

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İLETKEN TEL SAÇICILARIN TESPİTİ VE MUSIC YÖNTEMİ KULLANILARAK  
ELEKTROMANYETİK GÖRÜNTÜLENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**İsmail KURTOĞLU**

**ŞUBAT 2021  
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İLETKEN TEL SAÇICILARIN TESPİTİ VE MUSIC YÖNTEMİ  
KULLANILARAK ELEKTROMANYETİK GÖRÜNTÜLENMESİ**

**İsmail KURTOĞLU**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**  
**"DOKTOR (ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ)"**  
**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12 / 01 / 2021**

**Tezin Savunma Tarihi : 09 / 02 / 2021**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR**

**Trabzon 2021**

## ÖNSÖZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik–Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı çerçevesinde hazırlanmış olan bu tez çalışmasında, iletken tel saçıcıların tespiti ve MUSIC yöntemi kullanılarak görüntülenmesi benzetim ve deneysel doğrulamalar ile çalışılmıştır.

Tez çalışmam süresince bilimsel bakış açısı, mesleki altyapısı, sonsuz inancı, güveni ve değerli görüşleriyle bana her aşamada yardımcı olup yön gösteren değerli danışmanım Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR’a, yine tez çalışmam süresince bilimsel ilerlemelerimdeki değerli katkılarından ötürü Prof. Dr. Murat EKİNCİ’ye ve Dr. Öğr. Üyesi. Haydar KAYA’ya teşekkürü bir borç bilirim. Bu süreçte, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümü laboratuvar, test ve ölçme cihazlarını kullanmam için verdiği destek ve bilimsel yönlendirmeler için Prof. Dr. İbrahim AKDUMAN’a ve İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği bölümü yönetimine teşekkürü bir borç bilirim. Bu tez çalışmasında, beni teorik, teknik ve isteklendirme olarak yönlendiren, takıldığım konularda sorunları çözmeme destek olan değerli dostum ve çalışma arkadaşım Doç. Dr. Mehmet ÇAYÖREN’e teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışma sürecince, Karadeniz Teknik Üniversitesi Doktora yolculuğum boyunca, bana sağladığı tüm destek, öneri ve yardımdan ötürü, arkadaşım Dr. Öğr. Üyesi Zeynep HASIRCI TUĞCU’ya teşekkürü bir borç bilirim.

Sadece tezimin değil hayatımın her aşamasında beni yalnız bırakmayan, bana inanarak desteklerini esirgemeyen aileme başta eşim Y. Müh. Mehtap KURTOĞLU ve canım kızım Defne Su KURTOĞLU olmak üzere sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Profesyonel çalışma hayatım ve doktora çalışmam süresince bana her türlü desteği veren, yönlendiren, ufkumu açan çalışma arkadaşım Y.Müh. Güray Ali CANLI’ya teşekkürü bir borç bilirim.

Yapılan tez çalışmasından elde edilen çıktıların gerek bilimsel gerekse endüstriyel açıdan konu hakkında çalışan diğer araştırmacılara ve ülkemizin gelişmesine katkıda bulunması temennilerimle.

İsmail KURTOĞLU

Trabzon 2021

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “ İletken tel Saçıcıların Tespiti ve MUSIC yöntemi kullanılarak Elektromanyetik Görüntülenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 9/02/2021.

