülasyon geliştirir. Geliştirdiği yeni yöntem ile geleneksel yöntemlerin doğru sonuçlar üretmediği durumları daha düşük hatalar ile hesaplamayı başararak, anten analizlerini geleneksel metotlara göre daha güvenilir sonuçlar üretir. Aynı zamanda geleneksel yöntemlere göre daha az düzlem dalga bilgisi ile yakın sonuçlara ulaşır.

Genelde saçılma problemlerinde saçıcı cisim tek parça olarak düşünülerek problem ele alınır. Ancak gelişen drone teknolojisiyle beraber, sürü halinde uçan cisimlerin saçılma problem analizleri gündeme gelmiştir. Sürü halindeki cisimlerin saçılma analizleri için kullanılan geleneksel tam-dalga nümerik yöntemlerin aksine bu çalışmada [23], düzlem dalga açılımı kullanılarak bir yöntem geliştirilmiştir. Düzlem dalga açılımı kullanılarak geliştirilen yöntem düşük işlem karmaşası ile efektif sonuçlar üretebilmektedir. Yöntem 3 aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak birbirine yakın iki cismin birbirine olan etkileri geliştirdikleri düzlem dalga açılımı ile hesaplanması, ikinci aşamada cisimlerin yeterli miktarda ayrıldığı tespit edilebilmesi için bir eşik değerinin adaptif bir prosedür ile belirlenmesi, son aşamada saçılma analizi yapılmasıdır. Bu çalışmada [24], geliştirilen düzlem dalga açılım prosedürü ile holografik projeksiyon yöntemine göre daha düşük işlem karmaşasına sahip olduğu gösterilmiştir. Holografik projeksiyon yöntemi yüksek yönlülüğe sahip antenlerin analizi için daha uygunken, geliştirdikleri yöntem antenin geometrisinden bağımsız olarak rastgele oluşan yakın elektrik alanlarını dönüştürebildiği gösterilmiştir. Aynı zamanda geliştirilen yöntemde prob düzeltme algoritmasını da eklenerek uzak alan analizini düşük hata ile bulabildiği gösterilmiştir.

Klasik dalga açılım yöntemleri (düzlemsel, silindirik ve küresel dalga açılımı) birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Probleme bulunan anten türüne, frekans bilgisine, ölçüm ortamına, prob düzeltmesine bağlı olarak yöntemlerin birbirlerine göre üstünlükleri vardır. Küresel dalga açılım yöntemleri düzlemsel açılım yöntemlerine göre daha karmaşık analiz altyapısına sahip olmasına karşı, uygulama alanı daha fazladır. Düzlemsel açılım yöntemi için kullanılan yöntemlerde ölçüm için geçen zaman küresel açılım yöntemlerine göre daha az olduğu için, uygulama alanına göre tercih edilebilmektedir. Ancak tüm klasik yöntemlerin temel sorunu, ölçüm ve analiz için çok zaman kaybedilmesidir. Çalışma frekansına göre prob ölçüm çözünürlükleri değişmekte ve yüksek frekanslarda ölçüm için kurulması gereken laboratuvar altyapıları yüksek maliyette olmaktadır. Yakın alandan uzak alan dönüşüm algoritmaları için son

zamanlarda makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak, ölçüm sürelerinin azaltılması ve analizlerin düşük hata ile daha hızlı hesaplanması için çalışmalar yapılmaktadır.

1-6 GHz aralığında yakın alan ve uzak alan verileri kullanılarak makine öğrenmesi algoritması geliştirilmiştir [25]. Makine öğrenmesi için XGBoost kütüphanesi kullanılarak %7.1 hata payı ile uzak alan verilerinin tahmin edilebildiği gösterilmiştir. Yakın alan verilerini RFX2 prob dizisi kullanılarak elde edip, uzak alan verilerini hızlı ve daha doğru şekilde elde etmek için makine öğrenmesi algoritması geliştirilmiştir. Prob dizisi üzerinde yakın alan ifadelerinin değişimlerinin dinamik olduğu bölgelerde adaptif örnekleme tekniği uygulanmış ve uygulanan teknik regresyon algoritması ile hesaplanmıştır. Değişme oranına göre daha çok ölçüm alınması gereken yerler belirlenerek örnek miktarı artırılmıştır. Adaptif algoritma ile daha az sayıda veri ile benzer doğruluk elde edilebildiği gösterilmiştir [26]. Farklı makine öğrenmesi algoritmaları ile bazı problemlerin çözümünü daha düşük hata ile bulmak mümkündür. Bu çalışmada [27] derin konvolüsyonel sinir ağları kullanılarak, 3 metredeki reaktif yakın alan ifadelerini uzak alana çeviren hibrit algoritma geliştirilmiştir. Algoritmanın 5 dB sinyal-gürültü (SNR) oranına kadar doğru sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Anten yayılım karakteristiğinin ölçüm zamanı, çalışılan bant genişliği, açı çözünürlüğü, iki veya üç boyutlu tarama bilgisi ile doğru orantılı olarak artar. Bu çalışmada [28], az sayıda yakın alan verisi kullanılarak hızlı ve düşük hata ile anten yayılım karakteristiğinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Yakın alan verileri CST ile elde edilmiş ve veriler U-Net sinir ağları algoritması kullanılarak eğitilmiştir. Diğer bir çalışmada [29], fiziksel optik yaklaşımı ile momentler metodu arasındaki hatanın sinir ağları kullanılarak minimize edilmesi sağlanmıştır. Fiziksel optik yaklaşımı, momentler metoduna göre çok daha kısa sürede analiz imkânı sağlamasına rağmen yakınsama yaptığı için hatalara neden olmaktadır. Geliştirilen algoritmada fiziksel optik analizi ile momentler metodu arasında ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Algoritma sonucu momentler metodu sonucu ile kıyaslandığında hataların azaldığı gösterilmiştir. Makine öğrenmesi algoritmaları ile yapılan çalışmalarda karşılaşılan sorunlardan biri çalışılan problemin yanında makine öğrenmesi algoritmaları için yazılım geliştirme zorunluluğudur. Bu çalışmada [30] uzak alan bilgilerinin elde edilmesi için tam-dalga Maxwell denklem analizi yerine web tabanlı derin sinir ağları algoritması geliştirilmiştir. Çalışmanın amaçlarından biri farklı kullanıcıların geliştirdikleri eğitim modellerini web uygulamasına yükleyerek paylaşabilmeleri, bu sayede benzer yakın alan uzak alan dönüşüm algoritmaları için

geliştirilmiş eğitim verilerinin kıyaslanabilir olmasıdır. Saçılan elektrik alanları kullanılarak elde edilen eşdeğer kaynakların hesaplanması, yakın ve uzak alan bilgilerinin hesaplanması için önem arz etmektedir. Eşdeğer kaynakların gerçek kaynaklara yüksek çözünürlükte yakınsaması gerektiğinde klasik eşdeğer kaynak metotları nümerik olarak tekillik göstermektedir. Bu çalışmada [31], nümerik hataları düzeltmek için makine öğrenmesi kullanarak eşdeğer kaynak hesaplaması yapılmıştır. Az miktarda radar kesit alanı ve saçılan elektrik alan bilgisi kullanılarak nümerik hataların düzeltildiği gösterilmiştir. İlerleyen çalışmalarda farklı sinir ağ algoritmaları denenerek hataların azaltılması hedeflenmiştir. Bu çalışmada [32], yakın alan rezonatörleri ile üretilen elektromanyetik dalgaların uzak alandaki görüntüleri için derin öğrenme algoritması geliştirilmiştir. Eğitim verileri CST kullanılarak elde edilmiş ve pratik senaryoları simüle etmek için beyaz Gauss gürültüsü eklenerek algoritma geliştirilmiştir. Derin öğrenme algoritması sayesinde girişim etkileri minimize edilmiş ve Green teorem gibi geleneksel yöntemler kullanılmayarak hesaplama süresinde azalma sağlanmıştır. Hedeflerin elektriksel boyutu büyük olduğu durumlarda, geleneksel elektromanyetik analiz uygulamaları yeterli verimlilikte çalışmamakta ve gerçek zamanlı analizler için yeterli gereksinimleri sağlayamamaktadır.

Bu çalışmada [33] U-net tabanlı sinir ağ algoritması kullanılarak boyama sonucu oluşan hatalı kaplamalı hedeflerin iki boyutlu TYAR görüntüleri ile saçılma merkezlerinin bulunması hedeflenmiştir. Tam dalga elektromanyetik analizinin uzun analiz sürelerinden kaçınmak için fiziksel optik yaklaşımı ile eğitim verileri oluşturulmuş ve Çok Seviyeli Hızlı Çok Kutup yöntemi (MLFMM – Multilevel Fast Multipole Algorithm) kullanılarak eğitim verilerinde oluşan analiz hataları minimize edilmiştir. Bu sayede eğitim verilerinin elde etme zorluğu azaltılmış ve modelin doğruluğu arttırılmıştır. Önerilen derin sinir ağları yöntemi klasik yöntemlerin içerdiği ağ yapısı, elektromanyetik analiz, TYAR görüntüleme işlemlerine kıyasla düşük hatalar ile çok daha hızlı sonuç ürettiği gösterilmiştir. Derin sinir ağlar yöntemi kullanılarak geliştirilen algoritma ile gerçek zamanlı radar hedefleri için saçılma merkez bilgisini düşük hata ile ürettiği gösterilmiştir. İyi eğitilmiş makine öğrenmesi algoritmaları ile yakın alan verilerinden saçılma merkezini elde etmenin yanında, daha az sayıda yakın alan verisi kullanarak da saçılma merkez bilgisi elde edilebilir. Bu çalışmada [34], az sayıda eğitim verisi kullanılarak bir insansız hava aracının kompleks saçılma merkez bilgisinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Eşit sayıda üretilen eğitim verileri kullanılarak geliştirilen algoritma ile geometrik kırım

teorisi temelli saçılma merkezi modelinden ve polinom temelli saçılma merkezi modelinden daha kısa sürede daha iyi sonuçlar elde edildiği gösterilmiştir.

Yakın alan ifadelerinden uzak alan ifadelerine dönüşüm için geliştirilen makine öğrenmesi algoritmaları farklı yaklaşımlar ile dönüşüme katkı sağlayabilir. Bu çalışmada [35] üç farklı yaklaşım ile uzak alan verileri yakın alan verilerinden elde edilmeye çalışılmıştır. İlk yaklaşımda yakın alan verileri ile akım değerleri arasında ilişki kurarak bir makine öğrenmesi algoritması geliştirilmiş ve yakın alan verilerinden eş değer akım değerlerini doğru bulmayı hedeflemiştir. Eş değer akım değerleri elde edildikten sonra klasik dönüşüm algoritmasında olduğu gibi uzak alan verileri hesaplanmıştır. İkinci yaklaşımda, yakın alan verileri ile uzak alan verileri arasında ilişki kurularak bir makine öğrenmesi algoritması geliştirilmiş ve yakın alan verilerinden, doğrudan radar kesit alanı ifadelerinin bulunması hedeflenmiştir. Üçüncü yaklaşımda eğitim verileri için anten dizisi kullanılarak elde edilmiştir. Anten dizisinde antenlere uygulanan gerilim bilgisi ile antenlerin oluşturduğu yakın alan verileri arasında ilişki kurarak bir makine öğrenmesi algoritması geliştirilmiş ve faz verisi kullanılmadan uzak alan verilerinin elde edilmesi hedeflenmiştir. Üç yaklaşımda da sonuçların klasik yöntem ile yakınsadığı gösterilmiştir. Bu çalışmada [8] yakın alan ifadelerinden uzak alan ifadelerine dönüşüm problemini lineer olmayan regresyon problemi olarak görerek makine öğrenmesi algoritması eğitilmiştir. Eğitim verileri için analiz programının yanında laboratuvar sonuçları da kullanılarak, geliştirilen algoritmanın doğruluğu gösterilmiştir. Eğitim verileri için Swerling-1 modeli nokta saçıcı hedefler kullanılmıştır. Geliştirilen algoritmanın ölçüm senaryosu hakkındaki bilgi miktarı arttırıldığında performansının arttırıldığı gösterilmiştir. Geleneksel yöntem ile zaman kıyaslaması yapıldığında, algoritmanın eğitilmesinin uzun sürdüğü ancak test süresinin çok kısa sürdüğü gösterilmiştir.

1.2. Tez Akışı

Bölüm 1’de yakın elektrik alan bilgisinin uzak elektrik alan bilgisine dönüşümü için geliştirilmiş geleneksel yöntemlerden ve makine öğrenmesi tabanlı yöntemlerden bahsedilmiştir. Bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajları incelenmiş ve güncel olarak yapılan araştırmaların sonuçları incelenerek kapsamlı literatür araştırması yapılmıştır. Bölüm 2 teori başlığında radar temelleri ve ters yapay açıklıklı radarlar hakkında teorik bilgi verilmiştir. Radar denklemi başlığı altında, radarların çalışma prensiplerinden bahsedilmiş ve matematiksel formülasyonlara değinilmiştir. Radar kesit alan analizinde

önemli olan monostatik ve bistatik durumlar için matematiksel çıkarımlar incelenmiştir. Elektromanyetik saçılma başlığı altında, saçılma fenomeni genel kapsamlı olarak incelenmiştir. Yüksek frekanslı ışınların analizinde kullanılan fiziksel optik yöntemi detaylı olarak anlatılarak, saçılan elektrik alan ifadelerinin matematiksel çıkarımları gösterilmiştir. Fiziksel optik yöntemi kullanılarak elde edilen elektrik alan ifadeleri ile radar kesit alanı bilgisinin nasıl elde edildiği, monostatik ve bistatik radar kesit alanı bilgisinin teorisi ve pratikteki uygulamaları bir sonraki bölüm olan radar kesit alanı başlığında incelenmiştir. Radar frekansları başlığında, günümüzde kullanılan radarların frekans bilgileri verilmiş olup radar kesit alanı analizi için hangi frekans bantlarının pratikte önem arz ettiği irdelenmiştir. Hedeften saçılan elektrik alan bilgisi işlenerek elde edilen radar kesit alanı bilgisi hedef saçılma bilgisi hakkında bilgi verir. Saçılan elektrik alan bilgisi işlenerek elde edilen diğer bilgi Ters Yapay Açıklıklı Radar (TYAR) bilgisidir. Ters Yapay Açıklıklı Radar başlığında, TYAR sistemleri hakkında teorik bilgi ve matematiksel çıkarımlar incelenmiş, görüntülemenin nasıl yapıldığı anlatılmıştır. TYAR sistemlerinin pratikte kullanımları hakkında bilgi verilerek, radar kesit alanı bilgisi ile farklılıklarına değinilmiştir. TYAR görüntüsü işlenerek, hedef hakkındaki önemli bilgilerden biri olan, saçılma merkez bilgisinin nasıl elde edildiği saçılma merkez bilgisi başlığında incelenmiştir. Saçılma merkez bilgisinin TYAR görüntüsünden elde edilmesi için kullanılan CLEAN algoritmasından bahsedilmiştir. Saçılan elektrik alanları analiz ile elde edilebildiği gibi ölçüm ile de elde edilebilir. Yakın alan ölçüm türleri başlığında, kapalı alan laboratuvar ölçümlerinde kullanılan ölçüm türleri bahsedilmiş ve birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları anlatılmıştır. Geleneksel yakın alandan uzak alana dönüşüm yaklaşımları başlığında, Maxwell denklemlerinin kullanılarak elde edilen dalga açılım yöntemi anlatılmıştır. Dalga açılım yöntem türlerinden bahsedilmiş ve matematiksel formülasyonları açıklanmıştır. Kullanılan yöntemlerin hangi şartlar ve pratik koşullarda tercih edildiği incelenmiş ve yöntemlerin birbirine göre avantaj ve dezavantajları anlatılmıştır. Geleneksel yöntemlerin aksine, yeni yaklaşımlardan biri olan makine öğrenmesi tabanlı yöntemler, makine öğrenmesi algoritmaları başlığında incelenmiştir. Sınıflandırma ve regresyon algoritmaları hakkında teorik bilgi verilerek kullanılan matematiksel yaklaşımlar incelenmiştir. Yakın elektrik alandan uzak elektrik alan ifadelerine geçmek için kullanılan regresyon algoritma türlerinden bahsedilmiştir. Bölüm 3'te sayısal deneyler başlığında, ilk olarak numerik verilerin üretimi için kullanılan programdan bahsedilmiştir. Veri üretimi için ALTAIR FEKO programında bulunan Seken Işın Yönteminin teorisinden bahsedilerek matematiksel çıkarımları

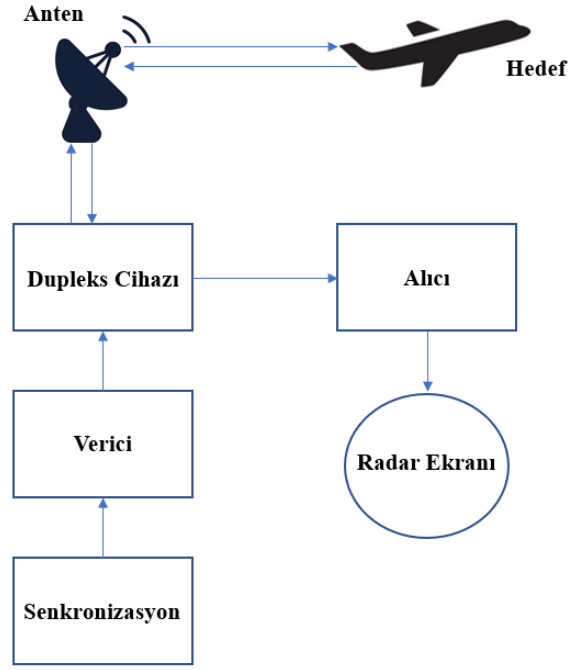
anlatılmıştır. Veri üretimi için kullanılan geometrik modeller hakkında bilgi verilmiş ve çalışılan frekans, polarizasyon, açı aralığı bilgileri paylaşılmıştır. Diğer başlıkta, geleneksel yöntemler kullanılarak elde edilen dönüşüm algoritma sonuçları paylaşarak, analiz ve ölçüm çalışmalarında meydana gelen hata ve zorluklar tartışılmıştır. Laboratuvar ve ekipman yetersizliği durumunda (prob hassasiyeti ve doğru konumlandırılmaması, vb.) geleneksel yöntemlerin uzak elektrik alan sonuçlarında nasıl değişimlere neden olduğu gösterilmiştir. Makine öğrenmesi algoritma sonuçları başlığında, MATLAB programında bulunan regresyon algoritmalarının birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları incelenerek, elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Regresyon algoritmaların hata sonuçları karşılaştırılarak hangi algoritmanın yakın alandan uzak alan elde etmek için kullanılabileceği gösterilmiştir. Tezin temel motivasyonlarından biri, az sayıda yakın alan bilgisi ile hızlı ve düşük hatalı uzak alan bilgisi elde etmektir. Bu motivasyonu destekleyecek olan az sayılı test ve eğitim verilerinin sonuçlara etkisi gösterilmiş ve tartışılmıştır. Yakın alan verileri analiz programları ile elde edilebildiği gibi yankısız odada yapılan ölçümlerle de elde edilebilir. Yankısız odada yapılacak ölçümlerde meydana gelen gürültü etkisinin, algoritmanın sonuçlarına etkileri gösterilmiştir. Eğitilen algoritma ile elde edilen uzak alan verileri kullanılarak TYAR görüntüleri elde edilmiştir. Gürültünün, TYAR görüntülerine ve saçılma merkez bilgisine olan etkileri gösterilmiştir. Yakın alan verileri doğrudan kullanılarak TYAR görüntüleri elde edilmiş ve algoritma sonucu ile farklılıkları tartışılmıştır. Çalışmanın son bölümü olan Bölüm 4'te tezin hedefi olan yakın elektrik alandan uzak elektrik alana dönüşüm için geliştirilen algoritma ile elde edilen sonuçlar hakkında yorumlar sunulmuştur. Çalışmanın gelecekte nasıl ilerleyebileceği hakkındaki fikirler sunularak tez çalışması sonlandırılmıştır.

2.TEORİ

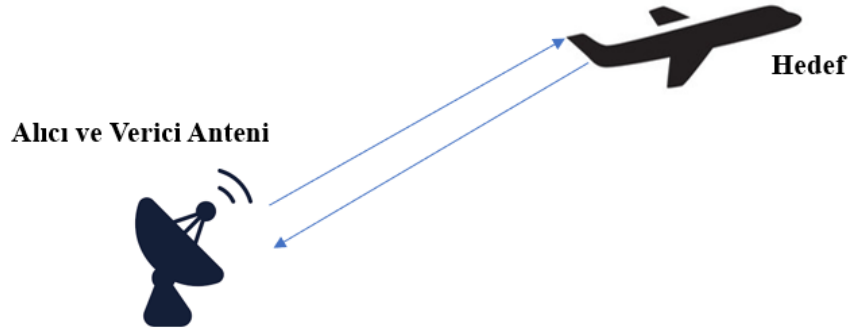
2.1.Radar Temelleri

Radar, "Radio Detection And Ranging" (Radyo Algılama ve Menzil Belirleme) kelimelerinin kısaltmasıdır. Bu sistemler, elektromanyetik dalgaları kullanarak uzak mesafedeki nesnelere tespit etmek ve konumlarını belirlemek için kullanılır. Radarlar genellikle kullandıkları frekansa göre farklı türlere ayrılır. Bunlar arasında hava trafik kontrolü, hava savunma, meteoroloji, denizcilik, hız tespiti ve uzay araştırmaları gibi çeşitli uygulamalar bulunur. Temel olarak, bir radar sistemi üç ana bileşenden oluşur. Bunlar; verici anteni, alıcı anteni ve işleme üniteleridir. Basitleştirilmiş bir radar sistemi Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Radar anteni, belirli bir frekans aralığında elektromanyetik dalgaları yayarak çevreye gönderir. Gönderilen dalgalar, çevredeki nesnelere çarpar ve nesnelere bir kısmı dalgaları yansıtır. Radarın anteni bu yansımaları alır. Alınan sinyaller incelenerek yansımanın ne kadar uzakta olduğu belirlenir. Bu işlem gönderilen dalgaların zamanından, yansıma alınana kadar geçen süre ile hesaplanır. Bu süre, yansımanın ne kadar uzakta olduğuna bağlıdır. Hedefin hızı, gönderilen sinyal ile alınan sinyal arasındaki Doppler frekansı hesabı ile belirlenir. Radarlarda hedefin uzamsal çözünürlüğü üretilen sinyalin bant genişliği ile ilişkilidir, hedefin açısal çözünürlüğü anten huzmesi ile ilişkilidir.

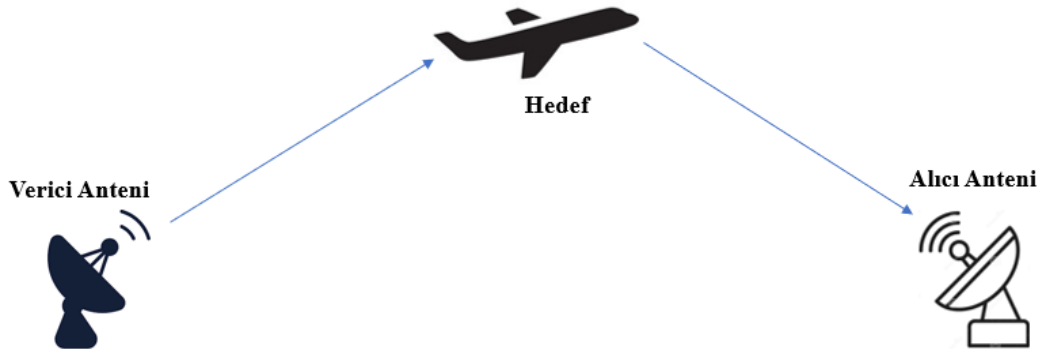
Radarlarda bulunan verici antenler hedefi aydınlatırken, hedeften yansıyan ışınlar alıcı antenler tarafından toplanır. Işınlar hedefin her yönünden yayıldığı için radarların kullanım amacına göre ölçüm türleri değişebilir. Alıcı antenin verici anten ile aynı veya farklı konuma yerleştirilmesi ile farklı türde radar ölçümleri yapmak mümkündür. Monostatik ve bistatik ölçüm olmak üzere iki farklı radar ölçümü vardır. Monostatik radarın blok şeması Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Monostatik radarlarda alıcı ve verici anten için tek anten kullanılır. Dupleks cihazı ile sinyal gönderme işlemi veya alma işlemi gerçekleştirilir. Sinyal gönderme ve alma işlemi tek antenden yapıldığı için senkronizasyon önem arz etmektedir. Diğer ölçüm sistemi olan bistatik radarın blok şeması Şekil 2.3’te gösterilmiştir. Bistatik sistemin farkı, alıcı ve verici antenlerin farklı lokasyonlarda bulunmasıdır. Operasyonel kullanıma göre monostatik veya bistatik radarların kullanım tercihi yapılır [36].



Şekil 2.1 Basitleştirilmiş Radar Blok Diyagramı.



Şekil 2.2 Monostatik Radar Sistemi



Şekil 2.3 Bistatik Radar Sistemi

2.1.1.Radar Denklemi

Radar denklemi, bir radar sisteminin performansını analiz etmek için kullanılan temel bir matematiksel ifadedir. Bu denklem, gönderilen sinyalin alıcı tarafından algılanabilme ve hedef nesnelerin tespit edilebilme yeteneğini tanımlar. Temel olarak, radar denklemi sinyal gücü ile gürültü arasındaki oramı ifade eder. Radar denklemi Denklem (2 . 1) 'de verilmiştir.

$$P_r = P_t \frac{G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_t^2 R_r^2} \quad (2 . 1)$$

P_r = Alıcı anten giriş gücü (Watts)

P_t = Verici anten çıkış gücü (Watts)

G_t = Verici anten kazancı (dB)

G_r = Alıcı anten kazancı (dB)

σ =Radar Kesit Alanı (m²)

R_r =Alıcı anten ile hedef arası uzaklık (m)

R_t = Verici anten ile hedef arası uzaklık (m)

λ = Dalga Boyu (m)

Radar denkleminde bulunan kısaltmalar yukarıda verilmiştir. Radar denklemi daha detaylı incelendiğinde denklemi üç parçaya ayırarak yazmak mümkündür. Birinci parçası Denklem (2 . 2)'de verilmiştir. Radar sinyali verici antenden gönderildikten sonra R_t mesafede oluşturduğu güç yoğunluğu antenin kazancı ile doğru orantılı, R_t mesafesi ile ters orantılı değişir.

$$S_t = P_t \frac{G_t}{4\pi R_t^2} \quad (2 . 2)$$

Denklemin ikinci parçası Denklem (2 . 3)'te verilmiştir. Radar sinyali hedefe çarpıp yansıdıktan sonra, alıcı antende oluşturduğu güç yoğunluğu hedefin radar kesit alanı ile doğru orantılı, R_r mesafesi ile ters orantılı değişir.

$$S_r = S_t \frac{\sigma}{4\pi R_r^2} \quad (2 . 3)$$

Denklemin üçüncü parçası Denklem (2 . 4)'te verilmiştir. Alıcı antenin elektromanyetik gücü ne kadar verimlilikle alabildiğinin ölçütü antenin efektif alanı olarak tanımlanır.

$$A_e = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \quad (2 . 4)$$

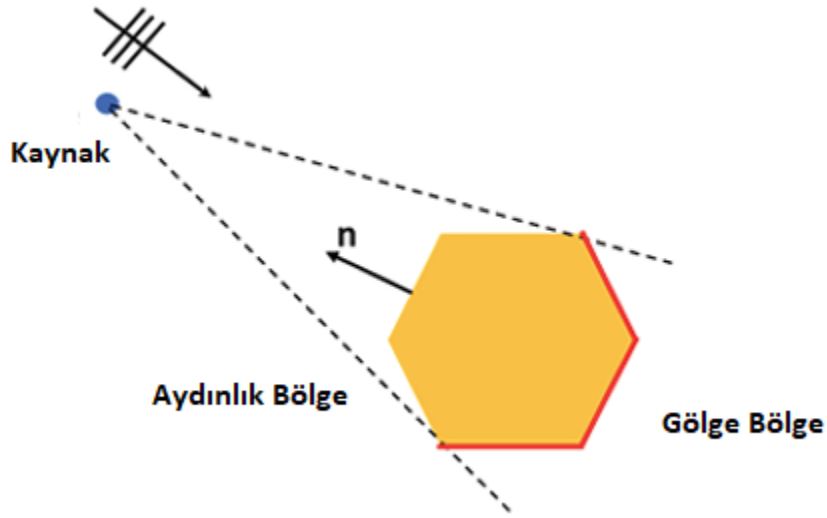
Denklem (2 . 1)'te verilen ifade bistatik radar denklemidir. Alıcı ve verici antenlerin aynı anten olması durumunda Denklem (2 . 5)'e dönüşür.

$$P_r = P_t \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (2 . 5)$$

2.1.2. Elektromanyetik Saçılma

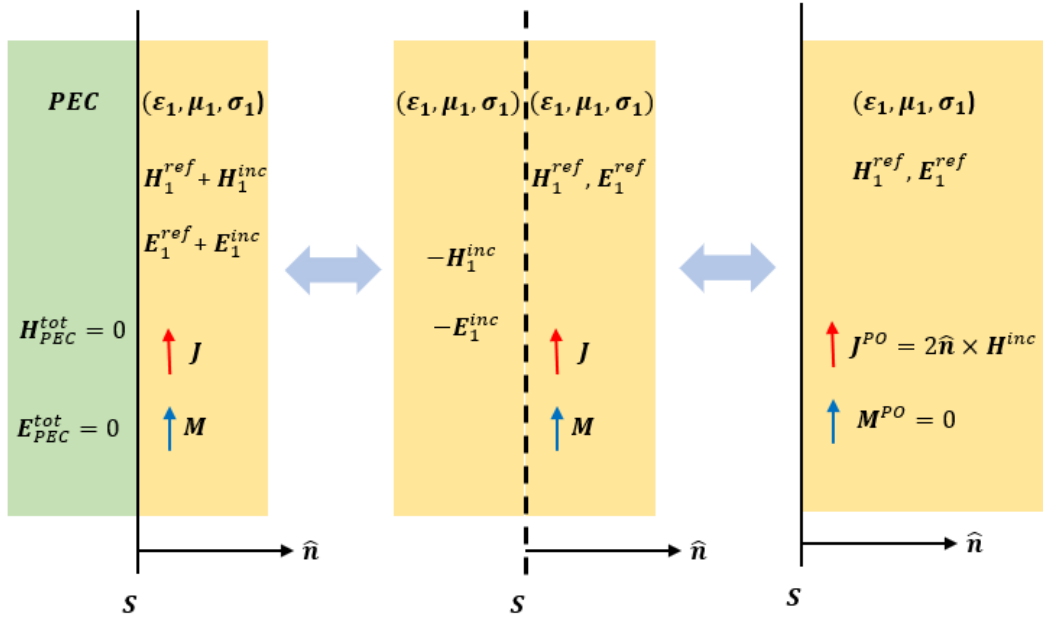
Elektromanyetik saçılma, elektromanyetik dalgaların bir ortamdan başka bir ortama geçerken yön değiştirmesi veya kırılmasıdır. Bu süreç, elektromanyetik dalganın bir ortamdan diğerine geçerken hızının değişmesi veya dalga boyunun değişmesi sonucu meydana gelir. Elektromanyetik dalgalar, farklı ortamlardaki farklı yoğunluklardan dolayı bu şekilde davranır. Örneğin, güneş ışığının atmosfere girerken yayılması ve farklı dalga boylarına sahip renklerin farklı oranlarda dağılması, elektromanyetik saçılmanın bir örneğidir. Bu süreç, gökyüzünün mavi görünmesinin nedenidir; çünkü mavi renk, diğer renklere göre daha fazla saçılır. Radarlarda hedef tespiti, radar kesit alanı analizi, TYAR görüntüsünün elde edilmesi gibi fenomenlerde elektromanyetik saçılma, en önemli etkidir. Hedef tespiti yapan bir radar sistemi temelde hedeften saçılan

elektromanyetik dalgaları alıcı anten aracılığıyla toplayarak işlem yapar. RKA değeri hedeften saçılan elektrik alanın karesi ile hedefe gönderilen elektrik alanın karesinin oranı olarak belirlenir. TYAR görüntüsü farklı açı ve frekanslarda saçılan elektromanyetik alanların analizi ile oluşturulur. Bu yüzden elektromanyetik saçılma fenomeni yapılacak çalışmalar için önem arz etmektedir. Tez boyunca elde edilen nümerik sonuçlar mükemmel elektrik iletkeni (PEC) kullanılarak elde edilmiştir. Fiziksel optik teorisinin altıgen PEC cisim için yaklaşımı Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Mükemmel Elektrik İletken İçin Fiziksel Optik Yaklaşımı

Fiziksel optik teorisi orijinal probleme eşdeğer farklı problem üretilerek, eşdeğer problemin çözülmesidir. Eşdeğer problem yaklaşımlar yapılarak çözüldüğü için orijinal problemde daha kolay elde edilir. Fiziksel optik yaklaşımı Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Eşdeğer problemde cisim mükemmel iletken olarak düşünüldüğünde cismin içindeki elektrik alan ve manyetik alan sıfırlanır. Toplam elektrik alanın teğet bileşenin yüzey üzerinde sıfır olması, manyetik akım yoğunluğunun sıfır olduğu anlamına gelir. Karşılıklılık (reciprocity) ve görüntü teorisi (image theory) kullanıldığında, mükemmel iletkenin uzunluğunun sonsuz olduğu durum için saçılan alanların teğet bileşeni, gelen alanların teğet bileşenine yüzey üzerinde eşittir [37].



Şekil 2.5 Eşdeğerlilik Prensibi ve Fiziksel Optik Yaklaşımı

Fiziksel optik yaklaşımında gelen alan ifadesi ışık gibi düşünülebilir. Şekil 2.4'te gösterilen aydınlık bölge ışımının geldiği, gölge bölge ise ışımının yapılmadığı bölgeleri gösterir. Bu yaklaşım sayesinde yüzey akım ifadesi Denklem (2 . 6)'daki hale dönüşür.

$$J_s(\mathbf{r}') = \begin{cases} 2\hat{\mathbf{n}}(\mathbf{r}') \times \mathbf{H}^i(\mathbf{r}'), & \text{aydınlık bölge} \\ 0, & \text{gölge bölge} \end{cases} \quad (2 . 6)$$

\mathbf{H}^i ifadesi gelen manyetik alan ifadesidir. Gelen elektrik alan bilgisine sahip olunduğu için saçılan elektrik alan ve radar kesit alanı bilgisine ulaşılabilir. Bu teoride önemli olan yaklaşım, cismin sonsuz büyüklükte olmasıdır. Fiziksel optik teorisinin pratikte kullanıldığı problemler, elektriksel olarak büyük cisimlerdir. Cisim boyutu sonsuz olmadığı için, fiziksel optik yaklaşımı saçılan elektrik alan ifadelerini tam dalga analizlerine göre daha düşük doğruluk seviyelerinde elde eder.

2.1.3. Radar Kesit Alanı (RKA)

Radar kesit alanı hedefin sinyali yansıtma ölçüsü ile ilgilidir. Radar yayınına maruz kalan bir hedef üzerinde akım indüklenir. Bu akımlar ikinci bir kaynak gibi davranarak tekrar yayılmaya başlar. Hedeften yayılan dalgalar radarın alıcı anteni tarafından toplanır. Radar toplanan sinyalin gücünü gönderdiği sinyalin gücüne oranlayarak hedefin yansıtma ölçütü olan radar kesit alanını hesaplar. Radar kesit alanı birçok parametreye bağlı olarak değişir. Hedefin geometrisi, çalışma frekansı, polarizasyonu, hedef malzemesi en önemli parametrelerdendir. Radar kesit alanı bilgisi askeri uygulamalarda hayati önem taşımaktadır. Bir hedefin gözlemlenebilme ihtimali radar kesit alanının büyüklüğü ile doğrudan ilişkilidir. Hedefin geometrisinde yapılan keskin kenarların ovalleştirilmesi gibi iyileştirmeler radar kesit alanının azalmasında büyük önem taşır. Son 20 yıldır pratik uygulamalarda da yer bulan ve elektromanyetik araştırma alanını yakından ilgilendiren parametre malzeme bilgisidir. Temelde sınır koşullarına dayanarak elektromanyetik dalgaların ortam değişikliği ilişkileri inceleyerek, elektromanyetik dalgaların istenilen şekilde davranması için özel malzemeler geliştirilmektedir. Meta-malzeme denilen malzemeler doğada bulunmayan, sentetik olarak tasarlanan ve askeri uygulamalarda hayati önem arz eden malzemelerdir [38]. Radar kesit alanının matematiksel çıkarımı Denklem (2 . 7)'de gösterilmiştir.

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E^s|^2}{|E^i|^2} \quad (2 . 7)$$

E^s = Yansıyan elektrik alan şiddeti (V/m)

E^i = Gönderilen elektrik alan şiddeti (V/m)

R = Hedef ile radar arası uzaklık (m)

Denklem (2 . 7)'de limit ifadesinde hedef ile radar arası uzaklık (R) verisinin sonsuza gitmesinin sebebi, radar kesit alanı ifadesinin bir uzak alan ifadesi olmasındandır. Radar kesit alanı birimi m² olarak tanımlanır ancak radar uygulamalarında logaritmik ölçekleme kullanıldığı için m² ifadesi dönüşüm yapılarak kullanılır. Denklem (2 . 8)'de logaritmik dönüşüm gösterilmiştir.

$$\sigma(dBsm) = 10 \log_{10} \frac{\sigma(m^2)}{1 m^2} \quad (2.8)$$

2.1.4. Radar Frekansları

Radarlar kullanım alanlarına ve çalışma frekans aralığına göre sınıflandırılırlar. Çizelge 2.1'de radarların frekans bantlarına göre kullanım alanlarını içeren liste verilmiştir [39].

Çizelge 2.1 Radar Frekans Bantları

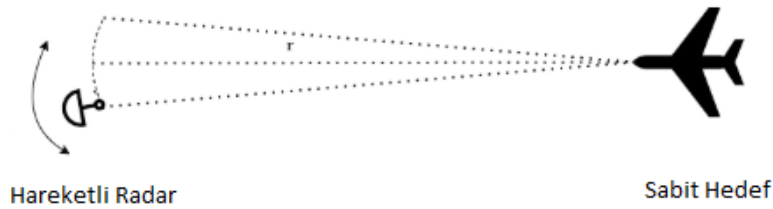
Bant	Çalışma Frekans Aralığı	Kullanım Alanı
VHF	30-300 MHz	Ufuk ötesi gözetleme radarları
UHF	300-1000 MHz	Çok uzun menzilli gözetleme radarları
L	1-2 GHz	Uzun menzilli gözetleme radarları
S	2-4 GHz	Orta menzilli gözetleme radarları, hava trafik radarları
C	4-8 GHz	Hava durumu tespit radarları
X	8-12 GHz	Kısa menzilli güdümlü füze radarları
Ku	12-18 GHz	Yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleme
K	18-27 GHz	Çok kısa menzilli haberleşme (su buharı zayıflatmasından dolayı)
Ka	27-40 GHz	Havalimanı gözetleme radarı, çok yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleme

2.2. Ters Yapay Açıklıklı Radar (TYAR)

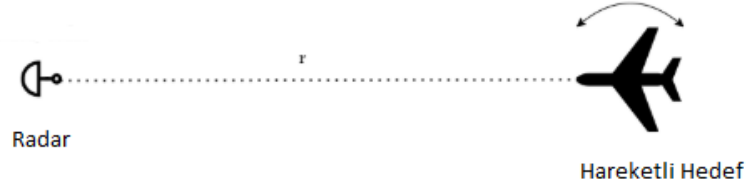
Radar sistemleri donanım ve yazılım bölümü olmak üzere iki parçaya incelenebilir. Sinyalin üretilmesi, düşük gürültülü yükselteçler kullanılarak sinyal seviyesinin yükseltilmesi, yukarı çevirici devreler ile düşük frekansların (IF) yüksek frekanslara (RF) taşınması veya aşağı çevirici devreler ile yüksek frekansların (RF) düşük frekanslara (IF)

taşınması, antenler aracılığıyla üretilen sinyallerin yayılması veya yayılan sinyallerin toplanması ve benzeri durumlar radar sistemlerinin donanım seviyesinde incelenebilir. Bu bölümdeki gelişmeler genellikle donanım teknolojisi ile doğrudan ilişkilidir. Yazılım veya işleme bölümü radar sistemleri için çok daha büyük önem arz eder. Gelişimleri sadece donanım ile değil aynı zamanda sinyal işleme gibi matematiksel problemlere bağlı olan, elde edilen elektromanyetik dalgadan bilginin çıkarıldığı bölümdür. İlkel radarlar hedef hız ve yer tespitini basit seviye sinyal bilgileri ile elde edebilirken, gelişen sinyal işleme algoritmaları ile elektronik karşı tedbir, elektronik harp gibi fenomenler literatüre eklenmiştir. Günümüz radar dünyasında, gelişen teknoloji ile radarlar düşük görünürlükte olan hedefleri tespit etmeye, hedefler de radarlara karşı geliştirdikleri karşı tedbirler ile kendilerini gizlemeye çalışmaktadır. Bu çalışmaların temel amaçları, üretilen veya toplanan sinyallerin işlenerek doğru bilginin elde edilmesidir. Bilgi işleme tekniklerinden biri de ters yapay açıklıklı radar görüntülemesidir.

Yapay açıklıklı radar ve ters yapay açıklıklı radar teknikleri hedeften saçılan farklı frekansta ve farklı açıdaki elektrik alan ifadelerini işleyerek, hedefin yüksek çözünürlüklü görüntüsünün elde edilmesidir. Yapay açıklık denmesinin sebebi, hedefin farklı açılardan ölçüm alıp işleyerek antenin tek huzme değil de geniş bir huzmeymiş gibi davranmasıdır. Bu sayede yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilir. Yapay açıklı radar (YAR) ve ters yapay açıklı radar (TYAR) arasındaki temel fark YAR tekniğinde hedefin sabit olup radarın yer değiştirerek ölçüm alınması, TYAR tekniğinde hedefin hareketli olup radarın sabit olarak ölçüm alınmasıdır. Sistemlerin çalışma yapısı Şekil 2.6 ve Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



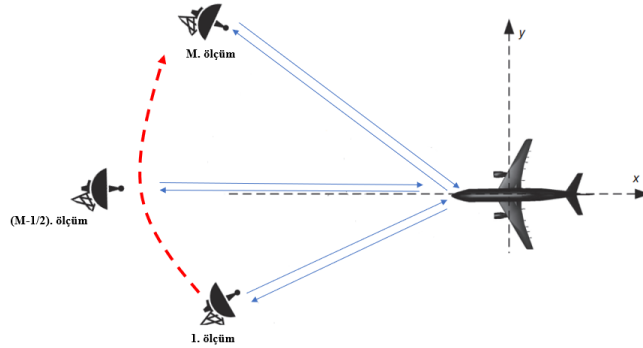
Şekil 2.6 Yapay Açıklıklı Radar



Şekil 2.7 Ters Yapay Açıklıklı Radar

2.2.1. Ters Yapay Açıklıklı Radar Görüntü Oluşumu

Ters yapay açıklıklı radar (TYAR) hareket eden hedeflerin menzil-doppler uzayında görüntülemek için kullanılan sinyal işleme tekniğidir. TYAR tekniği hedeflerin tanımlanmasında ve sınıflandırılmasında kullanılır. Hedeflerin 2 boyutlu (menzil ve yanca) görüntülerinin elde edilmesi için hedefin boyutlarına uygun olarak frekans bant genişliğine ve açı aralığına ihtiyaç vardır. Menzil eksenine gönderilen elektromanyetik dalganın yönüne paralel, yanca eksenine dalganın yönüne dik yöndedir. Şekil 2.8’de monostatik ters yapay açıklıklı radar sistemi verilmiştir.



Şekil 2.8 Monostatik TYAR sistemi

Uçak üzerinde nokta saçıcı (x_0, y_0) olduğunu ve faz merkezi olarak orijinin kabul edildiğini varsayıldığında ϕ (phi) açısından yansıyan uzak elektrik alan ifadesi Denklem (2.9)’da verilmiştir.

$$E^s(k, \phi) \cong A_0 e^{-j2\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_0} \quad (2.9)$$

A_0 , geri saçılan elektrik alanın yoğunluğunun genliği, \mathbf{k} propagasyon vektörü, \mathbf{r}_0 orijinden nokta saçıcı arasındaki yön vektörüdür. $2\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_0$ ifadesi faz terimidir. Radar anteninden yayılan elektromanyetik dalganın nokta saçıcı ile arasındaki mesafeden gelen gecikmedir. İki boyutlu TYAR görüntüsü için propagasyon vektörü Denklem (2 . 10)'da verilmiştir.

$$\mathbf{k} = \hat{\mathbf{x}} \cos \phi + \hat{\mathbf{y}} \sin \phi \quad (2 . 10)$$

Faz terimi ifadesinin açılmış hali Denklem (2 . 11)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_0 &= k(\hat{\mathbf{x}} \cos \phi + \hat{\mathbf{y}} \sin \phi) \cdot (\hat{\mathbf{x}}x_0 + \hat{\mathbf{y}}y_0) \\ &= k(\cos \phi x_0 + \sin \phi y_0) \\ &= k_x x_0 + k_y y_0 \end{aligned} \quad (2 . 11)$$

Faz terimi ifadesinin açık hali kullanıldığında saçılan elektrik alan ifadesi Denklem (2 . 12)'deki halini alır.

$$E^S(k, \phi) = A_0 e^{(-j2k \cos \phi x_0)} e^{(-j2k \sin \phi y_0)} \quad (2 . 12)$$

Denklem 2.12'de verilen saçılan elektrik ifadesinin iki boyutlu ters Fourier dönüşümünü alarak iki boyutlu TYAR görüntüsü elde edilir. Ters Fourier dönüşümü yapılmadan önce toplanan elektrik alan bilgisi pratikte sıklıkla kullanılan dar açılı dar bant tekniği ile elde edilir. Bu tekniğinin kullanılması bazı yaklaşımların kullanılmasını imkân tanır. Faz teriminde bulunan dalga sayısı yaklaşımı Denklem (2 . 13)'te verilmiştir.

$$\begin{aligned} k &\cong k_c \\ k &\cong \frac{2\pi f_c}{c} \end{aligned} \quad (2 . 13)$$

k_c merkez frekansa karşılık gelen dalga sayısı, c ışık hızı, f_c merkez frekansıdır. Benzer yaklaşımı açı ifadelerinde de yapmak mümkündür. Dar açı tekniği kullanıldığı için faz teriminde kullanılan cosinüs ve sinüs değerleri Denklem (2 . 14)'te verildiği gibi yazılır.

$$\begin{aligned} \cos\phi &\cong 1 \\ \sin\phi &\cong \phi \end{aligned} \quad (2 . 14)$$

Pratikte ölçüm yapılan açı aralıkları 5° - 6° olduğu için dar açı olarak düşünülür. Bu yaklaşımlar altında saçılan elektrik alan ifadesi Denklem (2 . 15)'deki halini alır.

$$E^s(k, \phi) = A_0 e^{(-j2kx_0)} e^{(-j2k_c \phi y_0)} \quad (2 . 15)$$

k_c merkez frekansa karşılık gelen dalga sayısı, k skaler dalga sayısıdır. Bir sonraki yapılacak işlem ters Fourier dönüşümü olacağı için Fourier dönüşümü avantajları kullanılır. Saçılan elektrik alan ifadesinin son hali Denklem (2 . 16)'da gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} E^s(k, \phi) &= A_0 e^{(-j2\pi(\frac{2f}{c})x_0)} e^{(-j2\pi(\frac{k_c \phi}{\pi})y_0)} \\ &= A_0 e^{(-j2\pi\alpha x_0)} e^{(-j2\pi\gamma y_0)} \end{aligned} \quad (2 . 16)$$

α ve γ ifadeleri sırasıyla $(\frac{2f}{c})$ ve $(\frac{k_c \phi}{\pi})$ ifadelerinin kısaltılmış halidir. İki boyutlu TYAR görüntüsü iki boyutlu saçılan elektrik alan ifadesinin iki boyutlu ters Fourier integrali alınarak elde edilir. Denklem (2 . 17)'de matematiksel çıkarım verilmiştir.

$$TYAR(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E^s(k, \phi) e^{(j2\pi\alpha x)} e^{(j2\pi\gamma y)} d_\alpha d_\gamma \quad (2 . 17)$$

TYAR görüntüsü temelde K sayıda nokta saçıcıdan yayılan elektromanyetik dalgaların uygun teknik ile birleştirilmesi ile elde edilmesidir. Denklem (2 . 17)'de verilen integral ifadesi sonsuz sayıdaki noktanın integralini alıyor olsa da pratik uygulamalarda sınırlı sayıda veri ile işlem yapılır. Verilerin sınırlı sayıda olması, sınırlı bant genişliği ve sınırlı

açı genişliği anlamına gelir. Sınırlı sayıda veri ile işlem yapıldığı için pratik uygulamalarda TYAR görüntüsü elde edilirken kullanılan dürtü fonksiyonu yerine sinc fonksiyonu kullanılır. Pratik uygulamalarda TYAR görüntüsü elde edilirken kullanılan formül Denklem (2 . 18)'de verilmiştir.

$$TYAR(x, y) = \sum_{i=1}^K A_i \text{sinc} \left(\frac{2B}{c} (x - x_i) \right) \text{sinc} \left(\frac{2f_c}{c} \Omega (y - y_i) \right) \quad (2 . 18)$$

B sınırlı bant aralığını, Ω açı genişliğini, f_c merkez frekansı, c ışık hızını ifade eder. TYAR görüntüsünün elde edilmesinin amacı hedeflerin yüksek çözünürlükte görüntülenmesidir. TYAR görüntüsü kalitesi farklı parametrelere bağlı olarak değişiklik gösterir. Elde edilen iki boyutlu TYAR görüntüsünün menzil ve yanca çözünürlüğü Denklem (2 . 19)'da verilmiştir.

$$\Delta x = \frac{c}{2B}$$

$$\Delta y = \frac{c}{2f_c \Omega} = \frac{\lambda_c}{2\Omega} \quad (2 . 19)$$

λ_c ifadesi merkez frekanstaki dalga boyudur. Çözünürlüğün yüksek olması, hedefin yüksek kalitede görüntülenmesini sağlar. Çalışma frekansının ve açı genişliğinin artmasıyla elde edilen görüntülerin yanca çözünürlüğü yükselmektedir. Daha geniş bant genişliği ile menzil çözünürlüğü artmaktadır. TYAR görüntüsü oluşturulurken önemli olan diğer parametreler, görüntü penceresinin menzil ve yanca uzunluklarıdır. Menzil ve yanca uzunlukları Denklem (2 . 20)'de verilmiştir.

$$X_{max} = \frac{N_x c}{2B}$$

$$Y_{max} = \frac{N_y \lambda_c}{2\Omega} \quad (2 . 20)$$

N_x terimi frekans bant genişliği değerinin örnekleme sayısıdır. N_y terimi açı genişliği değerinin örnekleme sayısıdır. Örnek sayısının artmasıyla, menzil ve yanca uzunluklarının arttığı ve daha geniş alanın görüntülenebilir. Pratikte TYAR görüntü elde etme süresi 4 adımda incelenebilir:

1. Adım: TYAR görüntü çıkarılması planlanan hedefin boyutlarının belirlenmesi gerekmektedir. Hedef boyutlarına göre TYAR pençesi için menzil ve yanca boyutları belirlenir. Pencere boyutları belirlendikten sonra, uygulama alanına göre çözünürlük değerleri belirlenir. Çözünürlüğün belirlenmesi ölçüm sayılarını (N_x, N_y) belirler.

2. Adım: TYAR görüntü penceresi için önemli parametreler belirlendikten sonra ölçüm için açı çözünürlüğü ve frekans çözünürlüğü belirlenir. Açı ve frekans çözünürlüğü Denklem (2 . 21)'de verilmiştir.

$$\Delta\phi = \frac{\Omega}{N_y} = \frac{\lambda_c}{2Y_{max}}$$

$$\Delta f = \frac{B}{N_x} = \frac{c}{2X_{max}} \quad (2 . 21)$$

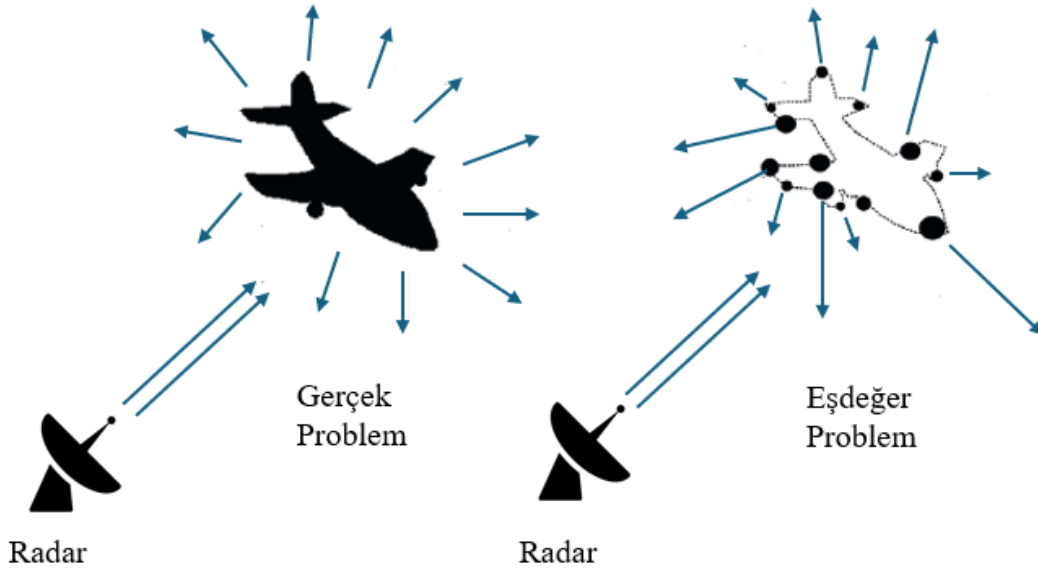
3. Adım: 2. adımda elde edilen açı ve frekans çözünürlüğü ifadeleri her ölçüm adımında değiştirilecek olan açı ve frekans adım sayılarının farkıdır. Hesaplanan farklı açı ve farklı frekans sayısı kadar saçılan elektromanyetik dalga ifadesi toplanır. Toplanan elektromanyetik dalga ifadeleri Denklem (2 . 22)'de gösterilen matris formatında yazılır.

$$E^s(f, \phi) = \begin{bmatrix} E^s(f_1, \phi_1) & \cdots & E^s(f_{N_x}, \phi_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ E^s(f_1, \phi_{N_y}) & \cdots & E^s(f_{N_x}, \phi_{N_y}) \end{bmatrix}_{N_x \times N_y} \quad (2 . 22)$$

4. Adım: Ters yapay açıklıklı radar görüntüsü, Denklem (2 . 22)'de verilen saçılan elektrik alan matrisinin ($E^s(f, \phi)$) iki boyutlu ters Fourier dönüşümü alınarak elde edilir.