İsmail KURTOĞLU

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	IX
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Problem Tanımı, Bu Çalışma İçin Seçilme Sebebi ve Potansiyel Uygulama Alanları .....	4
1.2.1. Araziye Yerleştirilmiş Elektrik Tellerinin Bulunması.....	4
1.2.1. Yüksek Gerilim Tellerinin Bulunması .....	7
1.3. Elektromanyetik Görüntüleme Problemi.....	8
1.3.1. İki Boyutlu Ters Saçılım Problemi.....	8
1.3.1.1. Elektromanyetik Görüntüleme Problemi Klasik Çözüm Yaklaşımları .....	11
1.3.1.2. LSM ve FM Yaklaşımı .....	12
1.3.2. MUSIC (MUltiple SIgnal Clasification) Yöntemi .....	14
1.3.2.1. MUSIC Yöntemimin Temelleri.....	14
1.3.2.2. MUSIC Yöntemimin Elektromanyetik Görüntüleme Uygulaması .....	16
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR.....	21
2.1. Giriş .....	21
2.2. Tel Saçıcı Tespiti İçin Yapılan Çalışmalar.....	21
2.2.1. Mükemmel İletken Bir silindir Kesitli Saçıcıdan, Düzlem Dalga Aydınlatmalı Alanlı Saçılım.....	23
2.2.2. Aydınlatıcı Dalga Elektrik Alanı P olarizasyon Vektörü ve Saçıcı Yönünün Saçılan Alana Etkilerinin Laboratuvar Ortamında Ölçülmesi....	26
2.2.3. Boş Referans Ölçüm Kullanılarak Yapılan Laboratuvar Deneyi .....	28
2.2.4. Boş Referans Ölçümü Kullanılmadan Yapılan Laboratuvar Deneyi .....	32
2.2.5. Gönderme ve Alma Anten Polarizasyonları Değiştirilerek Yapılan S21 ölçümleri.....	35
2.3. Benzetim Çalışmaları .....	41

2.3.1.	MUSIC Yöntemi ile İki Boyutlu Silindirik Koordinatlarda, Tel Saçıcıların Pozisyonunun Bulunması Benzetimi Çalışmaları .....	42
2.3.2.	MUSIC Yöntemi ile Üç Boyutlu Kartezyen Koordinatlarda Düz Tel Saçıcıların Şeklinin Bulunması Benzetim Çalışmaları.....	49
2.3.2.1.	MUSIC Yöntemi ile Tel Saçıcıların Şeklini Görüntüleyebilme Benzetim Çalışmaları.....	49
2.3.2.2.	MUSIC Yöntemi ile Tel Saçıcıların Şeklini Anten platformuna Çeşitli Uzaklıktaki Kesit Yüzeylerindeki Görüntüleyebilme ve Şekil Belirlenmesi Benzetim Çalışması .....	58
2.3.2.3.	MUSIC Yöntemi ile Birden Fazla Tel Saçıcı Cismi 3 Boyutlu Ayırt Edebilme, Görüntüleyebilme ve Şekillerinin Belirlenmesi Benzetim Çalışmaları.....	61
2.3.2.4.	Anten Platformu Düzlemine Dik Düzlemde Yapılan Görüntüleme.....	64
2.3.2.5.	MUSIC Yöntemi ile Aydınlatma Elektrik Alanı Yönü ve Tel Saçıcı Doğrultusu ile Olan Polarizasyon Açısının, Saçıcı Şekil, Pozisyon ve Görüntüleme Performansına Etkisi Benzetim Çalışması .....	66
2.4.	Laboratuvar Deney, Ölçme ve Doğrulama Çalışmaları .....	72
2.4.1.	MUSIC ile 2 Boyutlu Silindirik Koordinatlar ile Uyumlu Geometriye Sahip Tel saçıcıların Pozisyonlarını Görüntüleme Deneyle ve Sonuçları	72
2.4.2.	MUSIC ile 3 Boyutlu Kartezyen Koordinatlar ile Uyumlu Geometriye Sahip Tel Saçıcıların Şekillerinin Belirlenmesi ve Görüntülemesi Deney ve Sonuçları .....	81
2.4.2.1.	MUSIC Yöntemi ile Tel Saçıcı Şeklini Görüntüleme Ölçme ve Deneyle	84
2.4.2.2.	MUSIC Yöntemi ile Tel Saçıcıların Şeklini Anten platformuna Çeşitli Uzaklıktaki Kesit Yüzeyindeki Görüntüleyebilme ve Şekil Belirlenmesi Ölçme ve Deneyle .....	92
2.4.2.3.	MUSIC Yöntemi ile Birden Fazla Tel Saçıcı Cismine 3 Boyutlu Ayırt Edebilme, Görüntüleyebilme ve Şekil Belirlenmesi Ölçme Deneyle .....	95
2.4.2.4.	Anten Platform Düzlemine Dik Düzlemde Yapılan Görüntüleme.....	100
2.4.2.5.	MUSIC Yöntemi ile Aydınlatma Elektrik Alanı Yönü ve Tel Saçıcı Doğrultusu ile Olan Polarizasyon Açısının, Saçıcı Şekil, Pozisyon ve Görüntüleme Performansına Etkisi Deney ve Ölçmeleri .....	103
3.	SONUÇLAR.....	107
3.1.	Tel Saçıcıların Varlığının Tespiti Çalışması .....	107
3.2.	Tel Saçıcıların Pozisyon, Sayı ve Şekillerinin Görüntülenmesi Çalışması .	108
4.	ÖNERİLER .....	113
5.	KAYNAKLAR.....	115
	ÖZGEÇMİŞ.....	118