2.2.2. Saçılma Merkezi Modeli

Radar görüntüleme sağılma merkezi kavramı, özellikle radar kesit alanı analizi ve ters yapay açıklıklı radar üzerine çalışma yapılırken çeşitli avantajlar sağlar. Radar ile bir hedef aydınlatıldığında, hedefin üzerinde bulunan bazı bölümlerden hedefin diğer bölümlerine göre daha fazla miktarda enerji saçılarak radarın alıcı anteninde toplanır. Enerjilerin yoğun olarak toplandığı bölümler saçılma merkezi olarak adlandırılır. Sağılma merkezi modeli kullanımı TYAR görüntülerinin daha seyreltilmiş hallerinin elde edilmesini sağlar. Bu sayede kompleks geometriden saçılan elektromanyetik dalgalar, nokta kaynak kümesinden saçılıyormuş gibi modellenenebilir. Gerçek problem ve saçılma merkezi modelinin kullanılması için üretilen eşdeğer problem Şekil 2.9’da gösterilmiştir.



Şekil 2.9 Sağılma Merkez Modeli için Gerçek ve Eşdeğer Problem

Hedefin üzerinde oluşan yüzey akımları bazı bölgelerde yapıcı etkiyle genlikleri artar ve bu bölgelerden daha yüksek güçte yayılımlar olur. Bu bölgelere saçılma merkezleri denir. Genellikle keskin kenarlar, hava alıkları, pervaneler vb. köşe yansıtıcılarına benzerlik gösteren bölgeler saçılma merkezlerinin yoğun olduğu bölümlerdir. Hedefin bazı bölgelerinde ise yüzey akımları yıkıcı etkiyle birbirlerini sönmümlendirirler ve bu bölgelerden daha düşük güçte yayılımlar olur. Bu bölgelere gölge bölge denir.

Saçılma merkez modeli uygulamalarında, TYAR görüntülerinin elde edilişi Denklem (2 . 23)'te gösterilmiştir.

$$TYAR(x, y) \cong \sum_{i=1}^N A_n h(x - x_n, y - y_n) \quad (2 . 23)$$

Bu denklemde bulunan A_n n. saçılma merkeziden saçılan kompleks genliği, $h(x, y)$ nokta yayılma fonksiyonunu ifade eder. Nokta yayılma fonksiyonu (Point spread function-PSF), nokta kaynaktan saçılan elektrik alanın sistem tepkisidir. Diğer bir deyişle TYAR görüntüsünde nokta kaynağın nasıl görüldüğünün bilgisidir. Nokta yayılma fonksiyonu Denklem (2 . 24)'te verilmiştir.

$$h(x, y) = \left(\exp(j2k_{xc}x) \frac{BW_{k_x}}{\pi} \text{sinc} \left(\frac{BW_{k_x}}{\pi} x \right) \right) \left(\exp(j2k_{yc}y) \frac{BW_{k_y}}{\pi} \text{sinc} \left(\frac{BW_{k_y}}{\pi} y \right) \right) \quad (2 . 24)$$

Denklemde BW_{k_x} ve BW_{k_y} değerleri k_x ve k_y 'deki sınırlı bant genişliğini, k_{xc} ve k_{yc} değerleri x ve y doğrultusundaki merkez uzaysal frekansları belirler [40].

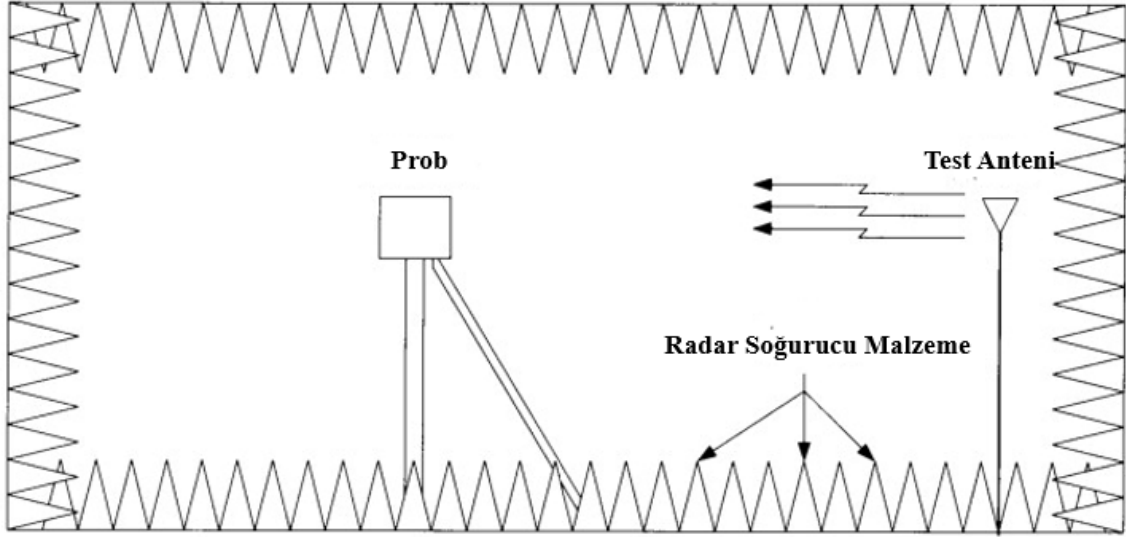
Saçılma merkez modeli tanımlandıktan sonra saçılma merkez bilgileri TYAR görüntüsü ve nokta yayılma fonksiyonu kullanılarak elde edilebilir. Saçılma merkezlerini elde etmek için birçok yöntem kullanılabilir. CLEAN algoritması da bu yöntemlerden biridir. CLEAN algoritması, radyo astronomide oluşturulan görüntülerde dekonvolüsyon yapmak için ilk kez Jan Högbom tarafından tanıtıldı [41]. Algoritma aynı zamanda saçılma merkezlerinin çıkarılmasında da kullanılmıştır. CLEAN algoritması görüntüdeki en yüksek genlikteki noktayı sırayla seçer ve bu noktaların saçılma merkezi olduğunu varsayarak görüntüden bu noktadaki nokta saçılma fonksiyonunu görüntüden çıkarır. CLEAN algoritması sağlam ve iteratif olarak çalışan bir prosedürdür. Prosedürün temel işleyişi Denklem (2 . 25)'te gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} 2 \text{ Boyutlu} \\ \text{Görüntü} \end{bmatrix}^n = \begin{bmatrix} 2 \text{ Boyutlu} \\ \text{Görüntü} \end{bmatrix}^{n-1} - A_n h(x - x_n, y - y_n) \quad (2.25)$$

Algoritma, görüntüdeki maksimum güç eşik değerine gelene kadar iteratif olarak çalışmaya devam eder.

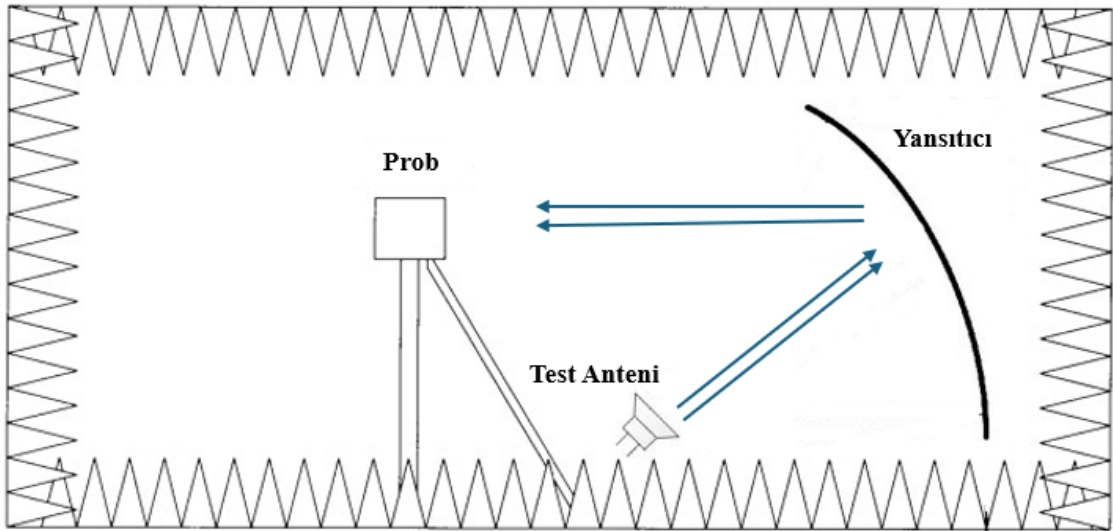
2.3. Yakın Alan Ölçüm Temelleri

Yakın alan ölçüm metotlarının tarihi dört döneme ayrılır. Bunlar, prob doğrulaması yapılmayan dönem (1950 - 1961), ilk prob doğrulama teorisinin yapıldığı dönem (1961-1975), prob doğrulama teorisinin pratik uygulamalarda kullanıldığı dönem (1965-1975) ve dünya genelinde 50 veya daha fazla sayıda yakın alan tarama sisteminin üretildiği (1975-1985) teknoloji transfer dönemidir. İlk dönemde yapılan çalışmalar elde edilen yakın alan verilerinin uzak alan verileri ile kıyaslanmasına dayanır. İlk yakın alan ölçümü çalışması, Barrett ve Barnes tarafından Cambridge Araştırma Merkezinde tasarlanan otomatik anten dalga çizim sistemidir. Ölçülen yakın alan verilerinden uzak alan desenleri hesaplanmaya çalışılmasa da antenlerin yakın alanındaki faz ve genlik değişimlerinin tam boyutlu haritaları elde edildi [42]. 1960 yılında Clayton, Hollis ve Teegardin elektriksel uzunluğu 14 dalga boyu olan reflektör antenin yakın alan genlik ve faz ifadelerini kullanarak uzak alan ifadelerini hesapladılar. Uzak alan ölçüm sonuçları ile yaptıkları çalışmanın sonuçları kıyaslandığında ana huzme ve ilk yan huzmelerinde yakın sonuçlar elde ettiği görülmüştür [43]. 1961 yılında Brown ve Jull tarafından silindirik dalga açılım yönteminde prob doğrulama problemi için yöntem geliştirilmiştir [44]. 1963 yılında prob doğrulama problemi için Kerns tarafından düzlem dalga açılım yönteminde çalışan 3 boyutlu tam çözüm geliştirilmiştir [45]. Prob doğrulaması yapılmış ilk yakın alan ölçümü 1965 yılında National Bureau of Standards enstitüsünde yapılmıştır [46]. Yakın alan ölçümleri alanında yapılan bu çalışmalar sayesinde günümüzde, farklı tarama tipleri için tam prob doğrulaması yapılmış alt yapılar geliştirilmiştir. Yakın alan ölçümün temelinde birbirine yakın olan iki anten bağışıklığının matematiksel olarak modellenmesi yatar. Anten ölçümlerinde genel amaç uzak alan parametrelerini elde etmektir. Bundan dolayı, laboratuvarların uzak alanı kapsayacak şekilde tasarımları yapılır. Şekil 2.10'da anten ölçümlerinin yapıldığı yankısız oda gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Yankısız Oda

Test anteni ile prob arasındaki uzaklık, ölçümlerin yakın veya uzak alanda olduğunu belirler. Çalışılan frekans ve anten boyutlarına göre uzak alan için gerekli olan uzaklık birkaç santimden yüzlerce metreye kadar değişkenlik göstermektedir. Laboratuvar boyutları uzak alan ölçümleri için kısıtlar yaratmaktadır. Laboratuvar boyutlarını arttırmak için Şekil 2.11’de gösterilen kompakt uzunluklu yankısız odalar kullanılır.



Şekil 2.11 Kompakt Uzunluklu Yankısız Oda

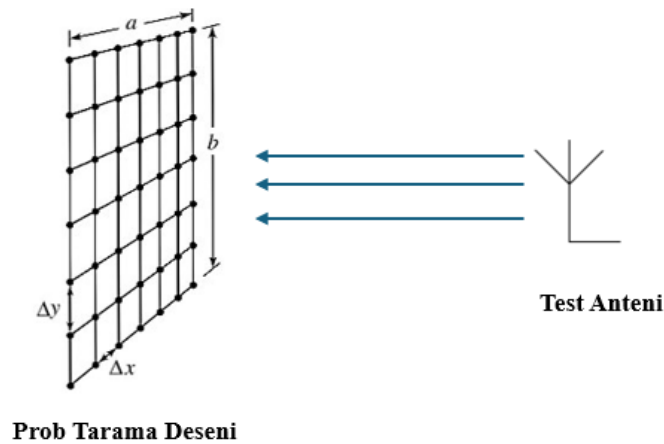
Kompakt uzunluklu yankısız odalar laboratuvarın boyunu fiziksel olarak arttırmadan, elektromanyetik dalganın ilerlediği yolu yansıtıcılar kullanarak arttırmayı hedefler. Bu sayede uzak alan için gerekli olan mesafeler elde edilir. Bu yankısız oda türünde dikkat edilmesi gereken nokta, yansıtıcının tasarımı istenmeye saçılmalar üretebileceği için anten ölçüm sonuçlarını etkileyebilir.

2.3.1. Yakın Alan Ölçüm Türleri

Laboratuvar ölçümlerinde önemli olan diğer parametre ölçüm türüdür. Her bir yakın alan ölçüm türü için farklı fiziksel, mekanik, elektriksel çözüm yaklaşımları vardır. Tüm tarama yöntemlerinde, alıcı ve verici RF sistemi, otomatik veri toplama sistemi, her sisteme uygun prob kalibrasyon sistemi vardır. Ölçüm türleri koordinat sistemleri ile paralellik göstermektedir. Literatürde altı adet ölçüm türü vardır, ancak pratik uygulamalarda genellikle üç adet ölçüm türü kullanılır. Bu ölçüm türü düzlemsel tarama, silindirik tarama ve küresel taramadır.

2.3.1.1. Düzlemsel Tarama

Düzlemsel yakın alan taraması, prob doğrulaması yapılmış teorinin ilk geliştirildiği tarama türüdür. Bu tarama yöntemi genellikle yüksek yönlü antenlerin (>15dBi) ölçümleri için idealdir. Prob, test anteninin önünde düzlemsel bir yüzeyde taranır. Ölçüm taraması, x ve y düzgün aralıklarla dikdörtgen şeklindedir. Tarama genellikle x ve y yönünde adımlar şeklinde gerçekleştirilir. Düzlemsel yakın alan tarama sistemi Şekil 2.12’de gösterilmiştir.



Şekil 2.12 Düzlemsel Yakın Alan Tarama Sistemi

Test anteninden yayılan elektrik alan ifadesi Denklem (2 . 26)'da verildiği gibi açılabilir.

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{a_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{t}_0(\hat{\mathbf{k}}) \exp(-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \frac{dk_x dk_y}{\gamma k} \quad (2 . 26)$$

a_0 terimi, test antenine gelen elektromanyetik dalganın kompleks genlik ifadesidir. $\mathbf{t}_0(\hat{\mathbf{k}})$ terimi $\hat{\mathbf{k}}$ birim vektörün yönündeki iletim fonksiyonudur. İletim fonksiyonu, tüm yönlerdeki elektrik alanın genlik, faz ve kompleks polarizasyonunun karakterizasyon bilgisidir. $\mathbf{t}_0(\hat{\mathbf{k}})$ teriminin elde edilişi Denklem 2.27'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \mathbf{t}_0(\hat{\mathbf{k}}) &= \frac{1}{\gamma} \mathbf{k} \times [\mathbf{t}_t(\hat{\mathbf{k}}) \times \hat{\mathbf{z}}] \\ \mathbf{t}_t(\hat{\mathbf{k}}) &= \frac{\gamma k}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\mathbf{E}(\mathbf{r})}{a_0} \exp(j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) dx dy \\ \gamma = k_z &= \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} \end{aligned} \quad (2 . 27)$$

k_x, k_y terimleri x ve y yönündeki propagasyon vektörünün bileşenleridir. γ teriminin gerçek bileşeni 0 ise, düzlem dalganın sönmümlenen dalga (*evanescent*) olduğu belirlenir. r teriminin büyük olduğu durumda, elektrik alan ifadesinin asimptotik yaklaşımı Denklem (2 . 28)'de verilmiştir.

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) \cong a_0 \mathbf{t}_0(\hat{\mathbf{r}}) \exp(-jkr) \quad (2 . 28)$$

Yakın alan veya uzak alan anten ölçümlerinde temel amaç anten kazanç örüntüsünün elde edilmesidir. Anten kazanç örüntüsü Denklem (2 . 29)'da verilmiştir.

$$G(\hat{r}) = \frac{4\pi}{1 - |r_t|^2} |\mathbf{t}_0(\hat{r})|^2 \quad (2.29)$$

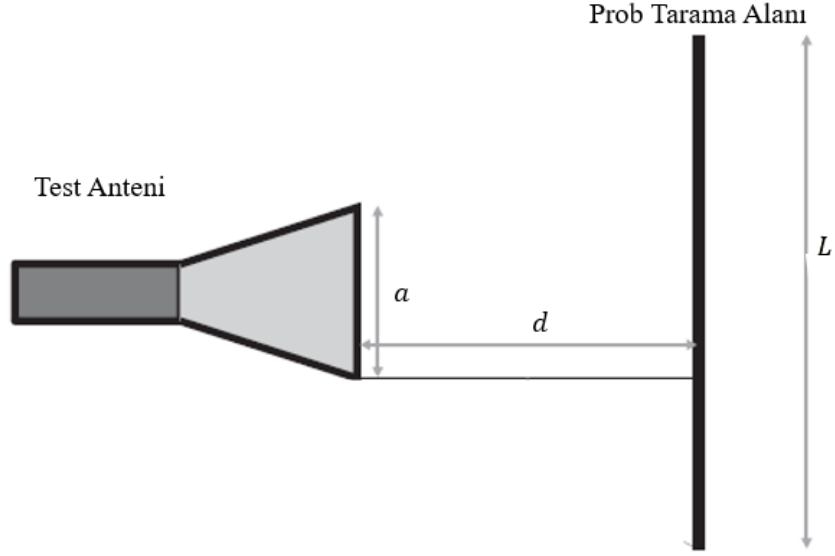
Yakın elektrik alan ifadesi elde edilirken dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri örnekleme kriteridir. Örnekleme kriteri, ölçümün alınması gereken iki ölçüm noktası arasındaki farkıdır. Düzlemsel tarama sistemi için ölçüm kriteri Denklem (2.30)'da verilmiştir.

$$\Delta x, \Delta y \leq \frac{\lambda}{2} \quad (2.30)$$

Δx , Δy ifadeleri düzlemsel taramada probun x ve y yönündeki adımları arasındaki uzunluğudur. Adımlar arası uzunluk $\frac{\lambda}{2}$ 'den küçük olduğu durumlarda ölçümlerde hatalar gözlemlenir. Ölçümlerde meydana gelen hatanın sebebi *aliasing* (örtüşme) etkisidir. Ölçümlerde dikkat edilmesi gereken diğer önemli fenomen kestirim hatasıdır. Yakın alan ölçüm için kullanılan teoride tarama alanının sonsuz uzunlukta olduğu varsayılmıştır. Ancak pratik uygulamalarda bu mümkün olmadığı için tarama alanı sınırlıdır, bu da kestirim hatalarının oluşmasına sebep olur. Kestirim hatası anten kazanç örüntüsünde hata meydana getirir. Ölçüm sistemindeki parametrelerin doğru hesaplanan anten kazanç örüntüsüne etkisi Denklem (2.31)'de verilmiştir.

$$\theta_v = \tan^{-1} \left(\frac{L - a}{2d} \right) \quad (2.31)$$

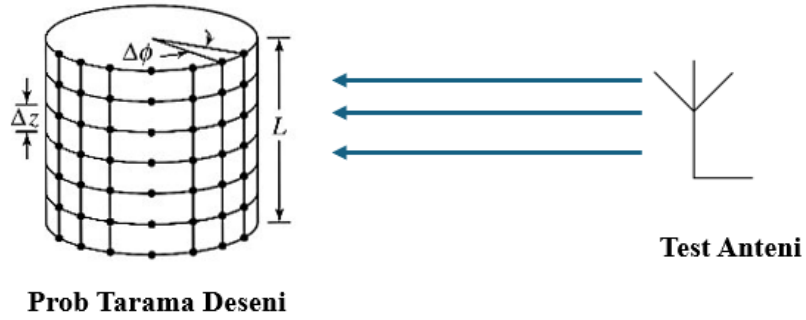
θ_v terimi doğru hesaplanan anten kazanç açısını, L terimi tarama bölgesinin uzunluğunu, a terimi antenin çapını, d terimi anten ile tarama bölgesi arasındaki mesafeyi ifade eder [47]. Denklem (2.31)'in görselleştirilmesi Şekil 2.13'te verilmiştir.



Şekil 2.13 θ_v Doğruluk Açısı için Düzlemsel Tarama Sistemi

2.3.1.2. Silindirik Tarama

Silindirik yakın alan tarama sistemleri genellikle ışın huzmeli (fan-beam) antenlerin ölçümü için uygundur. Işın huzmeli antenin huzmesi, bir ekseninde çok dar diğer ekseninde çok geniştir [48]. Silindirik yakın alan tarama sistemi Şekil 2.14’te gösterilmiştir.



Şekil 2.14 Silindirik Yakın Alan Tarama Sistemi

Silindirik yakın alan tarama sistemi için ölçüm kriteri Denklem (2 . 32)’de verilmiştir.

$$\Delta\phi \leq \frac{2\pi}{2N + 1}$$

$$\Delta z \leq \frac{\lambda}{2} \quad (2.32)$$

$$N \cong k\rho_0$$

ρ_0 ifadesi test antenini çevreleyen minimum silindirin yarıçapı, k ifadesi dalga sayısıdır. Δz ve $\Delta\phi$ ifadeleri, sırasıyla, probun z ve ϕ yönündeki minimum prob adımlarıdır. Tarama bölgesinde kestirim hatasından kaynaklanan doğru anten huzme açısı Denklem (2.33)'te verilmiştir.

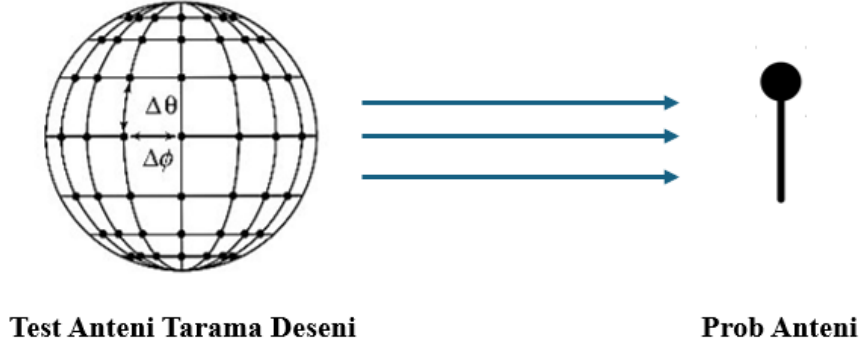
$$A_v = \phi_m - \sin^{-1}\left(\frac{\rho_0}{d}\right)$$

$$E_v = \sin^{-1}\left(\frac{L_y - a_y}{2d}\right) \quad (2.33)$$

A_v ve E_v ifadeleri, sırasıyla, yanca açısı doğruluğu ve yükseliş açısı doğruluğudur. ϕ_m ifadesi tarama açısı, d ifadesi prob ile tarama yapılan silindirik yüzeyin yarıçapıdır. Yükseliş açısı doğruluğu düzlemsel tarama sistemi ile benzerlik gösterir. L_y ifadesi prob taramasının yükseliş uzunluğunu, a_y ifadesi antenin yükseliş vektöründeki uzunluğunu belirtir.

2.3.1.3. Küresel Tarama

Küresel yakın alan tarama sistemleri diğer sistemlerden farklı olarak prob düzeneğinin sabit test anteninin küresel olarak tarama yaptığı sistemlerdir. Küresel tarama sistemleri anten ölçümlerinde en çok kullanılan sistemdir. Test anteni ϕ ve θ eksenlerinde hareket ettirilerek prob aracılığıyla ölçüm alınır. Küresel yakın alan tarama sistemi Şekil 2.15'te gösterilmiştir.



Şekil 2.15 Küresel Yakın Alan Tarama Sistemi

Küresel yakın alan tarama sistemi için ölçüm kriteri Denklem (2 . 34)'te verilmiştir.

$$\Delta\phi, \Delta\theta \leq \frac{2\pi}{2N + 1}$$

$$N \cong kr_0 \quad (2 . 34)$$

r_0 ifadesi test antenini kapsayan en küçük kürenin yarıçapıdır, k ifadesi dalga sayısıdır. Örnekleme için ve alising etkilerini ortadan kaldırmak için N değeri genellikle $kr_0 + 10$ seçilerek güvenli bölgede kalınır. $\nabla\phi, \nabla\theta$ ifadeleri sırasıyla yanca (azimut) ve yükseliş (elevasyon) tarama açıları için çözünürlük değerleridir. Tarama bölgesinde kestirim hatasından kaynaklanan doğru anten huzme açısı Denklem (2 . 35)'te verilmiştir.

$$\theta_v = \theta_m - \sin^{-1}\left(\frac{r_0}{d}\right) \quad (2 . 35)$$

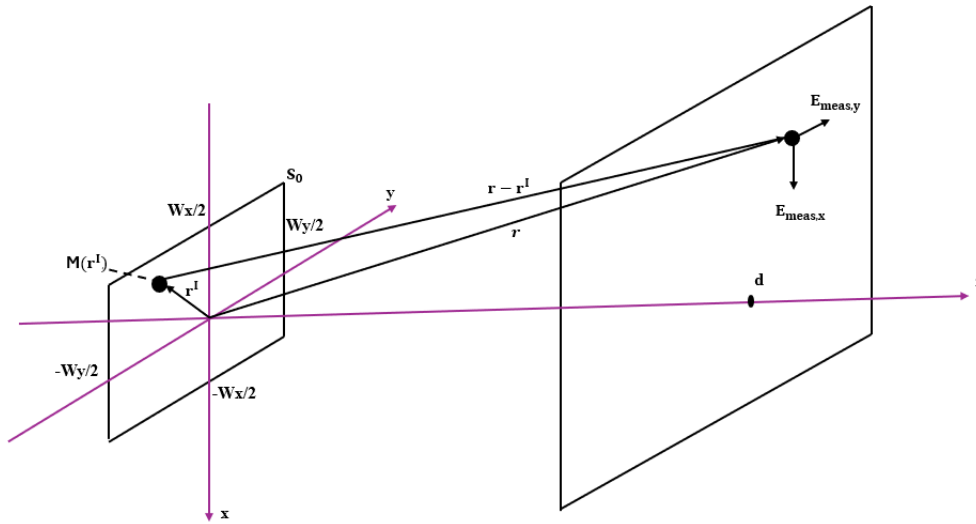
Pratik uygulamalarda test anteninin tam küre tarama yapması çok zordur çünkü test anteni, mekanik bir yapıya yerleştirildiği için cihazın hem azimut ekseninde 360 derece hem elevasyon ekseninde 360 derece dönmesi anlamına gelir. Bu kısıtlardan dolayı, eksik yakın alan bilgisi elde edilir. θ_m ifadesi ölçüm yapılabilen açığı, d ifadesi prob ile anten arası uzaklığı tanımlar. Ölçüm açısındaki kısıtlamalar, elde edilen anten huzmesi hesabını etkiler [49].

2.4. Geleneksel Yakın Alandan Uzak Alana Dönüşüm Yaklaşımları

Yakın alan ölçümleri anten testlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Yankısız odada yapılan kontrollü testler sayesinde doğrulanabilir ölçümler alınmakta ve anten kazanç örüntüleri elde edilebilmektedir. Bu alanda yapılan ilk çalışmalar modal analiz tabanlı çalışmalardır. Ölçülen yakın alan ifadeleri düzlemsel, silindirik ve küresel dalga fonksiyonları cinsinden ifade edilerek dalga açılımları için katsayılar elde edilebilir. Elde edilen katsayılar ile uzak alan ifadelerine ve anten kazanç bilgisine erişmek mümkündür [50]. Bu başlıkta düzlemsel ve küresel dalga fonksiyonlarının açılımları incelenmiştir.

2.4.1. Düzlem Dalga Açılımı

Düzlem dalga açılımı için elektrik alanın E_x ve E_y bileşenleri orijinden d uzaklığında ölçülmüştür. Düzlemsel yakın alan ölçümü Şekil 2.16'da gösterilmiştir.



Şekil 2.16 Düzlemsel Yakın Alan Ölçüm

Kaynakların $z < d$ arkasından geldiği varsayıldığında, ölçüm düzleminde (d uzaklık) $E_{meas,x}$ ve $E_{meas,y}$ bileşenleri ölçülmüştür. Bir düzlemdeki eşdeğer manyetik akımlar, elektrik alanların teğet bileşenleri ile ilişki olduğundan, ölçüm düzleminde eş değer manyetik akımlar tanımlanabilir. Manyetik akımlar Denklem (2 . 36)'te tanımlanmıştır.

$$\mathbf{M} = \mathbf{E} \times \mathbf{n} \quad (2 . 36)$$

\mathbf{n} terimi ölçüm düzleminin normal vektörüdür. d noktasındaki manyetik akımın vektörleri Denklem (2 . 37)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} M_y &= -E_{meas,x} \\ M_x &= E_{meas,y} \end{aligned} \quad (2 . 37)$$

Manyetik akım vektörlerini kullanarak elde edilen uzak elektrik alan ifadesi Denklem (2 . 38)'de verilmiştir.

$$E_{far,x}(r, \theta, \phi) = jk_0 \cos \theta \frac{e^{-jk_0 r}}{4\pi r} \iint_{-\infty}^{\infty} M_y(x', y', z' = d) e^{j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}'} d_x' d_y' \quad (2 . 38)$$

$\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}'$ ifadesi Denklem (2 . 39)'da verilmiştir.

$$\begin{aligned} \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}' &= k_0 \sin \theta \cos \phi x' + k_0 \sin \theta \sin \phi y' + k_0 \cos \theta z' \\ &= k_x x' + k_y y' + k_z z' \end{aligned} \quad (2 . 39)$$

k_0 ifadesi boş uzay dalga sayısıdır. $M_x(x', y', z' = d)$ ifadesinin iki boyutlu Fourier dönüşümü alındığında $\widetilde{M}_x(k_x, k_y, z' = d)$ ifadesi elde edilir. İfadenin x ve y bileşenleri Denklem (2 . 40)'da verilmiştir.

$$\begin{aligned} \widetilde{M}_x(k_x, k_y, z' = d) &= \iint_{-\infty}^{\infty} M_x(x', y', z' = d) e^{j(k_x x' + k_y y')} d_x' d_y' \\ \widetilde{M}_y(k_x, k_y, z' = d) &= \iint_{-\infty}^{\infty} M_y(x', y', z' = d) e^{j(k_x x' + k_y y')} d_x' d_y' \end{aligned} \quad (2 . 40)$$

\widetilde{m}_x ve \widetilde{m}_y ifadeleri kaynağın üzerindeki manyetik eşdeğer akımların Fourier dönüşümü olarak tanımlansın. Ölçülen elektrik alanlar ile manyetik eşdeğer akımlar arasındaki uzaysal ilişki Denklem (2 . 41)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}\widetilde{m}_y(k_x, k_y, z' = 0) &= \widetilde{M}_y(k_x, k_y, z' = d) e^{j\sqrt{k_0^2 - k_x^2 - k_y^2}d} \\ \widetilde{m}_x(k_x, k_y, z' = 0) &= \widetilde{M}_x(k_x, k_y, z' = d) e^{j\sqrt{k_0^2 - k_x^2 - k_y^2}d}\end{aligned}\quad (2 . 41)$$

\widetilde{M}_x ve \widetilde{M}_y ifadeleri uzaysal bölgede \widetilde{m}_x ve \widetilde{m}_y ifadelerine dönüşür. Denklem (2 . 40) kullanılarak uzak elektrik alan ifadesi tekrar yazıldığında Denklem (2 . 42) elde edilir.

$$\begin{aligned}E_{far,x}(r, \theta, \phi) &= C \cos\theta \widetilde{m}_y(k_x, k_y, z' = d) \\ E_{far,y}(r, \theta, \phi) &= C \cos\theta \widetilde{m}_x(k_x, k_y, z' = d)\end{aligned}\quad (2 . 42)$$

C ifadesi k_0 'a bağlı olan bir katsayıdır. Ancak bu yaklaşımda doğal bir sorun oluşmaktadır. Denklem (2 . 40)'de integralin sınırları sonsuzdur, ancak ölçüm düzleminin sonsuz değil sonlu bir sayıdır. Bu yüzden Fourier dönüşümü alınan ifadede sonuçlar kesin değil yaklaşık olacaktır. Bu sınırlar altında E_θ ve E_ϕ ifadesini elde etmek için elektrik alanın z bileşenine de ihtiyaç vardır. Kaynak olmayan bölge için ıraksama formülü Denklem (2 . 43)'de verilmiştir.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0 \quad (2 . 43)$$

$E_z(x', y')$ ifadesinin Fourier dönüşümü Denklem (2 . 44)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}\widetilde{E}_z(k_x, k_y) &= -\frac{k_x \widetilde{E}_x(k_x, k_y) + k_y \widetilde{E}_y(k_x, k_y)}{k_z} \\ k_z &= \sqrt{k_0^2 - k_x^2 - k_y^2}\end{aligned}\quad (2 . 44)$$

Iraksama denklemi kullanıldığında elektrik alanının z bileşenini, x ve y bileşenleri cinsinden elde edildiği Denklem (2 . 44)'de gösterilmiştir. Denklem (2 . 44) kullanılarak, E_θ ve E_ϕ ifadeleri Denklem (2 . 45)'te verilmiştir [6].

$$E_\theta = E_{far,x} \cos\theta \cos\phi + E_{far,y} \cos\theta \sin\phi - E_{far,z} \sin\theta$$

$$E_\phi = -E_{far,x} \sin\phi + E_{far,y} \cos\theta$$
(2 . 45)

2.4.2. Küresel Dalga Açılımı

Küresel dalga açılımı, diğer dalga açılımlarda olduğu gibi vektör dalga denkleminin bir çözümüdür. Bu bölümde küresel dalgaları temsil eden fonksiyonların açılımları incelenecektir. Temel işleyiş, yakın elektrik alan dalgalarını bilinen küresel dalga fonksiyonlarının katları olarak hesaplayıp sonrasında elde edilen katsayılar ile uzak elektrik alan ifadelerine geçmektir. Normalize edilmiş vektör dalga denklemini sağlayan üretici fonksiyon Denklem (2 . 46)'da verilmiştir.

$$F_{mn}^{(c)}(r, \theta, \phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sqrt{n(n+1)}} \left(-\frac{m}{|m|}\right)^m z_n^{(c)}(kr) \bar{P}_n^{|m|}(\cos\theta) e^{-jm\phi}$$
(2 . 46)

$\bar{P}_n^{|m|}$ ifadesi normalize edilmiş Legendre polinomudur. $z_n^{(c)}$ ifadesi Bessel fonksiyonu, c ifadesi Bessel fonksiyonun türünü belirtir. $c = 3$ gelen dalgaları, $c = 4$ yayılan dalgaların ifadesinde kullanılır. m ve n ifadeleri sırasıyla Legendre polinomunun derece ve sırasını tanımlar.

Dalga denkleminin çözümü olarak tanımlanan üretici fonksiyon ifadesi ($F_{mn}^{(c)}$) tanımlanmıştır. Üretici fonksiyon ifadesini, elektrik alan ($\mathbf{M}_{mn}^{(c)}$) ve manyetik alan ($\mathbf{N}_{mn}^{(c)}$) ifadelerini kullanarak tekrar yazıldığında Denklem (2 . 47) ve Denklem (2 . 48) elde edilir.

$$\mathbf{M}_{mn}^{(c)}(r, \theta, \phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sqrt{n(n+1)}} \left(-\frac{m}{|m|}\right)^m$$

$$\left(z_n^{(c)}(kr) \frac{(-j)m \bar{P}_n^{|m|}(\cos\theta)}{\sin\theta} e^{-jm\phi} \hat{\boldsymbol{\theta}} - z_n^{(c)}(kr) \frac{d\bar{P}_n^{|m|}(\cos\theta)}{d\theta} e^{-jm\phi} \hat{\boldsymbol{\phi}} \right) \quad (2.47)$$

$$\mathbf{N}_{mn}^{(c)}(r, \theta, \phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sqrt{n(n+1)}} \left(-\frac{m}{|m|}\right)^m$$

$$\frac{n(n+1)}{kr} z_n^{(c)}(kr) \bar{P}_n^{|m|}(\cos\theta) e^{im\phi} \hat{\boldsymbol{r}} + \frac{1}{kr} \frac{d}{d(kr)} \left(kr z_n^{(c)}(kr) \right)$$

$$\frac{d\bar{P}_n^{|m|}(\cos\theta)}{d\theta} e^{-jm\phi} \hat{\boldsymbol{\theta}} + \frac{1}{kr} \frac{d}{d(kr)} \left(kr z_n^{(c)}(kr) \right) \frac{(-j)m \bar{P}_n^{|m|}(\cos\theta)}{\sin\theta} e^{-jm\phi} \hat{\boldsymbol{\phi}} \quad (2.48)$$

Denklemleri basitleştirmek için elektrik ve manyetik alan ile üretici fonksiyonu arasındaki Denklemler (2.47) ve (2.48) de verilmiştir.

$$\mathbf{F}_{1mn}^{(c)} = \mathbf{M}_{mn}^{(c)}$$

$$\mathbf{F}_{2mn}^{(c)} = \mathbf{N}_{mn}^{(c)} \quad (2.49)$$

Elektrik alanı üretici fonksiyon ile ifade etmek gerektiğinde, $s = 1$ elektromanyetik dalga modunun TE (Transverse Electric) olduğunu, $s = 2$ elektromanyetik dalga modunun TM (Transverse Magnetic) olduğunu belirtir. Denklem (2.47)'de verilen $\mathbf{M}_{mn}^{(c)}$ ifadesi TE modunu, Denklem (2.48)'de verilen $\mathbf{N}_{mn}^{(c)}$ ifadesi TM modunu temsil eder. Bu tanımlar altında yakın elektrik ve manyetik alan ifadeleri, üretici fonksiyonu kullanarak Denklem (2.50) ve Denklem (2.51)'de verilmiştir.

$$\mathbf{E}(r, \theta, \phi) = k\sqrt{\eta} \sum_{c=1}^4 \sum_{s=1}^2 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n q_{smn}^{(c)} \mathbf{F}_{smn}^{(c)}(r, \theta, \phi) \quad (2.50)$$

$$\mathbf{H}(r, \theta, \phi) = \frac{ik}{\sqrt{\eta}} \sum_{c=1}^4 \sum_{s=1}^2 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n q_{smn}^{(c)} \mathbf{F}_{3-smn}^{(c)}(r, \theta, \phi) \quad (2.51)$$

η terimi dalga empedansı, $q_{smn}^{(c)}$ terimi kompleks skaler katsayıları ifade eder. Küresel dalga açılımında amaç $q_{smn}^{(c)}$ terimlerini hesaplamaktır. Denklem (2.50)'de verilen matrisin tersi alınarak $q_{smn}^{(c)}$ katsayıları elde edilir. Küresel dalga açılımında uzak alan ifadelerini elde etmek için uzak alan yaklaşımları yapılır. Yaklaşımlar Denklem (2.52)'de gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} z_n^{(3)}(kr) &\rightarrow j^{n+1} \frac{e^{-jkr}}{kr}, \\ z_n^{(4)}(kr) &\rightarrow (-j)^{n+1} \frac{e^{jkr}}{kr}, \\ \frac{1}{kr} \frac{d}{d(kr)} (kr z_n^{(3)}(kr)) &\rightarrow j^n \frac{e^{-jkr}}{kr}, \\ \frac{1}{kr} \frac{d}{d(kr)} (kr z_n^{(4)}(kr)) &\rightarrow (-j)^n \frac{e^{jkr}}{kr}, \end{aligned} \quad (2.52)$$

Denklem (2.52) ile elde edilen temel yaklaşım $kr \rightarrow \infty$ ifadesidir. Bu yaklaşım uzak alan ifadelerinde kullanıldığı için elektrik ve manyetik alanın r bileşeni artık değerlendirilmez. Küresel dalga açılım yönteminin son aşaması, uzak alan ifadelerinin elde edilmesi için uzak alan fonksiyonların yazılmasıdır. Uzak alan fonksiyonları Denklem (2.53) ve Denklem (2.54)'te verilmiştir.

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{1mn}^{(c)}(\theta, \phi) &= \sqrt{\frac{2}{n(n+1)}} \left(-\frac{m}{|m|}\right)^m e^{(-j)m\phi} (j)^{n+1} \\ &\left(\frac{(-j)m \bar{P}_n^{|m|}(\cos\theta)}{\sin\theta} \hat{\boldsymbol{\theta}} - \frac{d\bar{P}_n^{|m|}(\cos\theta)}{d\theta} e^{(-j)m\phi} \hat{\boldsymbol{\phi}} \right) \end{aligned} \quad (2.53)$$

$$\mathbf{K}_{2mn}^{(c)}(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{2}{n(n+1)}} \left(-\frac{m}{|m|}\right)^m e^{(-j)m\phi} (-j)^n$$

$$\left(\frac{(-j)m\bar{P}_n^{|m|}(\cos\theta)}{\sin\theta} \hat{\phi} + \frac{d\bar{P}_n^{|m|}(\cos\theta)}{d\theta} \hat{\theta} \right) \quad (2.54)$$

Denklem (2.53), Denklem (2.54) ve katsayılar ($q_{smn}^{(c)}$) kullanılarak, uzak elektrik alan ifadeleri Denklem (2.55)'te verilmiştir [11].

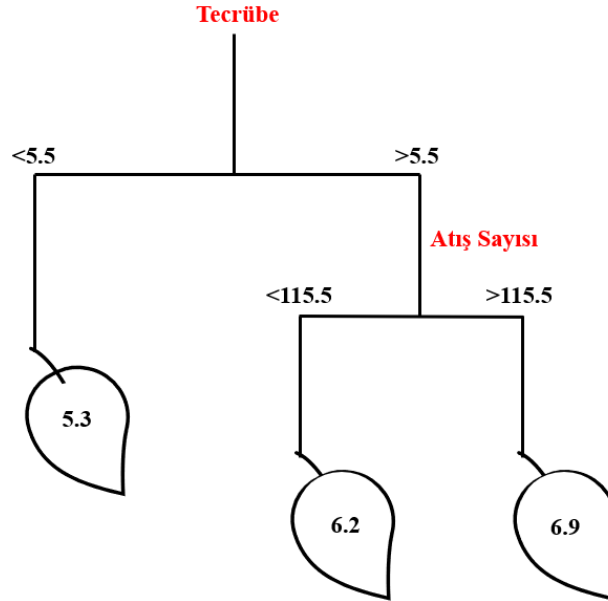
$$E(\theta, \phi) = \sum_{j=1}^J q_j K_j(\theta, \phi) \quad (2.55)$$

2.5. Makine Öğrenmesi Algoritmaları

Makine öğrenmesi alanında yapılan çalışmalar ile makine öğrenmesi, yapay zekâ ve bilişim teknolojiler konularının önemli dalı haline gelmiştir. Makine öğrenmesi algoritmaları, sağlık, sigortacılık, bankacılık ve finans, tarım, parkende gibi çok geniş alanlarda kullanılmakta ve gün geçtikçe teknolojisi ve uygulama alanları artmaktadır. Makine öğrenmesinin literatürde ve pratikte gündem olmasının nedenlerinde biri insanlığın gelişimine benzetilmesidir. İnsanlar da temelde sorunlar ile karşılaştıklarında yapmak istedikleri olgu ile sahip oldukları bilgi arasında bir ilişki kurmaya çalışırlar. Elde edilen sonuç istenen sonuçtan çok uzaksa, hata yüksekse, istenen sonuca yakınsamak için daha çok deneme yanılma yaparak eğitime devam ederler. Yaşadıkları sorunlardan tecrübe elde ederek, yeni sorunlara karşı adaptif çözümler oluşturabilirler. Makine öğrenmesi algoritmalarının da çalışma mantığı insanın yaklaşımına benzetilebilir. Algoritmaya beslenen girdi ve çıktı verileri ile algoritmanın eğitilmesi amaçlanır ve ileride karşılaşılabilecek yeni girdiler için çıktı üretmesi beklenir. Makine öğrenmesi algoritmaları girdi ve çıktı arasında ilişki kurarken matematiksel yöntemlere başvurur. Algoritmada kullanılan matematiksel yakınsamalar, problemin türüne göre değişiklik gösterir. Sınıflandırma, regresyon, kümeleme, karar verme, boyut azaltma vb. gibi farklı problem türleri için farklı makine öğrenmesi algoritmaları geliştirilmiştir [51]. Bu tezde kapsamında incelenen problem türünden dolayı sınıflandırma ve regresyon ağaç algoritmaları incelenmiştir.

2.5.1. Sınıflandırma ve Regresyon Ağaç Algoritmaları

Hayatın her anı seçimlerle doludur ve seçim yapılması gereken onlarca durum vardır. Mevcut seçenekler arasında karar mekanizmasına göre bir tercih yapılır. Bu sürece karar verme süreci olarak adlandırılır. İyi karar verebilmek için seçeneklerin avantaj ve dezavantajlarının iyi değerlendirilmesi gerekmektedir. Karar verme işini iyi geliştirilmiş algoritmalarla bırakmak insanlığın doğasından kaynaklanan hataların önlenmesini sağlar. Problemin türüne göre karar verme algoritmaları kendi içinde sınıflara ayrılır. Bu tez kapsamında sınıflandırma ve regresyon ağaç algoritmaları (CART) anlatılmıştır. Ağaç algoritmalarının temel amacı, kompleks yapıdaki verilerini basit karar mekanizmalarına dönüştürmektir. Basit bir örnek şeması Şekil 2.17’de gösterilmiştir.



Şekil 2.17 Ağaç Algoritma Örneği

Şekil 2.17’de verilen ağaç algoritma örneği bir beyzbol takım oyuncularının maaşlarının belirli kurallara göre belirlenmesini göstermektedir. Bir oyuncunun tecrübesi 5.5 yıldan az olduğu durumda maaş istatistiği 5.3 olarak belirlenmiştir. Tecrübesi 5.5 yıldan fazla olan oyuncular için ortalama atış sayıları üzerinden farklı bir dallanma oluşturulmuş ve ortalama 115.5’den fazla atış sayısı olan oyuncuların maaş istatistiği 6.9, az olan oyuncuların 6.2 olarak belirlenmiştir. Ağaç algoritmalarında ilk düğüm karara en çok etki eden değişkendir. Ağaç algoritmalarında en önemli husus karar kurallarını çıkarmaktır. Belirli referans noktalarına göre ve optimizasyonlar yaparak düğümlerin referans değerleri belirlenir. Bu işlemin yapılması için belirli istatistikî yöntemler kullanılır.

Bunlar; ki-kare (chi square), varyasyon azaltma, bilgi kazanç oranı, Gini-Simpson endeksi ve kök toplamların karesi yöntemleridir. Kök toplamların karesi (RMS) Denklem (2 . 56)'de gösterilmiştir.

$$RMS = \sum_{j=1}^J \sum_{i \in R_j} (y_i - \hat{y}_{R_j})^2 \quad (2 . 56)$$

R_j ifadesi referans belirlenen bölgeyi temsil eder. \hat{y}_{R_j} ifadesi, R_j bölgesindeki değerlerin ortalamasını ifade eder. Regresyon ağacının dallanma kuralları, farklı y_i değerlerinde elde edilen RMS değerlerine göre belirlenir. Kök toplamların karesi yöntemi kullanılarak oluşturulan regresyon ağacında hataların minimum olduğu noktalar belirlenir. Kök toplamların karesi yönteminde en düşük hatayı veren değişken karar ağacının en üst dalını belirler. Yaprak bölümüne kadar tüm dallar benzer şekilde en düşük hata değerlerine göre sıralanır [53].

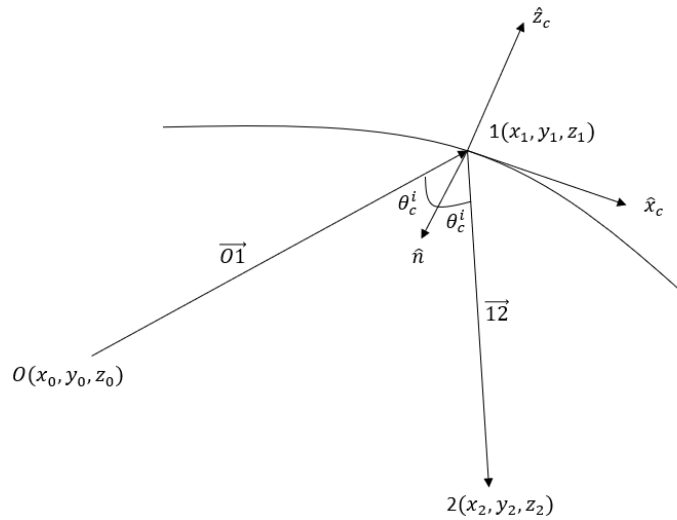
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Veri Üretimi

Geleneksel dönüşüm algoritmaları ve makine öğrenmesi tabanlı dönüşüm algoritmaları için yakın ve uzak elektrik alan ifadelerine ihtiyaç vardır. İhtiyaç duyulan veriler ALTAIR FEKO programı ile nümerik olarak elde edilmiştir. FEKO elektromanyetik dalgaların modellenmesi için kullanılan bir programdır. Programda birden çok elektromanyetik dalgaların analizi için çözücüler bulunmaktadır. Bu tezin çalışma frekans aralığı gereği programda bulunan yüksek frekans çözücüler kullanılmıştır. Elektromanyetik dalgaların analiz için seken ışın yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem geometrik optik tabanlı bir yaklaşımdır [54]. Aydınlatılan yüzeyin elektriksel uzunluğu büyük olduğu için yayılan elektromanyetik dalgayı bir ışın gibi düşünülür. Yüzey ayna gibi varsayılarak kaynaktan gönderilen her ışın için Snell kanunları kullanılarak yansımalar hesaplanır. Yansımalar sonucu oluşan yüzey akım ifadeleri ile fiziksel optik yöntemi kullanılarak saçılan elektrik alanlar hesaplanır. Seken ışın yöntemi için gönderilen elektrik alanı Denklem (3 . 1)'de verilmiştir.

$$\mathbf{E}^i = [-\phi^i \mathbf{I} + \theta^i \bar{\mathbf{I}}] e^{jk^i \cdot \mathbf{r}} \quad (3 . 1)$$

$\bar{\mathbf{k}}^i$ terimi elektrik alanın vektör dalga sayısıdır. $\bar{\mathbf{I}}$ ve \mathbf{I} terimleri paralel ve dikey polarizasyon genlikleridir. Seken ışın yönteminin işleyişi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Seken Işın Yöntemi

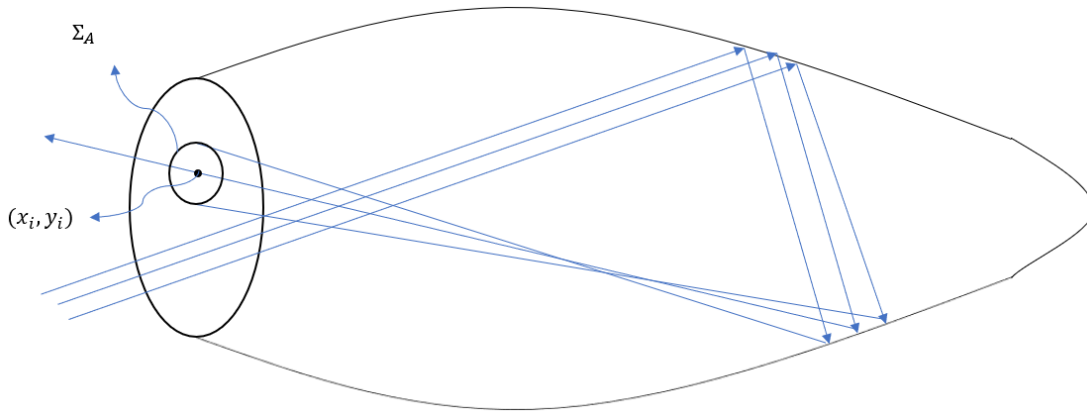
0 noktasından gönderilen düzlem dalganın modellenmesi için, 0 noktasından 1 noktasına paralel ışınlar üretilir. Bir paralel ışının davranışı Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Üretilen ışınların referans noktasına (x_0, y_0, z_0) göre ifadesi Denklem (3 . 2)’de verilmiştir.

$$(x_1, y_1, z_1) = (x_0, y_0, z_0) + (s_x, s_y, s_z)t \quad (3 . 2)$$

s_x, s_y, s_z ifadeleri yön vektörlerini, t ifadesi ışınların yer değiştirme miktarını belirtir. Üretilen ışın yüzeye çarparak yansıyan ışın meydana gelir. Yansıyan ışın Snell yasasına uymak zorundadır, bu süreç ışınlar yüzeye çarpmayana kadar iteratif olarak devam eder. Yansıyan ışın için birim vektör ifadesi Denklem (3 . 3)’te verilmiştir.

$$\hat{\mathbf{m}} = (\hat{\mathbf{10}} \times \hat{\mathbf{n}}) / \sin \theta_c^i \quad (3 . 3)$$

$\hat{\mathbf{10}}$ ifadesi 1 numaralı noktadan 0 numaralı noktaya doğru yönlendirilen birim vektördür. Kompleks geometriye sahip yüzeylerde ışınlardan birden fazla kez yansır. Bu geometriler için gönderilen ışınların düzlem dalga davranışı Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Işınların Düzlem Dalga Davranışı

Σ_A ifadesi yansıyan ışınların çıktığı açıklıktır. Denklem (2 . 6)’da verilen fiziksel optik yaklaşımı bu problem için tekrar yazıldığında Denklem (3 . 4) elde edilir.

$$\mathbf{M}_s = \begin{cases} 2\mathbf{E}^i \times \hat{\mathbf{n}}, & \Sigma_A \text{ bölgesinin içi} \\ 0, & \Sigma_A \text{ bölgesinin dışı} \end{cases} \quad (3.4)$$

\mathbf{M}_s ifadesi eşdeğer manyetik akım ifadesidir. Yansıyan ışın ifadeleri elde edildikten sonra uzak alan için geri saçılan elektrik alan ifadesi Denklem (3.5)'te olduğu gibi ifade edilir.

$$\mathbf{E}^{bs} = \frac{e^{-jk_0 r}}{r} [A_\theta \hat{\theta}^i + A_\phi \hat{\phi}^i] \quad (3.5)$$

Kompleks geometrilere meydana gelen yansımaların Σ_A alanına düşenleri toplanır. A_θ ve A_ϕ ifadeleri bu bölgede meydana gelen elektrik ve manyetik alan ifadelerinin integralleri alınmış halidir. A_θ ve A_ϕ ifadeleri Denklem (3.6)'da verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} A_\theta \\ A_\phi \end{bmatrix} = \frac{jk_0}{2\pi} \iint dx dy e^{jk_0(ux+vy)} \begin{bmatrix} E_x \cos \phi^i + E_y \sin \phi^i \\ (-E_x \sin \phi^i + E_y \cos \phi^i) \cos \theta^i \end{bmatrix}$$

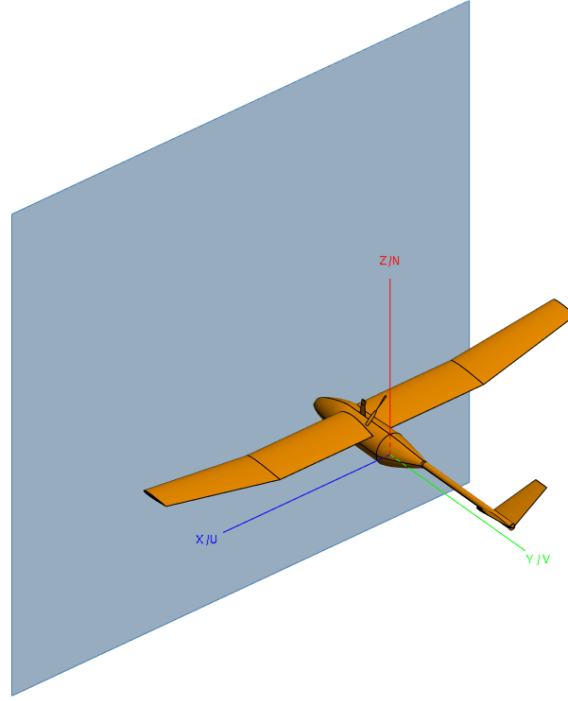
$$u = \sin \theta^i \cos \phi^i$$

$$v = \sin \theta^i \sin \phi^i \quad (3.6)$$

E_x ve E_y ifadeleri Σ_A açıklığında elektrik alanın x ve y bileşenleridir. ALTAIR FEKO programında bulunan yüksek frekans çözümler temel olarak bu şekilde elektrik ve manyetik alan ifadelerini elde etmekte ve RKA analizi yapmaktadır.

3.2. Geleneksel Yakın Alandan Uzak Alana Dönüşüm Algoritma Sonuçları

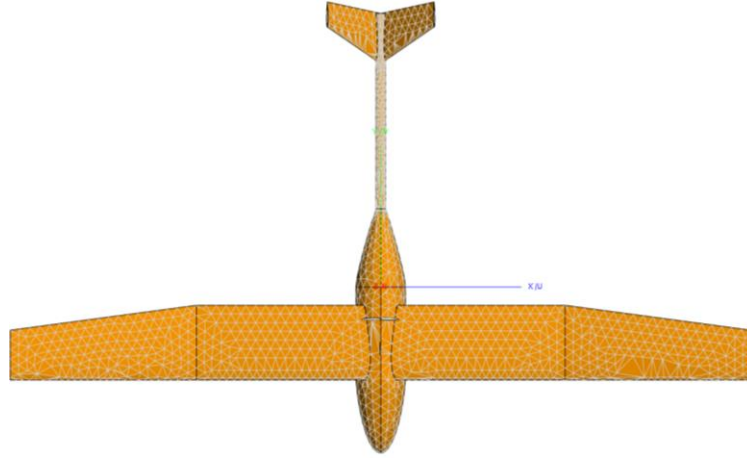
Bu bölümde hedeften toplanan yakın elektrik alan değerleri kullanılarak geleneksel dönüşüm algoritması ile elde edilen radar kesit alanı analizi sonuçları, ölçüm frekansı, açısı ve cismin geometrik bilgisi hakkında bilgi verilecektir. Tez çalışması boyunca kullanılan geleneksel dönüşüm algoritması düzlem dalga açılım yöntemidir. Monostatik radar kesit alanı analizi yapılan hedef ile yakın alan prob düzeneği Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3 Yakın Alan Ölçüm Düzenegi

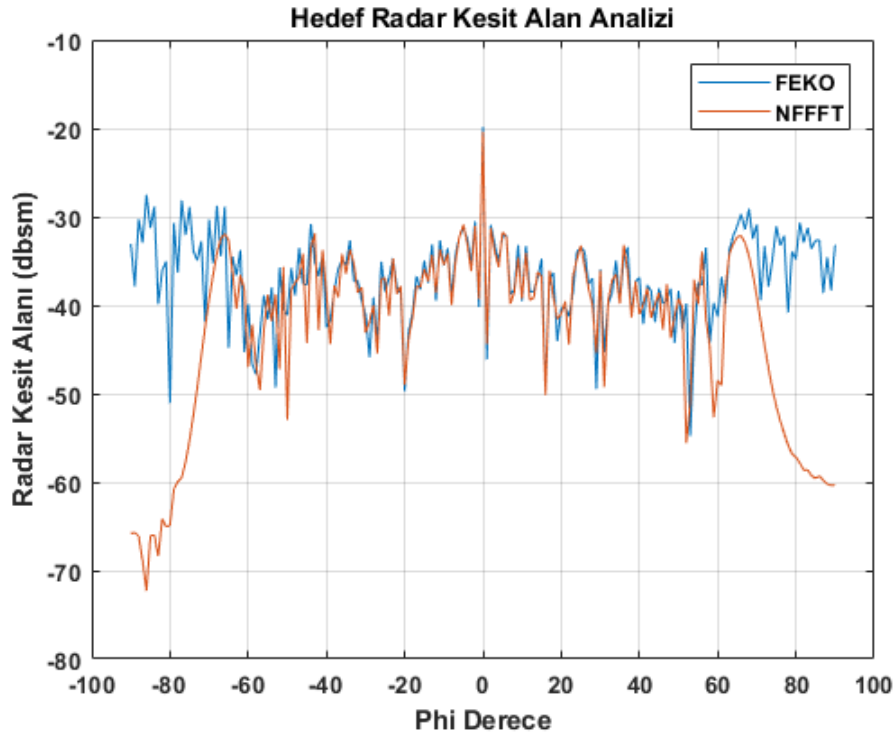
Hedefin geometrisi STL dosya formatında ALTAIR FEKO programına eklenmiştir. Analiz edilmesi hedeflenen açı (ϕ) $\mp 90^\circ$ aralığındadır. Elektromanyetik analiz programlarında işlem sürelerini uzatan ve analiz bilgisayarlarına ihtiyaç duyulmasını sağlayan işlem, yüzey üzerindeki akım hesaplanmasıdır. Yüzey üzerindeki akımlar hesaplanmadan önce, cismin yüzeyi için üçgenlerden oluşan ağ yaratılır. Üçgen ağ yapısında yaratılan üçgenlerin boyutları çalışılan dalga boyuna bağlıdır. Yüksek frekanslarda dalga boyu küçülür ve ağ yaratılması istenen üçgen yüzeylerin boyutları küçülür. Oluşturulan her üçgen yüzeyde, akım hesaplanması gerekmektedir. Üçgen yüzeylerin boyutları, hedefin boyutundan çok küçük olduğu durumlarda yaratılan üçgen sayısı büyük sayılara ulaşmaktadır. Bu durumlarda üçgen sayısı arttığı için hesaplanması gereken yüzey sayısı artmakta ve hesaplama süreleri uzamaktadır.

Ölçümü yapılan hedef için 5,066 adet üçgen yüzey kullanılmıştır. Hedef malzemesi için mükemmel iletken malzeme (PEC) tanımlanmıştır. Mükemmel iletken malzemelere çarpan elektrik alan yüzey içerisine nüfuz edemeyeceği için yüzeyden saçılan elektrik alan çok güçlü ışıma yapar. Hedefin üçgenlenmiş ağ yapısı Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Hedef Geometrisinin Üçgen Ağ Yapısı

Hedefin geometrisi için seçilen yakın alan prob tarama yüzeyinin x ve z yönündeki boyutları sırasıyla 250 cm x 250 cm'dir. Toplamda 48,400 noktadan toplanan yakın elektrik alan ifadesi ile uzak alan dönüşümü yapılmıştır. Algoritmanın kıyaslanması için FEKO programında bulunan uzak alan monitörleri kullanılarak uzak alan ölçümleri yapılmıştır. Dönüşümü yapılan elektrik alan ifadeleri ve FEKO programının ürettiği uzak elektrik alan ifadeleri kullanılarak elde edilen radar kesit alanı analizi Şekil 3.5'da verilmiştir.



Şekil 3.5 Radar Kesit Alanı Analizi Karşılaştırması

Mavi ile gösterilen sonuç, ALTAIR FEKO programının ürettiği radar kesit alanı sonucudur. Tez boyunca yapılan çalışmalarda hedeflenen referans sonuç FEKO programının sonucudur. Kırmızı ile gösterilen (NFFFT) sonuç, FEKO programı ile elde edilen yakın elektrik alan ifadelerinin geleneksel algoritma kullanılarak uzak alana dönüştürmesi sonucu elde edilen radar kesit alanı sonucudur. Algoritmanın ± 68 derecede iyi sonuç verdiği gösterilmiştir. Dönüşümün geçerli olduğu açı değeri Denklem (3 . 7) kullanılarak hesaplanır.

$$\phi_v \cong \tan^{-1} \left(\frac{L - a}{2d} \right) \quad (3 . 7)$$

ϕ_v ile ifade edilen açı değeri, dönüşüm ile elde edilen radar kesit alanı bilgisinin referans radar kesit alanı bilgisine kaç dereceye kadar doğru yakınsayabileceğinin ifadesidir. L ifadesi yakın alan prob uzunluğu, a ifadesi hedefin en uzak iki noktası arası uzunluğu, d ifadesi hedef ile yakın alan prob arası uzaklığı temsil eder. Ölçümü yapılan hedef için hesaplanan değer Denklem (3 . 8)'de gösterilmiştir.

$$\phi_v \cong \tan^{-1} \left(\frac{250 - 200}{(2)(10)} \right)$$

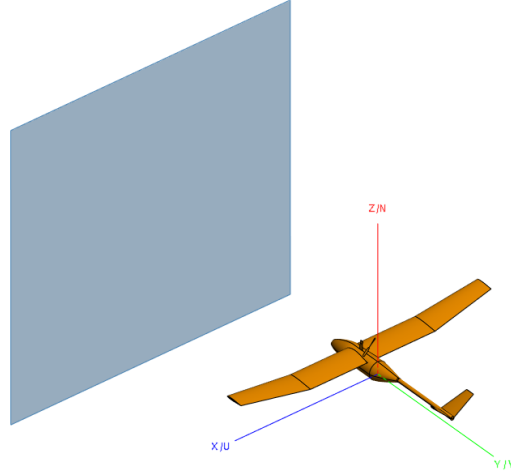
$$\phi_v \cong \mp 68^\circ \quad (3 . 8)$$

Ana huzmeden yaklaşık 68 dereceye kadar doğru radar kesit alanı analizi yapılacağı hesaplanmıştır. Yakın alan ölçümünde yapılan ve genellikle ölçüm sonuçlarını etkileyen hatalardan biri, prob ekipmanlarının kalibrasyonlarının yeteri kadar iyi yapılamamasıdır. Denklem (3 . 7)'de gösterildiği üzere, yakın alan problemlerinin doğru konumlandırılması ve doğru tarama yapması radar kesit alanı analizini etkilemektedir.

3.2.1. Yakın Alan Prob Hatalarının Ölçüm Sonuçlarına Etkisi

Denklem (3 . 7) incelendiğinde radar kesit alanının doğru analiz edilmesi için tarama yüzeyinin cismin yüzeyinden büyük olması gerekmektedir. Aksi takdirde, $L - a$ ifadesi negatif sonuç üretecek ve tahmin edilen açı negatif olacaktır. Ölçüm sonucunu etkileyen

diğer parametre, yakın alan prob tarama yüzeyi ile hedef arasındaki uzaklıktır. Yakın alan ölçümlerinin hedefe yakın yapılması gerekmektedir ancak hedefe yaklaşıldıkça, dalgaların yayılmadığı, osilasyona girdikleri bölge olan reaktif bölgeye geçilir. Hedeften uzaklaşıldığı durumda da tahmin edilen açı değeri azalmaktadır. Yakın alan bölgesinde kalmak şartıyla, yakın alan problemlerinin hedeften uzakta aldığı ölçüm düzeneği Şekil 3.6’de gösterilmiştir.



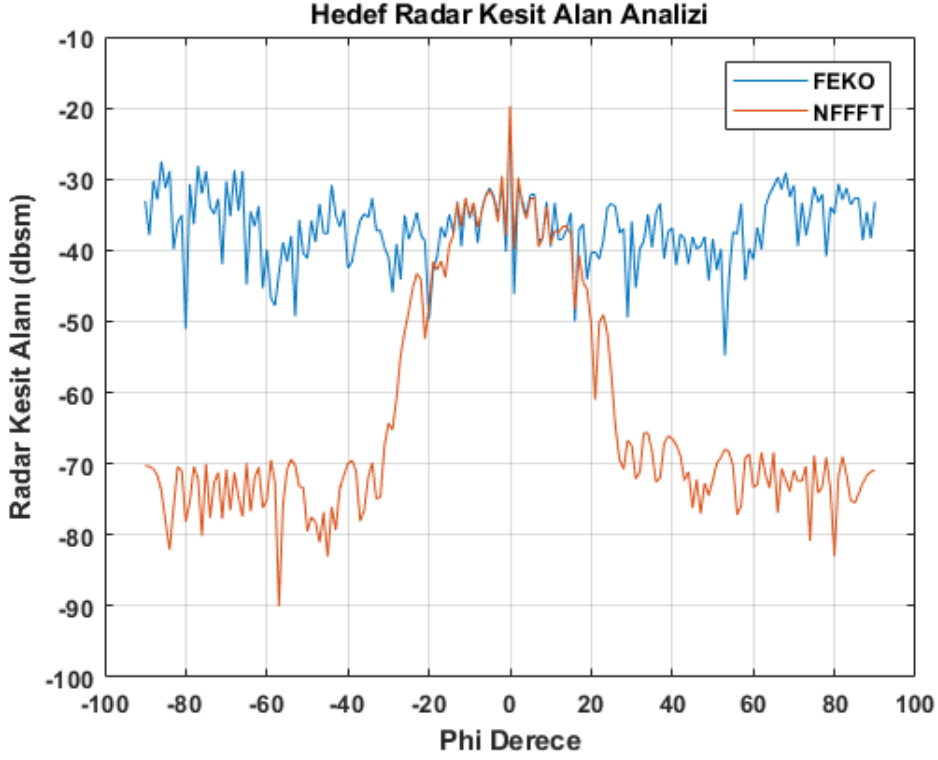
Şekil 3.6 Farklı Uzaklıktaki Yakın Alan Problemlerinin Ölçüme Etkisi

Yakın alan problemlerinin uzaklığı arttırıldığı durumda (örneğin $d = 100 \text{ cm}$ olduğu durumda) radar kesit alanı bilgisinin kaç dereceye kadar doğru hesaplanabileceği Denklem (3 . 9)’da gösterilmiştir.

$$\phi_v \cong \tan^{-1} \left(\frac{250 - 200}{(2)(100)} \right)$$

$$\phi_v \cong \mp 14^\circ \quad (3 . 9)$$

Yakın alan problemlerinin uzaklığı arttırılarak elde edilen yakın elektrik alan ifadeleri kullanıldığı durumda radar kesit alanı analizi sonucu Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



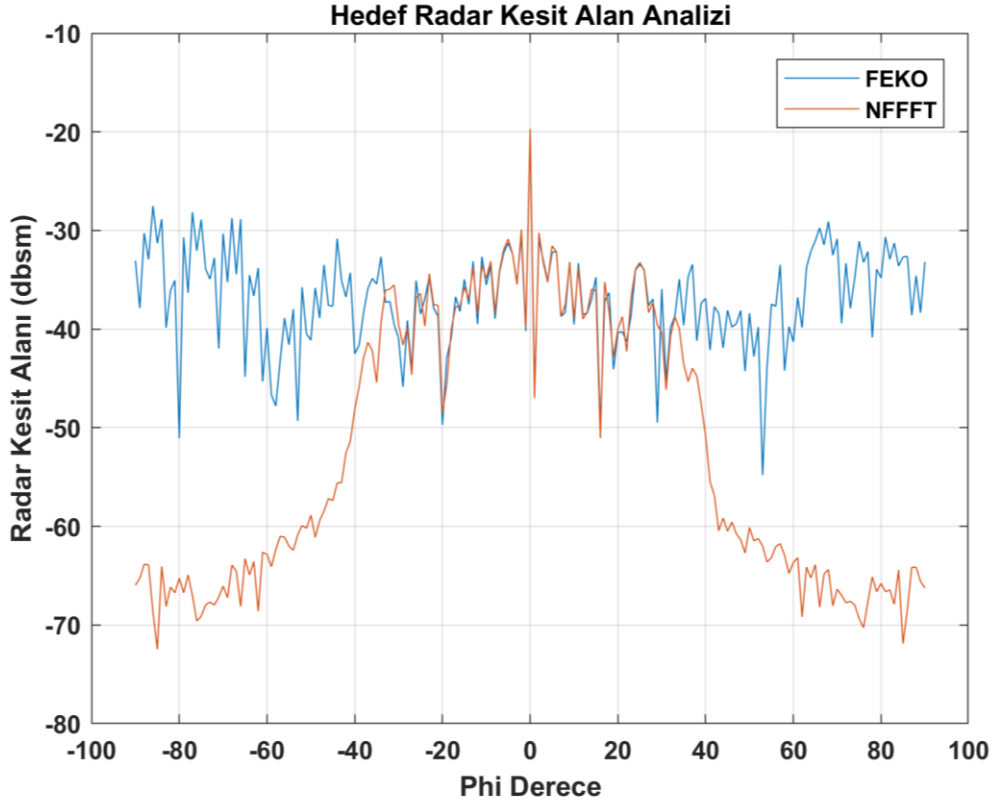
Şekil 3.7 Yakın Alan Problemlerinin Uzaklığının Arttırılması İle Elde Edilen Radar Kesit Alanı

Reaktif bölgeden çıkmak için yakın alan prob tarama yüzeyi ile hedef arası mesafenin arttırılması gerekmektedir. Ancak tarama yüzeyi sabit tutulup, mesafe arttırıldığında doğru tahmin edilen alan azalmaktadır. Doğru tahmin edilen alanı arttırmanın diğer yolu, tarama yüzeyini arttırmaktır. Daha geniş yakın alan taramasıyla ölçüm alındığı durumda (örneğin $L = 300 \text{ cm}$ olduğu durumda) doğru tahmin edilen derece Denklem (3 . 10)'da verilmiştir.

$$\phi_v \cong \tan^{-1} \left(\frac{300 - 200}{(2)(100)} \right)$$

$$\phi_v \cong \mp 26^\circ \quad (3 . 10)$$

Geniş tarama alanı ile alınan ölçümler kullanıldığında elde edilen radar kesit alan analizi sonucu Şekil 3.8'da verilmiştir.



Şekil 3.8 Yakın Alan Probenun Geniş Taraması İle Elde Edilen Radar Kesit Alanı

Uzak mesafede ölçüm alındığında, tarama yüzeyinin artırılması gerekmektedir. Tahmin edilen radar kesit alanı bilgisinin açılı doğruluğunu %10 arttırmak için ölçüm nokta sayısı 48,400'den 69,670'e çıkarılmıştır. Bundan dolayı, doğru sonuçlar elde edilmek istendiğinde laboratuvar ölçüm süreleri çok uzamaktadır.

3.3. Makine Öğrenmesi Algoritma Sonuçları

Bu bölümde, çalışma kapsamında kullanılan regresyon algoritmaları hakkında bilgi verilmiştir. Yapılan çalışmalar için MATLAB Regression Learner uygulaması kullanılmıştır. Tez boyunca yapılan çalışmaların temel amacı yakın elektrik alanlar ile uzak elektrik alanlar arasındaki ilişkiyi makine öğrenmesi temelli bir yaklaşım ile geliştirmektir. Regresyon algoritmalarının eğitilmesi giriş ve hedef parametrelere ihtiyaç duyar. Regresyon algoritmaları genel olarak, verilen çok sayıda giriş parametreleri ile hedef parametreler arasında matematiksel denklemler çıkarır. Bu sayede yeni giriş parametreleri için çıkardığı denklemleri kullanarak hedef parametreyi tahmin etmeye

çalışır. Bu tez çalışmasında geliştirilen regresyon tabanlı makine öğrenmesi algoritmaları için giriş ve hedef veri seti Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Makine Öğrenmesi Algoritmaları İçin Veri Seti

Veri	Birimi	Giriş/Hedef
Açı	θ, ϕ tarama açıları	Giriş Parametresi
Frekans	GHz	Giriş Parametresi
Yakın Elektrik Alan Genliği	(V/m)	Giriş Parametresi
Yakın Elektrik Alan Fazı	Derece	Giriş Parametresi
Uzak Elektrik Alan Genliği	(V/m)	Hedef Parametresi
Uzak Elektrik Alan Fazı	Derece	Hedef Parametresi

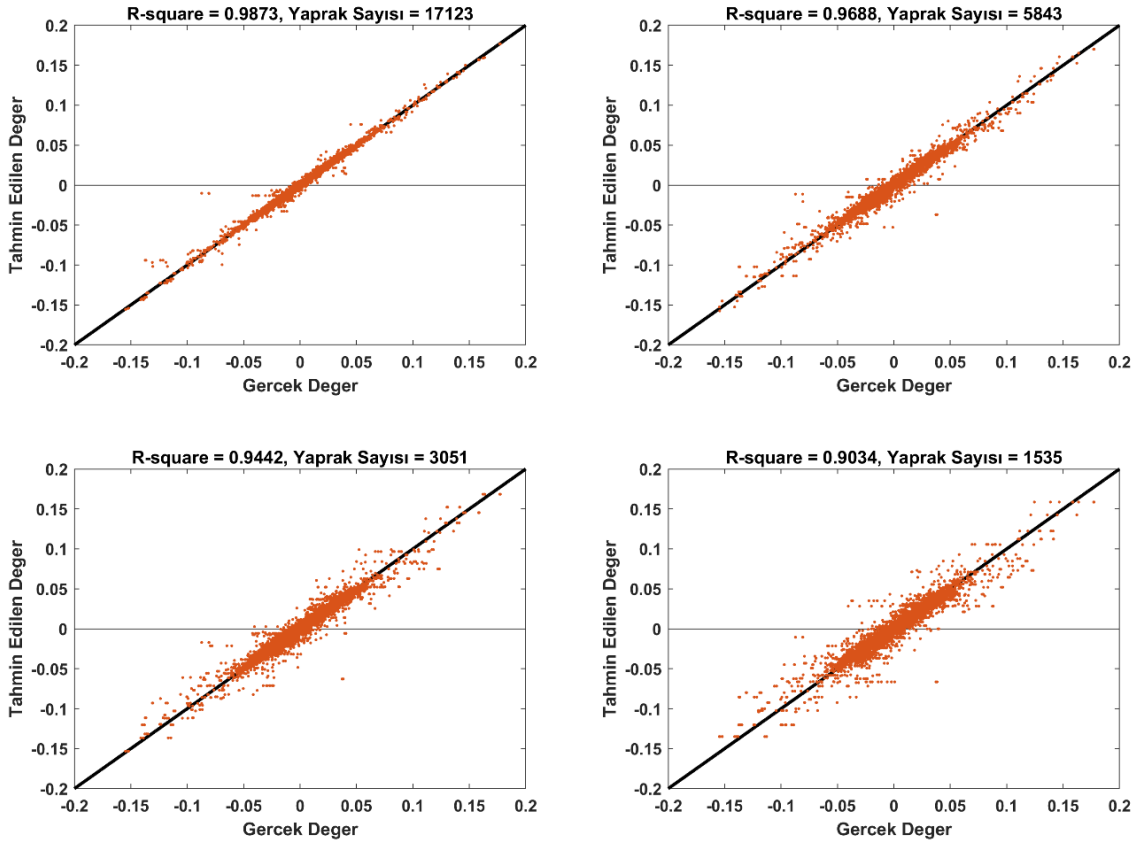
Bu çalışma kapsamında giriş ve çıkış verileri FEKO programı ile elde edilmiştir. Tez kapsamında farklı algoritmalar test edilmiştir. 3 farklı hedeften ölçüm alınmıştır. Her hedef için $\theta = 0^\circ$ ve $\phi = \pm 6.5420^\circ$ açılarında toplamda 1000 farklı açıda ölçüm alınmıştır. Açı çözünürlüğü 0.01308° olarak belirlenmiştir. Her açı ölçümü için 8.28 – 10.28 GHz frekans aralığında toplamda 1000 farklı frekansta ölçüm alınmıştır. Frekans çözünürlüğü 2 MHz olarak belirlenmiştir. Hedefler yatay polarizasyonda aydınlatılıp, yatay polarizasyonda ölçüm alınmıştır. Her hedef için 1000 açı, 1000 frekans olacak şekilde toplamda 1000000 yakın ve uzak elektrik alan bilgisi elde edilmiştir. Algoritmaların eğitim için toplamda 3,000,000 giriş ve hedef parametresi kullanılmıştır. Her algoritma için eğitim verisi %80, test verisi %20 seçilmiştir. Çizelge 3.1’de gösterilen veri setleri kullanılarak eğitilen makine öğrenmesi algoritmalarının sonuçları Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 Makine Öğrenmesi Algoritmalarının Sonuçları

Algoritma Adı	RMSE	MAE	MSE	Eğitim Süresi
Linear Regression	0.034732	0.026837	0.0012063	74.06 sn
Interactions Linear Regression	0.034732	0.026838	0.0012063	38.399 sn
Robust Linear Regression	0.034736	0.026792	0.0012066	103.77 sn
Stepwise Linear Regression	0.034706	0.026809	0.0012045	199.65 sn
Fine Tree	0.0023768	0.0017592	5.649×10^{-6}	107.81 sn
Medium Tree	0.0024119	0.0017659	5.8173×10^{-6}	142.13 sn
Coarse Tree	0.0028327	0.0018917	8.0242×10^{-6}	131.75 sn
Boosted Tree	0.022028	0.014667	0.00048522	587.69 sn
Bagged Tree	0.028103	0.014984	0.00053196	598.1 sn

MATLAB Regression Learner uygulamasında bulunan algoritmalar, ALTAIR FEKO kullanılarak elde edilen yakın elektrik alan genlik/faz değerleri ve uzak elektrik alan genlik/faz değerleri kullanılarak eğitilir. Uygulamada bulunan lineer regresyon algoritmaları, verilen girdi değerlerini kullanarak çıkış değerlerini düşük hata ile üretebilen denklem geliştirmeye çalışır. Ağaç algoritmaları, verilen girdi parametreleri ile çıkış değerlerini koşullu dallanmalar (if-else) oluşturarak elde etmeye çalışır. Bu çalışmada [55] algoritmaların kıyasları gösterilmiştir. Tez kapsamında çalışılan problem için ağaç algoritmalarının daha düşük hatalı sonuçlar ürettiği saptanmıştır. Ağaç algoritmalarından *Fine Tree* regresyon algoritmasının bu çalışmalar kapsamında en düşük hata ile sonuç veren algoritma olduğu görülmüştür. Tez boyunca yapılan çalışmalar *Fine Tree* regresyon algoritması kullanılarak eğitilen algoritma ile test edilmiştir. Makine öğrenmesi algoritmalarında çalışılan algoritmanın türüne göre parametre optimizasyonu yapmak mümkündür. Bu sayede eğitilen algoritma ile daha hızlı veya daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Bu tez kapsamında ağaç algoritmaları çalışıldığı için ağaç algoritma parametresi olan yaprak sayısı değişiminin sonucu nasıl etkilediği irdelenmiştir. Yaprak

sayıları, ağaç algoritmasının tayin edebileceği sonuç parametre sayısıdır. Şekil 3.9’da yaprak sayısının değişiminin algoritmaya etkisi gösterilmiştir.

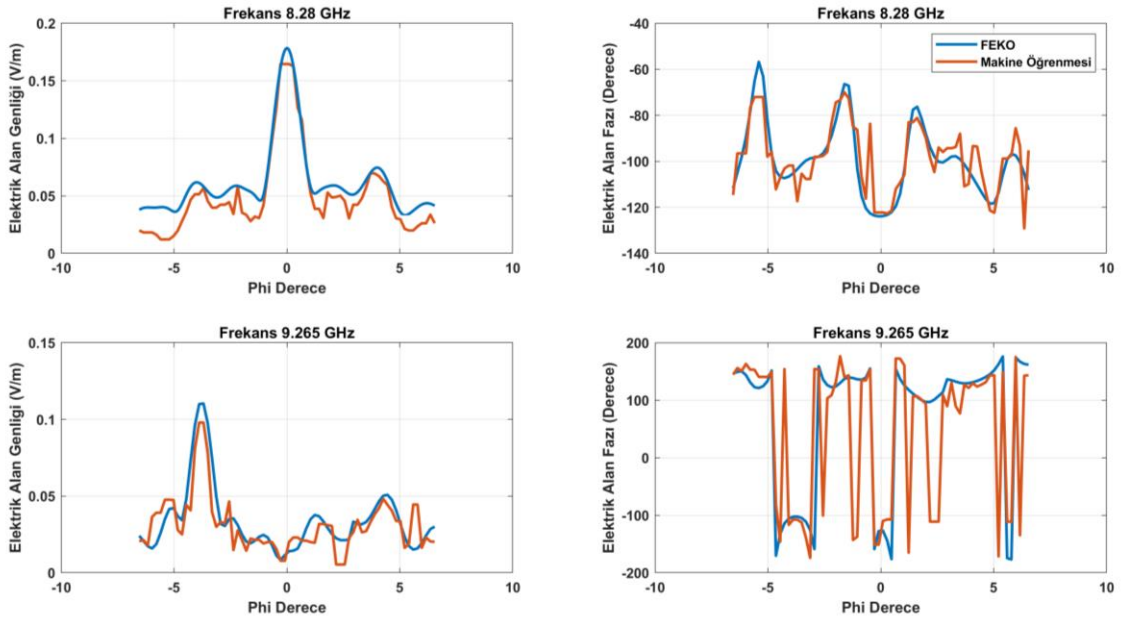


Şekil 3.9 Yaprak Sayısı Değişiminin Algoritmaya Etkisi

Grafiklerde gösterilen gerçek ve tahmin edilen değerler uzak elektrik alanın genlik değerleridir. Gerçek değer, FEKO kullanarak elde edilen uzak elektrik alan değeridir. Tahmin edilen değer, makine öğrenmesi kullanılarak elde edilen uzak alan değeridir. Şekildeki siyah çizgi $y = x$ grafiğini, hatasız durumu gösterir. Tahmin edilen değerlerin grafiğe uzaklık miktarına göre hata oranı belirlenir. Hata olmayan durumda tahmin edilen değerlerin gerçek değerler ile örtüşmesi beklenir. R-squared değerinin hesaplanması Denklem (3 . 11)’de verilmiştir.

$$R_squared = 1 - \frac{RSS}{TSS} \quad (3 . 11)$$

RSS ifadesi hata miktarlarının karelerinin ortalamasıdır. TSS ifadesi tüm değerlerinin karelerinin ortalamasıdır. R-squared değerinin 1'e yaklaşması hata miktarının azaldığını gösterir. Grafiklerde yaprak sayısının azalması algoritmanın hata değerini arttırdığı görülmüştür. Makine öğrenmesi algoritması ve parametresinin belirlenmesinden sonra test verileri ile elde edilen sonuçlar kıyaslanabilir. Algoritmayı test etmek için farklı frekans ve açılarda yakın ve uzak elektrik alan verileri FEKO ile üretilmiştir. Test için $\theta = 0^\circ$ ve $\phi = \pm 6.5420^\circ$ açılarında toplamda 70 farklı açıda ölçüm alınmıştır. Açı çözünürlüğü 0.1869° olarak belirlenmiştir. Her açı ölçümü için $8.28 - 10.28$ GHz frekans aralığında toplamda 70 farklı frekansta ölçüm alınmıştır. Frekans çözünürlüğü 28.57 MHz olarak belirlenmiştir. Hedefler yatay polarizasyonda aydınlatılıp, yatay polarizasyonda ölçüm alınmıştır. Test için toplamda 4900 adet veri toplanmıştır. Farklı frekanslardaki elektrik alan verileri kullanılarak test edilen makine öğrenmesi algoritması sonuçları Şekil 3.10'de gösterilmiştir.

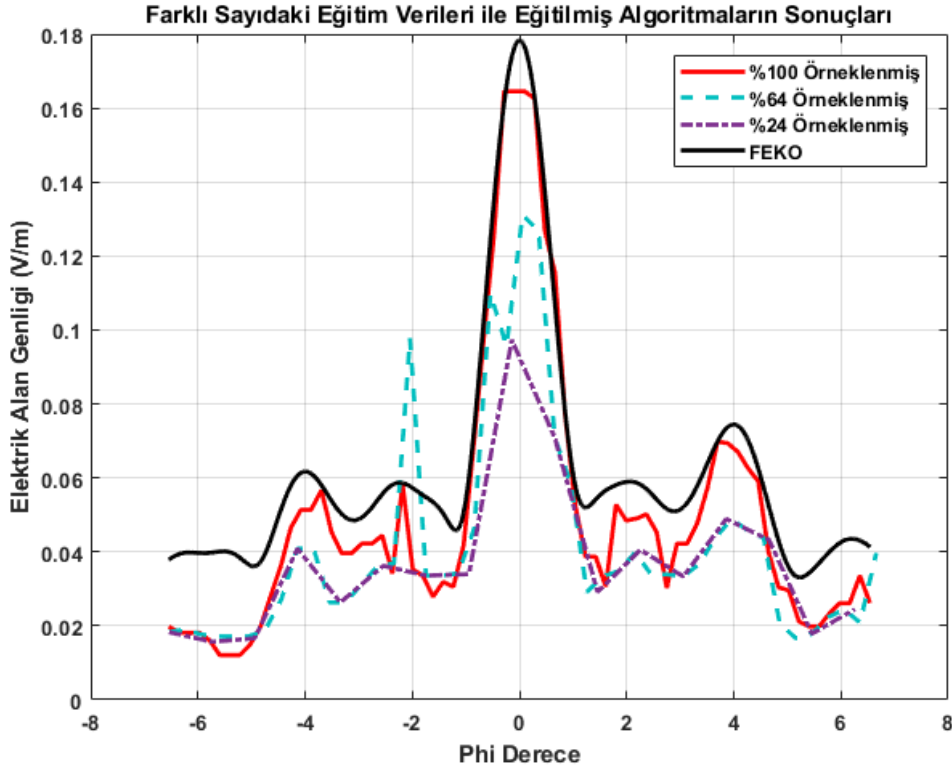


Şekil 3.10 Farklı Frekanslardaki Test Verilerinin Sonuçları

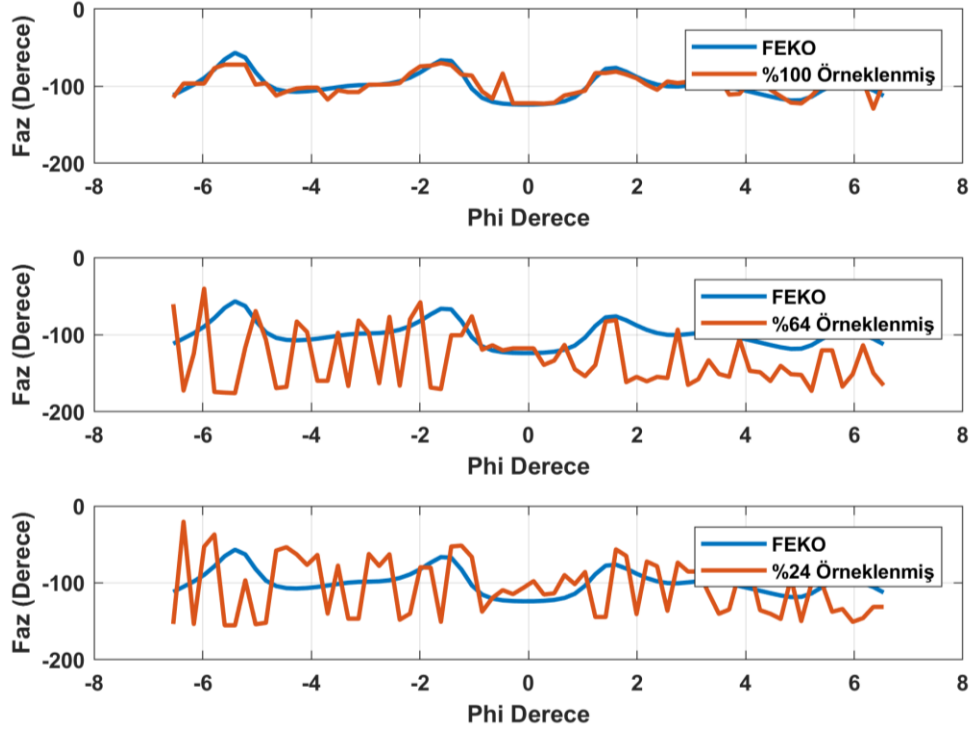
8.28 GHz ve 9.265 GHz frekanslarındaki verileri kullanan algoritmanın ürettiği uzak elektrik alan sonucu grafikte turuncu olarak gösterilmiştir. FEKO kullanılarak elde edilen uzak alan verileri grafikte mavi ile gösterilmiştir. Algoritmanın ürettiği sonuçların genlik değerleri faz değerlerine göre FEKO'dan elde edilen sonuçlara daha çok yakınsadığı görülmektedir.

3.3.1. Farklı Test ve Eğitim Verilerinin Algoritmaya Etkisi

Makine öğrenmesi algoritmasını eğitmek için kullanılan veriler, algoritmanın hata oranını etkiler. Eğitim veri setinde bulunan verilerin çözünürlüğü, veri türü sayısı, verilerin birimleri ve veri sayısı algoritmanın eğitilmesinde rol oynar. Veri sayısının artırılması, algoritmanın girdi ve hedef parametreleri arasındaki ilişkiyi kurmasında etkisi vardır. Tez kapsamında geliştirilen algoritma için farklı sayıda eğitim verileri kullanılarak algoritmanın yakınsaması test edilmiştir. Eğitim için $\theta = 0^\circ$ ve $\phi = \pm 6.5420^\circ$ açılarında 240, 640, 1000 farklı açıda 3 farklı ölçüm alınmıştır. Açı çözünürlüğü sırasıyla 0.0545° , 0.0204° , 0.01308° olarak belirlenmiştir. Her açı ölçümü için 8.28 – 10.28 GHz frekans aralığında toplamda 1000 farklı frekansta ölçüm alınmıştır. Frekans çözünürlüğü 2 MHz olarak belirlenmiştir. Hedefler yatay polarizasyonda aydınlatılıp, yatay polarizasyonda ölçüm alınmıştır. Test için sırasıyla 240000, 640000, 1000000 sayılarında veri toplanmıştır. Farklı sayıda örneklenmiş eğitim verileri ile eğitilen algoritmaların sonucu Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



(a)



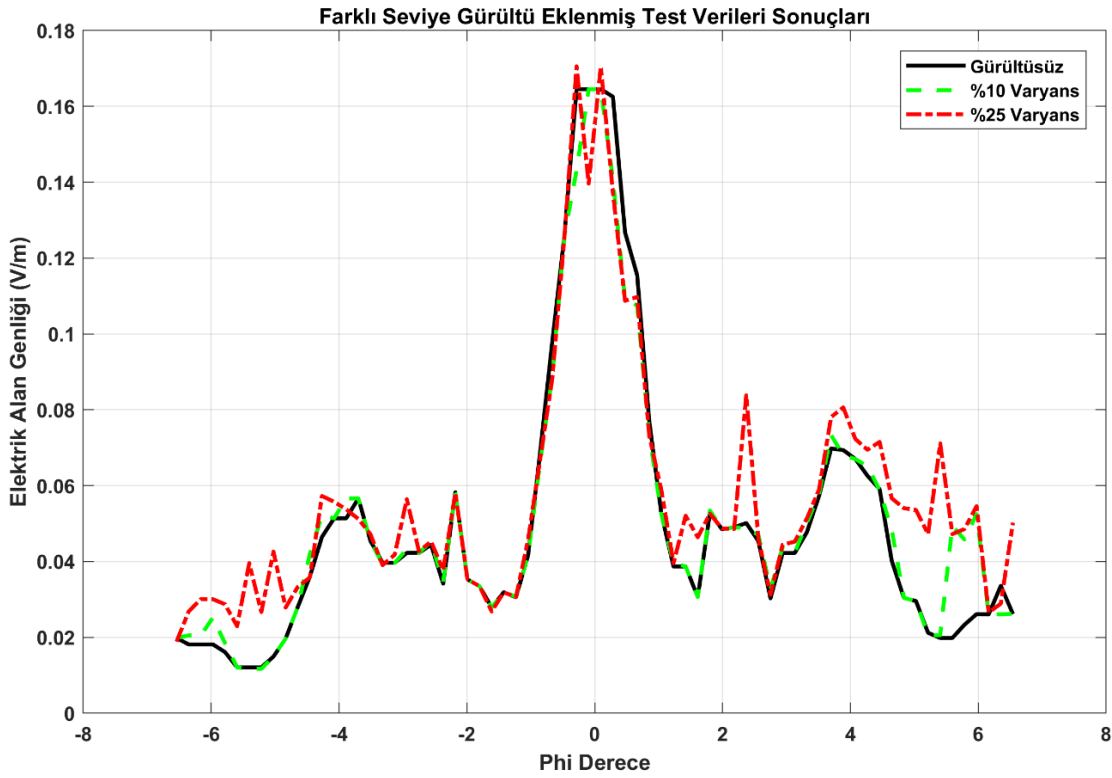
(b)

Şekil 3.11 (a) Farklı sayıdaki eğitim verileri ile eğitilmiş algoritmaların elektrik alan genliklerinin sonuçları (b) Farklı sayıdaki eğitim verileri ile eğitilmiş algoritmaların elektrik alan fazlarının sonuçları

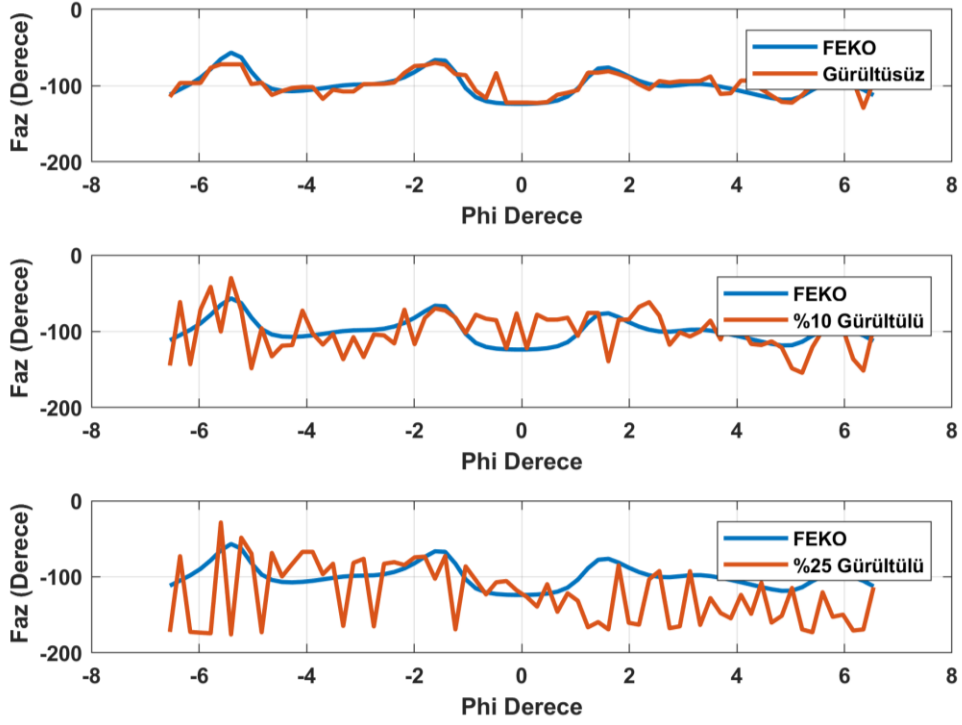
Siyah ile gösterilen veri FEKO programı kullanılarak elde edilen elektrik alan genliğinin farklı açılardaki verisidir. Siyah ile gösterilen veri referans değeridir. Kırmızı ile gösterilen veri (%100 örnekleme), eğitim verilerinin tamamı kullanılarak geliştirilen algoritmanın ürettiği elektrik alan genliği verisidir. Turkuaz (%64 örnekleme) ve mor (%24 örnekleme) ile gösterilen veriler, eğitim verilerinin %64 ve %24'ü kullanılarak geliştirilen algoritmanın sonuçlarıdır. Eğitilen veri sayısının azalması, makine öğrenmesi algoritmasının performansını olumsuz etkilediği görülmektedir.

Eğitim verilerinin doğru tayin edilmesi algoritmanın doğru modellenmesi için önemlidir. Aynı zamanda iyi geliştirilmiş bir algoritmanın farklı test verilerine etkisi de makine öğrenmesi algoritmalarının pratikteki kullanımlarında yer almaktadır. Yakın alan ve uzak alan verileri nümerik programlar ile elde edildiği için laboratuvar ortamlarında meydana gelebilecek bazı etkileri içermemektedir. Bu etkilerden biri gürültü verisidir. Laboratuvarda kullanılan ekipmanlardan ve çalışma ortamından kaynaklanan gürültü, ölçülen yakın ve uzak alan verilerini etkilemektedir. Gürültü etkilerini elektrik alan

verilerine eklemek için MATLAB’da bulunan **randn** fonksiyonu kullanılmıştır. Fonksiyon normal dağılımlı rassal veri üretmektedir. Test için $\theta = 0^\circ$ ve $\phi = \pm 6.5420^\circ$ açılarında 70 farklı açıda ölçüm alınmıştır. Açı çözünürlüğü 0.1869° olarak belirlenmiştir. Her açı ölçümü için $8.28 - 10.28 \text{ GHz}$ frekans aralığında toplamda 70 farklı frekansta ölçüm alınmıştır. Frekans çözünürlüğü 28.57 MHz olarak belirlenmiştir. Hedefler yatay polarizasyonda aydınlatılıp, yatay polarizasyonda ölçüm alınmıştır. Test için 4900 adet veri toplanmıştır. Elde edilen 4900 adet verinin %10 ve %25’i varyansında gürültü verisi eklenerek yeni veriler elde edilmiştir. Bu sayede gürültüsüz, %10 varyans gürültülü ve %25 varyans gürültülü test verileri üretilmiştir. Algoritmanın elde edilen test verileri ile ürettiği uzak elektrik alan sonuçları Şekil 3.12’te gösterilmiştir.



(a)



(b)

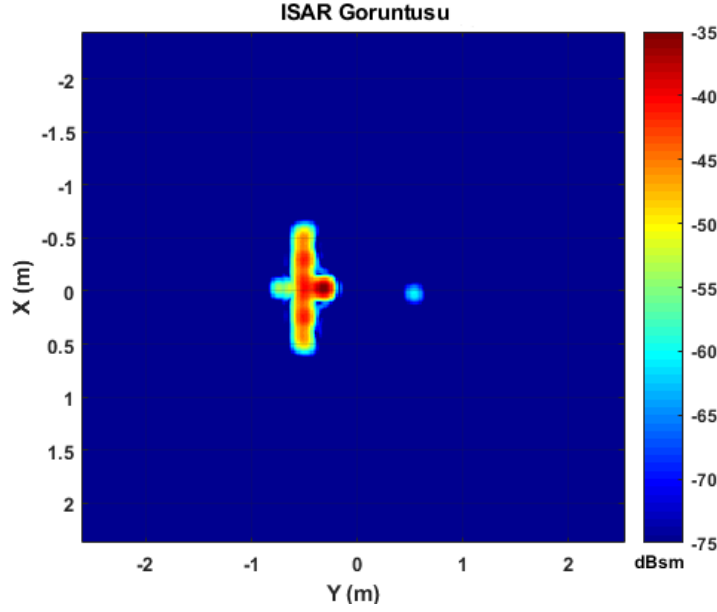
Şekil 3.12 (a) Farklı gürültü seviyesindeki test verilerinde algoritmanın ürettiği elektrik alan genliklerinin sonuçları (b) Farklı gürültü seviyesindeki test verilerinde algoritmanın ürettiği elektrik alan fazlarının sonuçları

Siyah veri (Gürültüsüz), elektrik alan verilerine gürültü ekmeden algoritmada test edilen verilerin sonucudur. Yeşil (%10 varyans) ve kırmızı (%25 varyans) veri, elektrik alan verilerinin %10 ve %25 varyans değerlerinde gürültü eklenerek algoritmada test edilen verilerin sonuçlarıdır. Gürültü seviyesinin artması algoritmanın ürettiği genlik ve faz sonuçlarındaki hata miktarını arttırdığı görülmektedir.

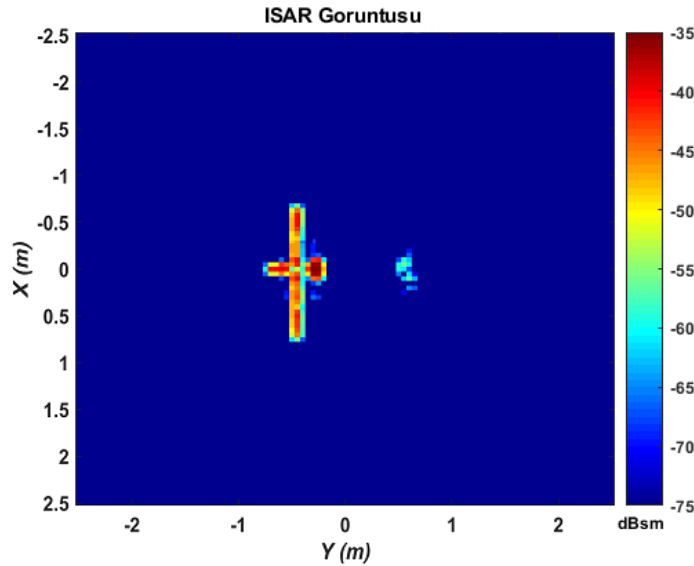
3.4. Ters Yapay Açıklıklı Görüntü Sonuçları

Algoritmanın testleri için, elektrik alan sonuçlarından ayrı olarak TYAR görüntü sonuçlarının da incelenmesi önem arz etmektedir. Saçılma merkezlerinin elde edilmesi için TYAR görüntülerine ihtiyaç vardır. TYAR görüntüleri elde edilirken dar açı yaklaşımı için $\theta = 0^\circ$ olacak şekilde ϕ açısından ∓ 6.4284 aralığında toplamda 70 noktada ölçüm alınmıştır. Açı aralığının dar olması $\sin\phi \cong \phi$ yaklaşımının kullanılmasını sağlar. Bant genişliği olarak 2000 MHz seçilmiş ve 70 farklı frekans noktasında ölçüm alınmıştır. Açı çözünürlüğü 0.178° , frekans çözünürlüğü 28.57 MHz

olarak belirlenmiştir. Bu parametreler ile elde edilen 70x70 boyutundaki geri saçılan elektrik alan bilgisi MATLAB kullanılarak sıfır doldurma yöntemiyle boyutu 280x280'e arttırılmıştır, bu sayede görüntü kalitesinde artış hedeflenmiştir. Son olarak boyutu arttırılan geri saçılan elektrik alan matrisinin Ters Fourier Dönüşümü alınarak TYAR görüntüsü elde edilmiştir. MATLAB kullanılarak elde edilen TYAR görüntüsü Şekil 3.13 (a)'da, FEKO programının TYAR görüntüleme modülü ile elde edilen görüntü Şekil 3.13 (b)'de gösterilmiştir



(a)



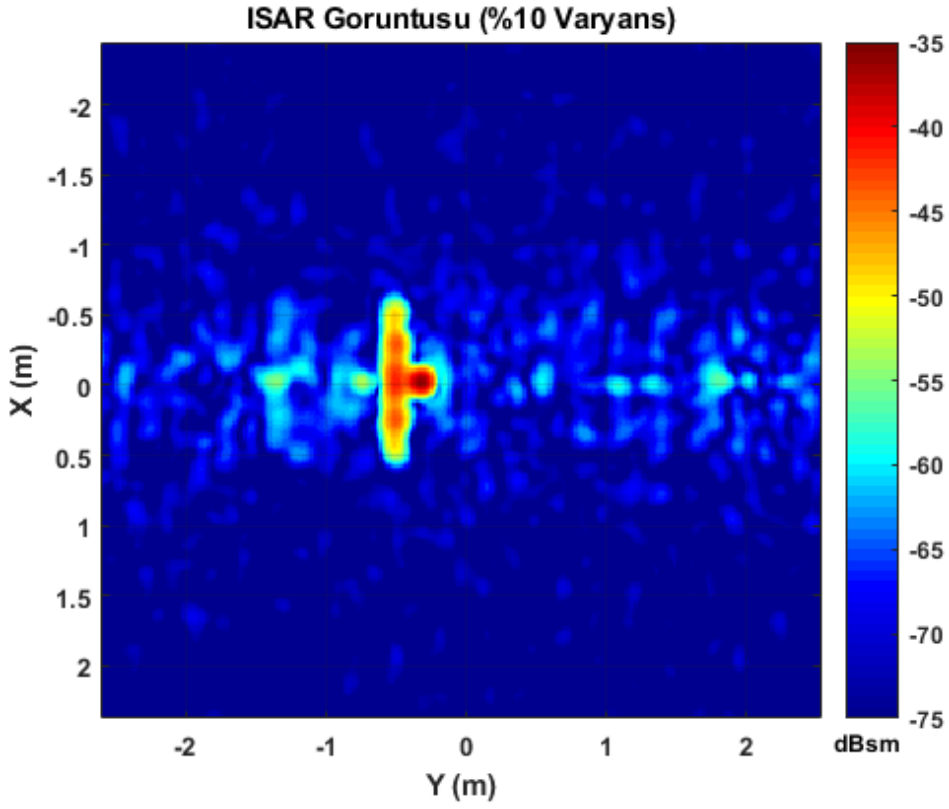
(b)

Şekil 3.13 (a) MATLAB ile elde edilen TYAR görüntüsü (b) FEKO TYAR modülü ile elde edilen TYAR görüntüsü

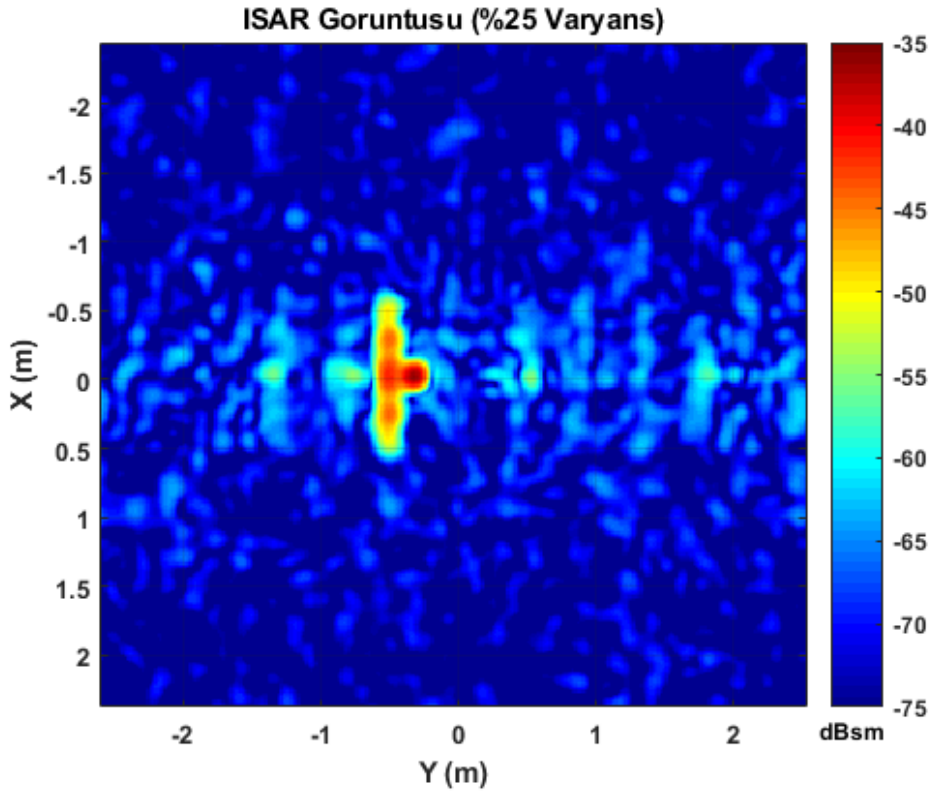
TYAR görüntüleri oluşturulurken saçılan elektrik alan bilgisi üzerinden işlem yapıldığı için TYAR görüntüsünde kırmızıya yakın olan bölümler saçılımın en çok olduğu yerleri göstermektedir. Aynı zamanda FEKO programının gelişmiş üçgen ağ yaratma kabiliyeti sayesinde, keskin köşeler oval köşelere nazaran daha iyi modellenir. Bundan dolayı keskin köşelerden saçılan alanlar oval köşelere göre daha büyük genliktedir. FEKO TYAR modülü ile elde edilen TYAR görüntüsünü, tez kapsamında geliştirilen MATLAB kodu ile elde edilen TYAR görüntüleri arasındaki farklılığın sebebi, TYAR pencere çözünürlüklerinin aynı olmamasından kaynaklanmaktadır. FEKO TYAR modülünde bulunan çözünürlük değeri MATLAB'a göre düşük kalmaktadır. Şekil 3.13'te TYAR görüntüsü verilen hedefin geometrisi Şekil 3.4'te verilmiştir. Elde edilen TYAR görüntülerinde kullanılan elektrik alan verileri analiz ile elde edilmiştir. Laboratuvar ortamında veya açık alanda elde edilen elektrik alan verilerinde gözlemlenebilecek olan gürültü fenomeni, analiz ortamında elde edilen elektrik alan verilerinde bulunmamaktadır. Gürültünün TYAR görüntülerine etkisi bir sonraki bölümde açıklanmıştır.

3.4.1. TYAR Görüntülerinde Gürültünün Etkisi

Gerçek uygulamalarda (kontrollü oda veya açık alan) elde edilen elektrik alan bilgisi, Doppler kayması, zaman gecikmesi, gürültü gibi etkiler nedeniyle, FEKO gibi nümerik elektromanyetik yazılımlardan elde edilen elektrik alan bilgisinden farklı bilgiler taşır. TYAR görüntüleri oluşturulmadan önce elde edilen elektrik alan bilgilerinden bu etkilerin arındırılması gerekmektedir. Geliştirilen algoritma, gürültülü yakın elektrik alan bilgilerini kullanarak uzak elektrik alan bilgisini üretir. Üretilen uzak elektrik alan bilgisi kullanılarak elde edilen TYAR görüntüleri Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'da verilmiştir.



Şekil 3.14 %10 varyans gürültülü elektrik alan verisi ile elde edilen TYAR görüntüsü

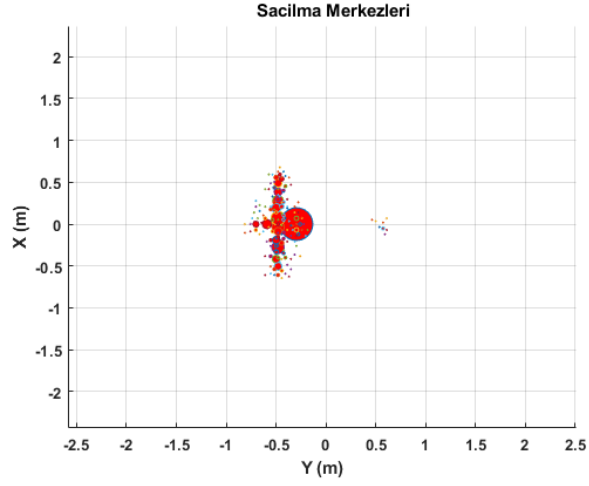


Şekil 3.15 %25 varyans gürültülü elektrik alan verisi ile elde edilen TYAR görüntüsü

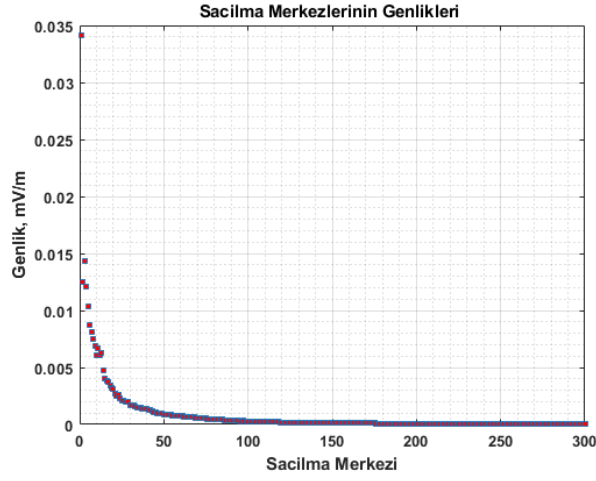
Kapalı alan laboratuvar ölçümlerinde gürültü varyansı %10, açık alan ölçümlerinde ortam kontrolsüz olduğu için %25 gürültü varyansı yaklaşımı yapılarak TYAR görüntüleri oluşturulmuştur. Eğitilen makine öğrenmesi algoritması, gürültüsüz veriler için eğitilmiştir. Yakın alan ifadelerine gürültü eklendiği zaman algoritmanın tahmin ettiği uzak alan ifadelerinde sonuçlar idealden sapmaktadır. Yakın alan verilerine eklenen gürültü oranı arttıkça, algoritmanın tahmin etme olasılığı düştüğü görülmektedir. Şekil 3.14 ve Şekil 3.15’da verilen görüntülerin gürültülü olmasının sebebi, algoritmanın ürettiği uzak alan ifadelerinin ideal uzak alan ifadelerinden farklı olmasıdır. TYAR görüntüleri kıyaslandığında, gürültünün görüntü oluşumunu kötü etkilediği ancak algoritmanın hedef saçılımlarını ideal sonuçlara yakın şekilde tahmin ettiği görülmektedir.

3.4.2. Gürültünün Saçılma Merkezlerine ve Yeniden Oluşturulan TYAR Görüntülerine Etkisinin Sonuçları

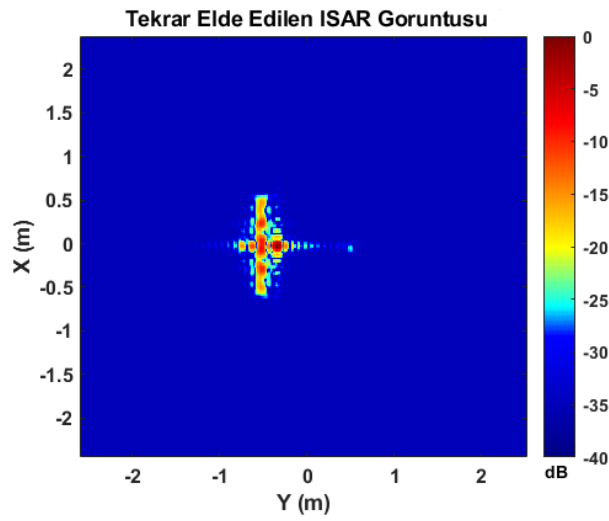
Tezin amaçlarından biri, yüksek çözünürlüklü veri ile eğitilen algoritmanın az sayıda ölçümü yapılan yakın alan verilerini kullanarak hedefin saçılma merkezlerini elde etmektir. Daha kötü açı ve frekans çözünürlüğünde elde edilen yakın alan ölçüm verileri ile saçılma merkezlerinin elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu sayede ölçüm sayısı azalmakta ve ölçüm süreleri düşmektedir. Ölçümlerde meydana gelen gürültünün, yakın alan verisine etkisini incelemek için gürültüsüz, %10 ve %25 varyans gürültülü yakın alan verileri elde edilerek makine öğrenmesi algoritması test edilmiştir. Algoritmanın ürettiği uzak alan verileri CLEAN algoritmasında kullanılarak saçılma merkezleri elde edilmiştir. Elde edilen saçılma merkezleri, genlikleri ve yeniden oluşturulan TYAR görüntüleri Şekil 3.16, Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’da gösterilmiştir.



(a)

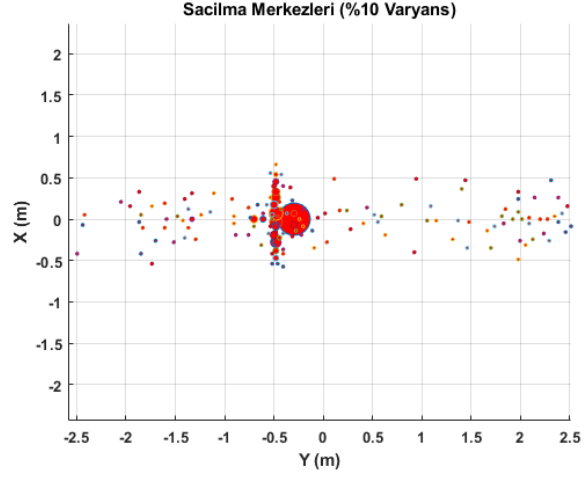


(b)

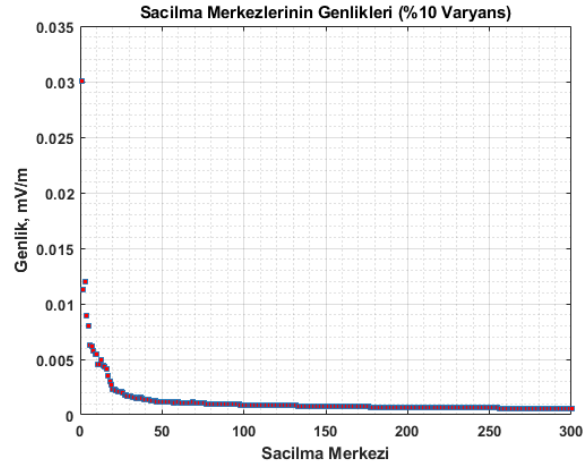


(c)

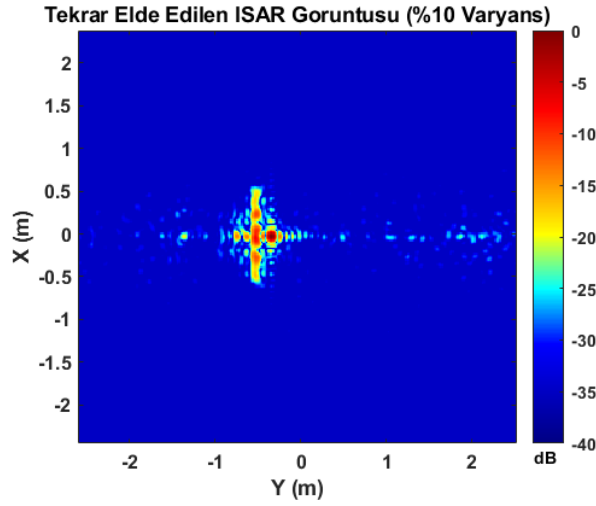
Şekil 3.16 (a) Gürültüsüz elektrik alan bilgisi ile elde edilen saçılma merkezleri (b) Saçılma merkezlerinin genliği (c) Tekrar elde edilen TYAR görüntüsü



(a)

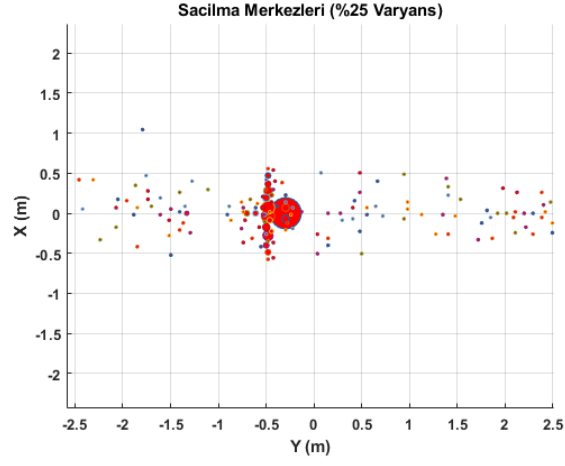


(b)

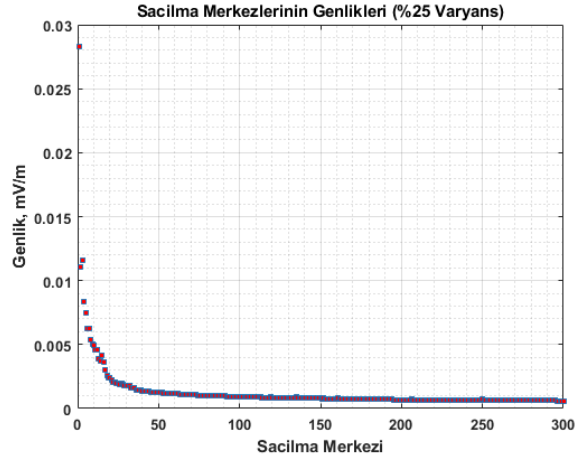


(c)

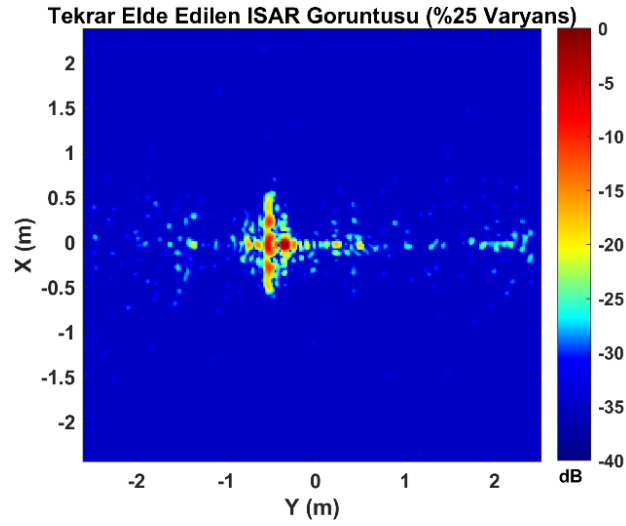
Şekil 3.17 (a) %10 varyans gürültülü elektrik alan bilgisi ile elde edilen saçılma merkezleri (b) Saçılma merkezlerinin genliği (c) Tekrar Elde edilen TYAR görüntüsü



(a)



(b)



(c)

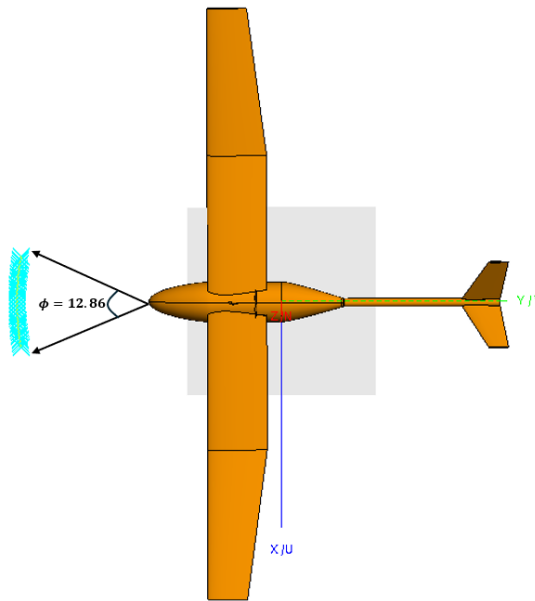
Şekil 3.18 (a) %25 varyans gürültülü elektrik alan bilgisi ile elde edilen saçılma merkezleri (b) Saçılma merkezlerinin genliği (c) Tekrar Elde edilen TYAR görüntüsü

CLEAN algoritmasında, saçılma merkezleri genliklerine göre sıralanır. En büyük genliğe sahip olan saçılma merkezi ilk sıraya alınır. Belirlenen eşik değerine kadar iterasyon şeklinde genlik değerleri çıkartılır. Saçılma merkezleri, elde edilen genliklerin TYAR penceresi üzerinde karşılık gelen yerlerinde oluşturulur. Bu sayede hedefin hangi noktasında maksimum saçılma olduğu görülür. Oluşturulan saçılma merkezleri kullanılarak TYAR görüntüleri tekrar elde edilir.

Üç durum incelendiğinde, gürültü seviyesinin artması saçılma merkezlerinin genliklerinde azalmaya sebep olduğu görülmüştür. Gürültünün eklenmesi elektrik alan değerlerinin rassal olarak bazı noktalarda azalmasına bazı noktalarda artmasına neden olur. Bundan dolayı TYAR görüntülerinde beklenmeyen piksellerde ışımalar görülmüştür. Gürültüsüz elektrik alanı ile elde edilen saçılma merkezleri hedefin üzerinde yoğunlaşmışken, gürültünün artmasıyla hedef üzerinde olmayan ancak gürültünün etkisiyle farklı saçılma noktaları oluştuğu görülmüştür.

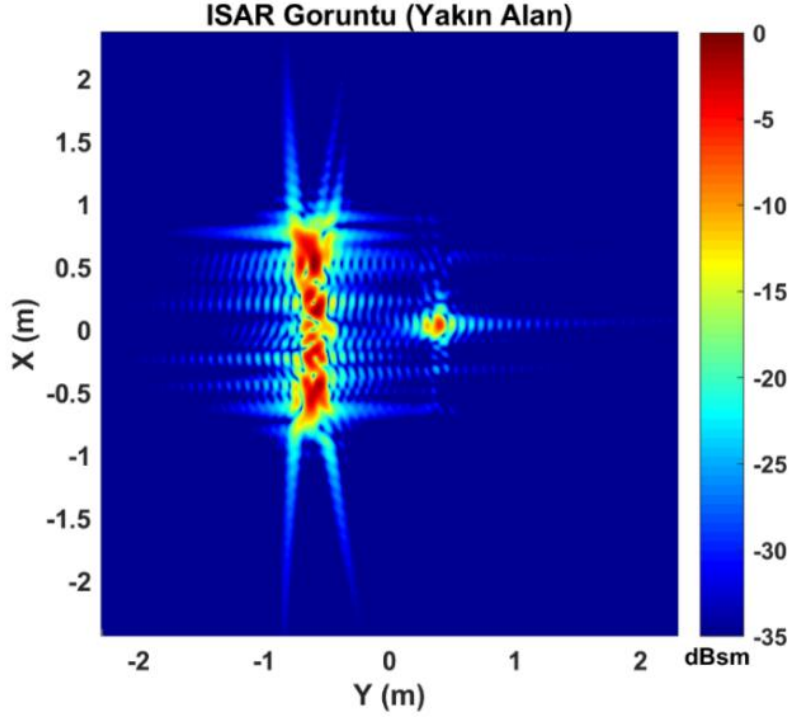
3.4.3. Yakın Alan TYAR Sonuçları

TYAR görüntüleme problemlerinde bazı durumlarda hedefin yakın alan görüntülenmesi gerekmektedir. Havaalanı gibi güvenliğin önemli olduğu durumlarda, silahların ve kesici aletlerin tespit edilmesi yakın alan görüntülenmesine güzel örnektir. Ancak yakın alan görüntülemelerde kullanılan TYAR teknikleri uzak alandan farklılık göstermektedir. Şekil 3.19’de TYAR düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 3.19 Yakın alan TYAR görüntüsü için FEKO düzeneği

Mavi ile gösterilen yapılar, yakın alan problemlerinin tarama yüzeyini gösterir. Tez boyunca elde edilen TYAR görüntüleri için elektrik alanlarının toplanması gereken açı aralığı ∓ 6.43 seçilmiştir. Toplamda 70 farklı açı noktasında ölçüm alınmıştır ve her açı noktası için 70 farklı frekansta veri toplanmıştır. Elde edilen yakın alan verileri kullanılarak direkt elde edilen yakın alan TYAR görüntüsü Şekil 3.20’de gösterilmiştir.



Şekil 3.20 Yakın Alan Verileri ile elde edilen TYAR görüntüsü

Yakın alan verileri ile elde edilen TYAR görüntüsünde hedeften fazla ışınma meydana gelmiştir. Geri projeksiyon algoritması gibi algoritmalar kullanılarak bu etkileri minimize ederek uzak alan TYAR görüntülerini elde etmek mümkündür. Ancak bu yaklaşım için gereken dönüşüm algoritmaları hesaplama sürelerini uzatmaktadır. Bu yüzden TYAR görüntülemenin uzak alan verilerinin kullanılarak elde edilmesi pratik uygulamaların çoğunluğunu oluşturmaktadır.

3.4.4. İnterpolasyon Metodunun Yakın Alan Ölçümü Sayısına Etkisi

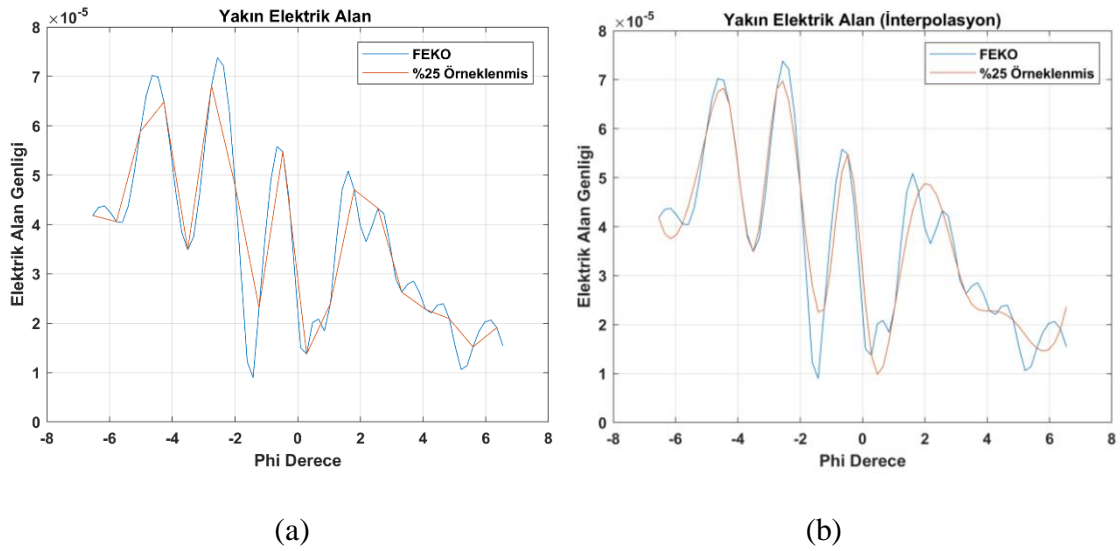
Tez kapsamında geliştirilen yakından uzak alana dönüşüm algoritması ile dönüşüm süreleri kısalmıştır. Ölçüm süresini daha da kısaltmak için yapılan son çalışma, dönüşüm algoritmasının ihtiyaç duyduğu yakın alan veri sayısından daha az sayıda ölçüm alıp interpolasyon metodu kullanarak algoritmanın ihtiyacı olan ölçüm sayısına ulaştırmaktır. Makine öğrenmesi ile geliştirilen algoritmaya yakın elektrik alan bilgileri girdi olarak

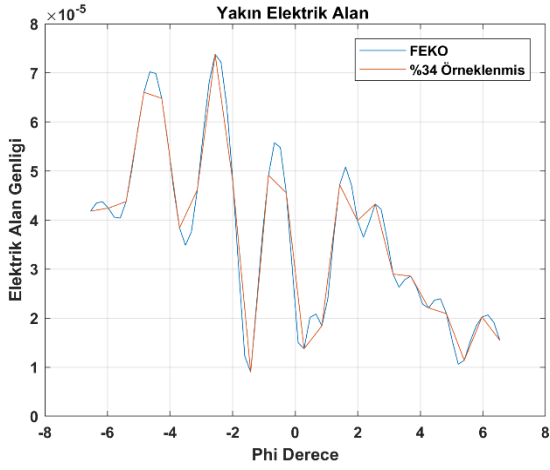
verilir. Algoritma sonucunda elde edilen uzak elektrik alan sayısı yakın elektrik alan girdi sayısı kadardır.

Örnek olarak, TYAR görüntüleri oluşturulması için $\pm 6.5420^\circ$ açı aralığında toplamda 70 farklı açıda uzak elektrik alan verisine ihtiyaç vardır. Tez kapsamında geliştirilen makine öğrenmesi algoritması için 70 farklı açıda yakın elektrik alan girdisi sağlanmalıdır çünkü algoritmanın 70 farklı açıdaki uzak elektrik alan verisini üretmesi için 70 farklı açıdaki yakın alan verisine ihtiyacı vardır. Yapılan son çalışmada yakın alan verilerini 70 farklı ölçüm yerine daha az sayılarda toplayıp, interpolasyon ile yeteri sayıya çıkarmayı hedeflemektedir.

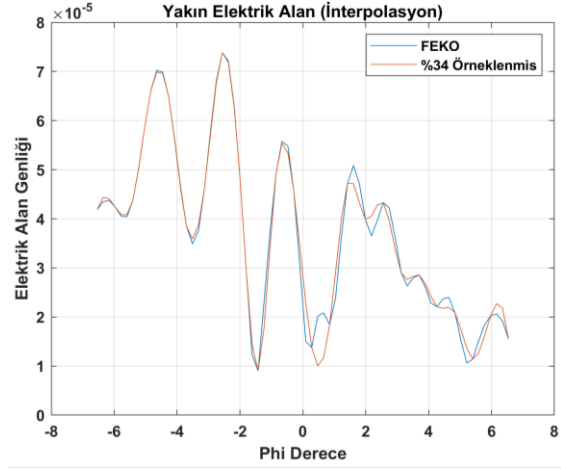
Test için $\theta = 0^\circ$ ve $\phi = \pm 6.5420^\circ$ açılarında 17, 24, 35 ve 70 farklı açıda ölçüm alınmıştır. Açı çözünürlükleri sırasıyla 0.7696° , 0.545° , 0.3738° , 0.1869° olarak belirlenmiştir. Hedefler yatay polarizasyonda aydınlatılıp, yatay polarizasyonda ölçüm alınmıştır. 17, 24 ve 35 sayılarındaki yakın elektrik alan ölçümleri, MATLAB’da bulunan **interp1** fonksiyonu kullanarak 70 ölçüm sayısına interpolasyon metodu ile yükseltilmiştir. İnterpolasyon metodlarından *spline* metodu kullanılmıştır.

Elde edilen farklı sayıdaki yakın elektrik alanlarının interpolasyonlu sonuçları Şekil 3.21’de gösterilmiştir.

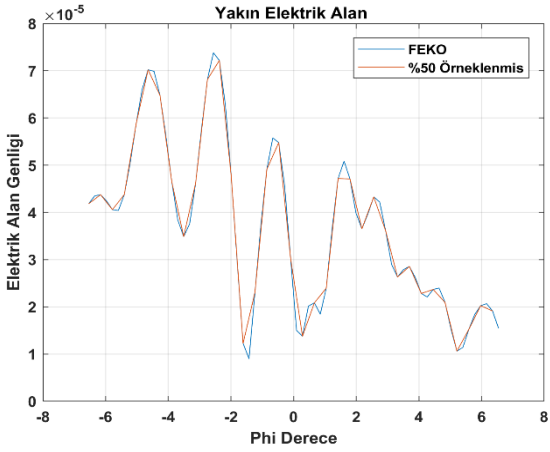




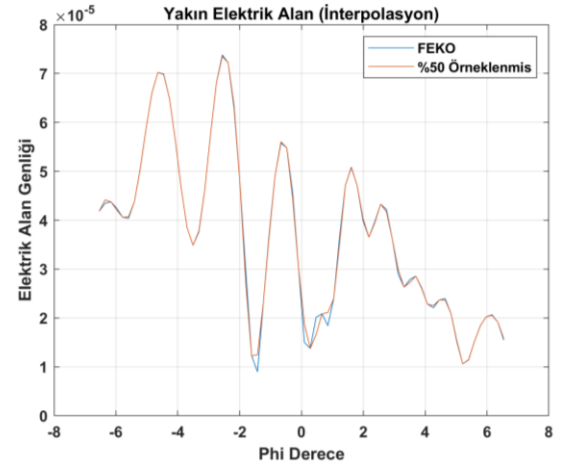
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 3.21 (a) %25 örneklenen elektrik alan verisi, (b) %25 örneklenen elektrik alan verisinin interpolasyon edilmiş hali, (c) %34 örneklenen elektrik alan verisi (d) %34 örneklenen elektrik alan verisinin interpolasyon edilmiş hali (e) %50 örneklenen elektrik alan verisi (f) %50 örneklenen elektrik alan verisinin interpolasyon edilmiş hali

Şekil 3.21 (a)'da mavi (FEKO) ile gösterilen grafik FEKO ile üretilmiş 70 farklı açıdaki yakın elektrik alanının genliğidir. Kırmızı (%25 Örneklenmiş) ile gösterilen grafik 70 farklı açıdaki değerlerin %25 oranında örneklenmiş halidir. Kırmızı grafik (%25 Örneklenmiş), 17 farklı açıdaki yakın elektrik alanının genliğidir. %25 oranında örneklenmiş grafiğin interpolasyon edilmesi ile elde edilen yeni grafik Şekil 3.21 (b)'de gösterilmiştir. Şekil 3.21 (c)'de örnekleme sayısı artırılarak, 24 farklı açıdaki yakın elektrik alanının genliği kırmızı (%34 Örneklenmiş) grafik ile gösterilmiştir. %34 oranında örneklenmiş grafiğin interpolasyon edilmesi ile elde edilen yeni grafik Şekil 3.21 (d)'de gösterilmiştir. Şekil 3.21 (e)'de örnekleme sayısı artırılarak, 35 farklı açıdaki yakın elektrik alanının genliği

kırmızı (%50 Örneklenmiş) grafik ile gösterilmiştir. %50 oranında örneklenmiş grafiğin interpolasyon edilmesi ile elde edilen yeni grafik Şekil 3.21 (f)'de gösterilmiştir. Örneklem sayısının artması ile interpolasyon sonucu FEKO verilerine yaklaşmaktadır. İnterpolasyon metodunun etkisi Şekil 3.21 (f)'de gözükmemektedir. Yarı sayıda ölçüm (%50 örneklenmiş) sonucuna interpolasyon metodu uygulandığında, FEKO sonuçlarına çok yakın değerler elde edildiği görülmüştür. Bu sayede ölçüm süresi yarıya inmektedir. Gürültü filtreleme devreleri kullanılan TYAR görüntüsü uygulamalarında, elde edilen yakın alan verileri daha yüksek hata değerleri ile kabul edilebilir ve bu sayede ölçüm süreleri daha da azaltılabilir.

4.SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında yakın elektrik alan ölçümlerinin uzak elektrik alan verisine dönüştürülürken gerçekleştirilen analiz ve ölçüm sürelerinin kısaltılması için makine öğrenmesi tabanlı dönüşüm algoritması geliştirilmesi hedeflenmiştir. Algoritma geliştirilmeden önce, geleneksel yöntemler ile yakın alan uzak alan dönüşüm algoritması MATLAB’da oluşturulmuştur. Geleneksel yöntemlerde frekans ve açı çözünürlüklerinin artması, ölçüm ve hesaplama sürelerini uzatmaktadır. Bu da zaman ve para maliyetini arttırmaktadır. Geleneksel yöntemlerin ölçüm altyapılarında kullanılan ekipmanlar hassasiyeti ölçümleri etkileyebilmektedir. Geleneksel yöntemlerde kullanılan yakın alan prob hassasiyetinin önemi, tarama yüzeyinin genişliğinin ve uzaklığını dönüşüme olan etkisi Bölüm 3.2’de irdelenmiştir. Analitik formüllerin doğrulamaları, ALTAIR FEKO programı aracılığıyla elde edilen yakın ve uzak alan verilerinin MATLAB’da geliştirilen geleneksel dönüşüm yönteminin sonuçları ile gösterilmiştir. Teorik olarak tarama yüzeyinin genişliğinin sonsuz olması gerekmektedir ancak pratikte mümkün olmadığı için tarama yüzey genişliğinin, dönüşüm sonucuna etkisi tartışılmıştır. Genişliğin artması daha çok ölçüm alınmasına yol açmış ve dolaylı olarak ölçüm sürelerinin uzamasına neden olmuştur. Tezin temel motivasyonu olan ölçüm ve dönüşüm süresinin kısaltılması için, MATLAB Regression Learner uygulamasında bulunan makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak yakın alan ve uzak alan ifadeleri arasında ilişki geliştirilmiştir. 3 farklı hedeften toplam 3 milyon farklı yakın ve uzak alan ifadeleri ile oluşturulan farklı türdeki veri setleri kullanılmıştır. Veri setleri ile eğitilen algoritmaların sonuçları ve farklılıkları irdelenmiştir. Minimum hataya sahip algoritma ile çalışmalar yapılmıştır. En düşük hata, ağaç algoritmasından elde edildiği için MATLAB’da bulunan Fine Tree algoritması eğitim için seçilmiştir. Algoritmadaki parametrelerin optimizasyonu yapılarak hatalar azaltılmaya çalışılmıştır. Farklı parametre değerlerine göre Fine Tree algoritmasının ürettiği hata değerleri yorumlanmıştır. Optimum parametre değeri belirlenmiş ve geliştirilen algoritmanın, test verileri ile validasyonu yapılmıştır. Algoritma farklı frekans ve açılardaki elektrik alanın genlik ve faz değerleri ile test edilerek algoritmanın sonuçları karşılaştırılmıştır. Algoritmanın farklı eğitim ve test verilerinde ürettiği sonuçlar incelenmiş ve az test verilerinde algoritmanın hata miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Tezin motivasyonlarından bir diğeri, pratik uygulamalarda algoritmanın ne kadar doğruluk seviyelerinde veri üretebileceğidir. Pratik uygulamalarda elde edilen yakın elektrik alan verisi ile analiz ortamında elde edilen yakın elektrik alan

verisi arasındaki farklardan biri ortamda bulunan gürültüdür. FEKO programından elde edilen yakın elektrik alan verilerine MATLAB’da bulunan randn fonksiyonu ile gürültü eklenerek algoritma test edilmiştir. Farklı varyanslardaki gürültülerde algoritmanın ürettiği sonuçlar incelenmiş ve gürültünün sonuçları kötü etkilediği gözlemlenmiştir. Gürültünün etkileri TYAR görüntülerinde daha net gözükmemektedir.

TYAR görüntüleri MATLAB kullanılarak oluşturulmuştur. MATLAB’da oluşturulan TYAR görüntüleme algoritmasının doğruluğu FEKO programında bulunan TYAR görüntüleme modülü ile kıyaslanmıştır. Görüntülerin birbirine yakınsadığı görülmektedir. Görüntülerdeki farkların sebebi, FEKO programında bulunan TYAR algoritmasının çözünürlük değeri ile MATLAB’da oluşturulan çözünürlük değerininin uyuşmamasıdır. Gürültünün TYAR görüntülerine etkileri paylaşılmıştır. TYAR görüntülerinde bulunan hedefin ayrışması için yeterli olduğu gözükmemektedir. Görüntülerdeki gürültünün filtreler veya algoritmalar gürültünün giderilmesi, saçılma merkezlerinin belirlenmesi için önemlidir. TYAR görüntüleri elde edildikten sonra, tezin önemli diğer motivasyonu yakın alan verilerinden saçılma merkezi bilgilerinin elde edilmesidir. Gürültüsüz ve gürültülü durumlarda oluşturulan saçılma merkezleri gösterilmiştir. Gürültünün seviyesinin artması, hedef üzerinde olmayan saçılma merkezlerinin oluşmasına neden olmuştur. Bu etkiler yeniden elde edilen TYAR görüntülerinde de gözükmemektedir. Normal koşullarda gözlemlenmeyen saçılma merkezleri, gürültünün etkisiyle TYAR görüntülerinin rastgele yerlerinde oluşmuştur. Saçılma merkezlerinden elde edilen TYAR görüntülerinde de benzer etkiler gözükmemektedir. Tez kapsamında yapılan son çalışma, algoritmanın beklediği sayıdan daha az sayıda yakın elektrik alan ölçümü yapılarak algoritmanın beklediği sayıda yakın elektrik alan verisi üretmektir. Tez boyunca geliştirilen algoritma yakın ve uzak elektrik alan arasındaki ilişki üzerine eğitilmiştir. Makine öğrenmesi algoritması, verilen giriş için çıkış üretmektedir. Daha az sayıda yakın alan verilerini interpolasyon ile yeteri sayıya çıkarmak mümkündür. Farklı örneklenmiş sayılardaki yakın alan verilerine interpolasyon yapılarak istenen sayılarda yakın alan verileri üretilmiştir. Bu sayede tez, üç büyük adımda yakın alandan uzak alana dönüşüm sürecini hızlandırır. Birinci adım, yakın alan ile uzak alan verileri arasında makine öğrenmesi algoritması geliştirilmiştir. Bu sayede büyük boyutlu matrislerden ve kompleks formülasyonlardan kaynaklanan uzun işlem süresi azalır. İkinci adım, geleneksel yöntemler için gereken çok sayıda yakın alan verisi yerine az sayıda yakın alan verisine ihtiyaç duyar çünkü eğitim verileri sayesinde yakın

alan ve uzak alan arasındaki ilişki kurulmuştur. Bu sayede geleneksel yöntemlere göre daha az sayıda ölçüm alınır ve ölçüm süreleri kısalmır. Üçüncü adım, ölçülen yakın alan sayısı daha da azaltılıp interpolasyon ile alınmayan ölçüm noktalarının tahmini sağlanır, bu sayede ölçüm sayısı daha da azaltılır.

Tez kapsamında yakın alan uzak alan dönüşümü sürelerinin azalması için makine öğrenme tabanlı dönüşüm algoritması geliştirilmiş ve geleneksel yöntemlere göre daha az sayıda yakın alan verisi ile daha kısa sürede etkili sonuçlar elde edilebildiği gösterilmiştir.

Makine öğrenmesi algoritmaları birçok alanda kullanıldığı gibi elektromanyetik alanında da yaygınlaşmaktadır. Elektromanyetik alanında problem tayini iyi yapıldığı durumda makine öğrenmesi algoritmaları büyük avantaj sağlamaktadır. Bu algoritmaların en büyük avantajı geleneksel yöntemlere göre çok daha hızlı sonuç üretmesidir. Bu avantajlar göz önüne alındığında, eğitim verisini arttırarak, farklı veri türlerini de eğitim verilerine ekleyerek hataların daha da azaltılması yönünde çalışmalar yapılabilir. Tez kapsamında gürültü etkisi gözlemlenmiştir ancak gürültü etkilerini azaltıcı bir çalışma yapılmamıştır. İlerleyen çalışmalarda TYAR görüntüleri üzerinden gürültüleri azaltmak için yeni makine öğrenmesi algoritmaları geliştirilebilir. Bu sayede az sayıda yakın alan verisi kullanılarak elde edilen saçılma merkezleri çok daha az gürültü ile elde edilebilir.

5. KAYNAKLAR

- [1] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, McGraw-Hill Education, 3rd ed., **2008**.
- [2] M. A. Richards, J. A. Scheer, W. A. Holm, ve P. D. Zemaný, *Principles of modern radar: Basic principles*, SciTech Publishing, **2014**.
- [3] C. Özdemir, *Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging With MATLAB Algorithms*, Artech House, **2018**
- [4] J. E. Hansen, *Spherical Near Field Antenna Measurements*, The Institution of Engineering and Technology, Chapter 3, **1988**.
- [5] C. Apriono, Nofrizal, M. Dandy Firmansyah, F. Y. Zulkifli and E. T. Rahardjo, Near-field to far-field transformation of cylindrical scanning antenna measurement using two dimension fast-fourier transform, *2017 15th International Conference on Quality in Research (QiR) : International Symposium on Electrical and Computer Engineering*, Indonesia, pp. 368-371, **2017**, doi: 10.1109/QIR.2017.8168513.
- [6] R. Cornelius and D. Heberling, Spherical Wave Expansion With Arbitrary Origin for Near-Field Antenna Measurements, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 8, pp. 4385-4388, **Aug. 2017**, doi: 10.1109/TAP.2017.2708099.
- [7] R. Laroussi and G. I. Costache, "Far-field predictions from near-field measurements using an exact integral equation solution," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 36, no. 3, pp. 189-195, **Aug. 1994**, doi: 10.1109/15.305453
- [8] Liu, Y.; Hu, W.; Zhang, W.; Sun, J.; Xing, B.; Ligthart, L. Radar Cross Section Near-Field to Far-Field Prediction for Isotropic-Point Scattering Target Based on Regression Estimation. *Sensors*, **2020**, doi:10.3390/s20216023
- [9] R. C. Johnson, H. A. Ecker, and J. S. Hollis, *Determination of far-field antenna patterns from near-field measurements*, Proc. IEEE, vol. 61, no. 12, pp. 1668–1694, Dec. **1973**.
- [10] Petre, P., & Sarkar, T. K., Differences between modal expansion and intergral equation methods for planar near-field to far-field transformation. *Progress In Electromagnetics Research*, 12, 37–56. **1996**. doi:10.2528/pier94072300.
- [11] C. A. Balanis, *Antenna theory analysis and design*, 2nd ed. New York, N.Y. Wiley, pp. 852–854. **1997**.
- [12] A. D. Yaghjian, An overview of near-field antenna measurements, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, no. 1, pp. 30–45. Jan. **1986**. doi: 10.1109/TAP.1986.1143727.
- [13] Philip McCord Morse and H. Feshbach, *Methods of Theoretical Physics*. McGraw-Hill Science, Engineering & Mathematics, Chapter 13, **1953**.
- [14] A. Ludwig, Near-field far-field transformations using spherical-wave expansions. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 19(2), 214–220, **1971**. doi:10.1109/tap.1971.1139909.

- [15] A. Salmi, A. Lehtovuori and V. Viikari, "Surface-Wave Minimization Using Spherical Wave Expansion," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 21, no. 8, pp. 1639-1643, **Aug. 2022**, doi:10.1109/LAWP.2022.3176096.
- [16] Yaccarino, R. G., and S. R. Rengarajan. A Comparison of Two Spherical Wave Expansion Techniques. *Electromagnetics*, vol.17, no.1, pp.75–87, **1997**. doi:10.1080/02726349708908517.
- [17] Cornelius, R., & Heberling, D., Spherical Wave Expansion With Arbitrary Origin for Near-Field Antenna Measurements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.65(8), pp. 4385–4388, **2017**. doi:10.1109/tap.2017.2708099.
- [18] F. RodriguezVarela, M. SierraCastafier and B. GalochaIragüen. Multi-Level Spherical Wave Expansion for Fast Near-Field to Far-Field Transformation, *2018 AMTA Proceedings*, Williamsburg, VA, USA, **2018**.
- [19] Balanis, C.A. *Antenna Theory: Analysis and Design. 3rd Edition*. John Wiley & Sons, Hoboken., pp. 1018-1019, **2005**.
- [20] Pizzo, Andrea, et al. "Fourier Plane-Wave Series Expansion for Holographic MIMO Communications." *ArXiv (Cornell University)*, Jan. **2021**, doi:10.48550/arxiv.2105.01535.
- [21] S. Omi, T. Uno, T. Arima and T. Fujii. Efficient RCS measurement technique by near-field far-field transformation which utilize 2-D plane-wave expansion. *2015 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Hobart, TAS, Australia, **2015**, pp. 1-2.
- [22] Hansen, T. B. Exact Plane-Wave Expansion With Directional Spectrum: Application to Transmitting and Receiving Antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(8), 4187–4198. **2014** doi:10.1109/tap.2014.2327128.
- [23] R. Wu, B. -Y. Wu, P. -X. He, K. -Y. Guo and X. -Q. Sheng. A Fast Plane Wave Expansion Algorithm for Rigorous Scattering Analysis From Swarm Targets. in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 9, pp. 7426-7437, Sept. **2023**, doi: 10.1109/TAP.2023.3292483.
- [24] C. H. Schmidt, M. M. Leibfritz and T. F. Eibert. Fully Probe-Corrected Near-Field Far-Field Transformation Employing Plane Wave Expansion and Diagonal Translation Operators, in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 3, pp. 737-746, March **2008**, doi: 10.1109/TAP.2008.916975.
- [25] K. Takizawa, Y. Watanabe and K. Fujiwara, "Estimation of electromagnetic far-field from near-field using machine learning," *2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Osaka, Japan, **2021**, pp. 119-120, doi: 10.23919/ISAP47053.2021.9391276.
- [26] R. R. Alavi, R. Mirzavand and P. Mousavi. Fast and Accurate Near-Field to Far-Field Transformation Using an Adaptive Sampling Algorithm and Machine Learning, *2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, Atlanta, GA, USA, **2019**, pp. 225-226, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8888868.

- [27] Z. Yang, J. -J. Ju, G. -P. Zou and X. -C. Wei. Reactive Near-field to 3-Meter Field Transformation Based on Artificial Neural Networks, *2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)*, Nusa Dua - Bali, Indonesia, **2021**, pp. 1-3, doi: 10.1109/APEMC49932.2021.9596690.
- [28] Y. Gu, X. Zhang and D. van der Weide. Deep Learning Accelerated Antenna Radiation Pattern Prediction for Undersampled Near-Field to Far-Field Transformation, *2023 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (USNC-URSI)*, Portland, OR, USA, **2023**, pp. 33-34, doi: 10.1109/USNC-URSI52151.2023.10238009.
- [29] Y. Zhao, J. Jiang and L. Miao. RCS prediction of polygonal metal plate based on machine learning, *2021 International Applied Computational Electromagnetics Society (ACES-China) Symposium*, Chengdu, China, **2021**, pp. 1-2, doi: 10.23919/ACES-China52398.2021.9582086.
- [30] Jinran Qie, Erfan Khoram, Dianjing Liu, Ming Zhou, and Li Gao. Real-time deep learning design tool for far-field radiation profile, *Photonics Research*, vol.9, **2021**. doi:10.1364/PRJ.413567.
- [31] Yao, H. M., Sha, W. E. I., & Jiang, L. J., Applying Convolutional Neural Networks For The Source Reconstruction. *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 76, pp. 91–99. **2018**. doi:10.2528/pierm18082907.
- [32] H. M. Yao, M. Li and L. Jiang. Applying Deep Learning Approach to the Far-Field Subwavelength Imaging Based on Near-Field Resonant Metalens at Microwave Frequencies, in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 63801-63808, **2019**, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2915263.
- [33] J. Cao et al., Efficient Scattering Center Prediction Method for Targets With Coating Defects Through Deep Learning, in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 70, no. 12, pp. 5319-5331, Dec. **2022**, doi: 10.1109/TMTT.2022.3213733.
- [34] Tianxu Yan, Dongying Li, and Wenxian Yu. Scattering response modeling scheme based on combined neural network inspired by the equivalent scattering center, *Optics Express*, vol.30, pp. 7275-7290, **2022**, doi:10.1364/OE.449621.
- [35] R. G. Ayestarán & F. Las-Heras. Near Field to Far Field Transformation Using Neural Networks and Source Reconstruction, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, pp.2201-2213, **2006**, doi:10.1163/156939306779322594.
- [36] M. I. Skolnik. *Introduction to radar systems 2nd edition*. **1980**.
- [37] A. V. Osipov and S. A. Tretyakov, *Modern electromagnetic scattering theory with applications*, John Wiley & Sons., pp.565–633. Chichester, Feb. **2017**. doi:10.1002/9781119004639.
- [38] Narayan, S. *Handbook of metamaterial-derived frequency selective surfaces*. Springer, **2023**
- [39] N. P. Bhatta and M. G. Priya, “RADAR and its Applications”, *International Journal of Control Theory and Application*, vol. 10, no. 3, pp. 1-9, **2017**.
- [40] Caner Ozdemir. *Inverse synthetic aperture radar imaging with MATLAB algorithms*, volume 210. John Wiley & Sons, **2012**.

- [41] Högbom, J. A. and Tim J. Cornwell. Aperture synthesis with a non-regular distribution of interferometer baselines commentary, *Astronomy and Astrophysics (A&A)*, vol.500, **1974**. doi:10.1088/0957-0233/2/1/001.
- [42] R, M. Barrett and M. H. Barnes. Automatic antenna wavefront plotter, *Electronics*, vol. 25, pp. 120-125, Jan. **1952**.
- [43] L. Clayton, J.S. Hollis, and H. H. Teegardin, "A wide frequency range microwave phase-amplitude measuring system" in *Abstracts 11th Annu. USAF Symp.*, Antenna Research Development, Univ. Illionis, Oct. **1961**.
- [44] J. Brown and E. V. Jull. The prediction of aerial radiation patterns from near-field measurements, *Proc. Inst. Elec. Eng.*, vol. 108B, pp. 635-644, Nov. **1961**.
- [45] D. M. Kerns, "Analytical techniques for the correction of near-field antenna measurements made with an arbitrary but known measuring antenna," in *Abstracts of URSI-IRE Meeting*, Washington, DC, May **1963**.
- [46] R. C. Baird, "Antenna measurements with arbitrary probes at arbitrary distance" in *High Frequency and Microwave Field Strength Precision Measurement Seminar*, NBS Rep. 9229, May **1966**.
- [47] L. J. Foged, M. H. Francis and V. Rodriguez. Update of IEEE Std 1720-2012 Recommended Practice for Near-Field Antenna Measurements, *2019 Antenna Measurement Techniques Association Symposium (AMTA)*, San Diego, CA, USA, pp. 1-3, **2019**. doi: 10.23919/AMTAP.2019.8906313.
- [48] "Fan-Beam Antenna Radartutorial, <https://www.radartutorial.eu/06.antennas/Fan%20beam%20antenna.en.html> (Erişim tarihi: **28 Nisan 2024**).
- [49] C. A. Balanis, *Modern antena handbook*. Hoboken: John Wiley & Sons, Cop, **2008**.
- [50] Paris, D. T., W. M. Leach, Jr., and E. B. Joy. Basic theory of probe-compensated near-field measurements, *IEEE Trans. On Antennas and Propagation*, Vol. AP-26, No. 3, 373-379, **1978**.
- [51] G. Bonaccorso. *Machine learning algorithms : popular algorithms for data science and machine learning*, Birmingham, U.K.: Packt Publishing Ltd, **2018**, ISBN-13: 978-1789347999.
- [52] Navada, A., Ansari, A. N., Patil, S., & Sonkamble, B. A. Overview of use of decision tree algorithms in machine learning, *IEEE Control and System Graduate Research Colloquium*. **2011**, doi:10.1109/icsgrc.2011.5991826.
- [53] H. R. Bittencourt and R. T. Clarke. Use of classification and regression trees (CART) to classify remotely-sensed digital images, *IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings*, France, pp. 3751-3753 vol.6, **2003**. doi: 10.1109/IGARSS.2003.1295258.
- [54] Kristensson, Gerhard. *Scattering of electromagnetic waves by obstacles*. Scitech. p. 295. **2016**, ISBN 978-1-61353-222-5.
- [55] A. B. Nassif, M. Azzeh, L. F. Capretz and D. Ho, "A comparison between decision trees and decision tree forest models for software development effort estimation," *2013 Third International Conference on Communications and Information Technology (ICCIT)*, Beirut, Lebanon, pp. 220-224., **2013**, doi: 10.1109/ICCITechnology.2013.6579553.