Doktora Tezi

ÖZET

İLETKEN TEL SAÇICILARIN TESPİTİ VE MUSIC YÖNTEMİ KULLANILARAK  
ELEKTROMANYETİK GÖRÜNTÜLENMESİ

İsmail KURTOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik–Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR  
2021, 117 Sayfa

Araziye döşenmiş tel tuzaklamalı el yapımı patlayıcı düzenekleri savunma sanayiğinde, Yüksek gerilim hatları ise alçak uçan helikopterler için tehlike oluşturmaktadır. Her iki olası uygulama için ortak payda iletken tellerin problemin bir parçası olmasıdır. İletken tel saçıcıların, elektromanyetik yöntemler kullanılarak varlığının tespiti, pozisyon, sayı ve şekillerinin bulunmasının mümkün olduğu düşünülmüştür.

Tel saçıcıların varlığının tespiti için aydınlatıcı elektrik alanı polarizasyonu ile tel saçıcı yönü arasında oluşan polarizasyon açısının kullanılarak ilgi alanındaki tel saçıcıların diğer saçıcılardan ayırt edilmesine yönelik bir yöntem araştırılmış, önerilmiş ve deneysel olarak doğrulanmıştır.

Tel saçıcıların, pozisyonlarının 3 boyutlu olarak bulunması, sayılarının tespiti ve şekillerinin görüntülenmesi elektromanyetik bir ters saçının problemi olarak değerlendirilmiş ve MUSIC (MUltiple SIgnal Clasification) yöntemi çalışılmıştır. Yöntem 2 boyutlu olarak silindirik koordinatlarda ve 3 boyutlu olarak ise Kartezyen koordinatlarda benzetim çalışmaları ile uyumlu olarak 2 boyutlu ve 3 boyutlu deney ve ölçme düzenekleri hazırlanmış ve benzetim sonuçları ile doğrulana, MUSIC yönteminin tel saçıcıların sayı, pozisyonlarını bulabildiği, saçıcı şekillerini görüntüleyebildiği deneysel olarak gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** İletken tel saçıcı, uzaktan algılama, uzaktan tespit, MUSIC, elektromanyetik ters saçının problemi, niteliksel ters saçının yöntemi, S-parametreleri

PhD. Thesis

SUMMARY

DETECTION AND ELECTROMAGNETIC IMAGING OF CONDUCTIVE WIRE  
SCATTERERS BY MUSIC ALGORITHM

İsmail KURTOĞLU

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Electrical and Electronics Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. İsmail Hakkı ÇAVDAR  
2021, 117 Pages

Wires deployed in ground to detonate IED's for defense sector and high voltage lines for low altitude flying helicopters in aeronautic sector generates threats. The common ground for those two application areas is the conductive wire structures. Detection and imaging of conductive wire scatterers is possible by electromagnetic methods.

A method is proposed, investigated and verified experimentally for detection of conductive wire scatterers based on polarization angle in between illuminating electric field and the direction of the wire scatterer.

Determination of the position and the numbers of the wire scatterers in 3 dimension, imaging of their shapes is evaluated as an inverse electromagnetic, scattering problem and solved by using MUSIC (Multiple Signal Classification) method. MUSIC method is implemented in both in 2 dimensional cylindrical and 3 dimensional Cartesian coordinate systems. MUSIC method is simulated and results are verified experimentally for both implementations.

It is shown experimentally that MUSIC method is successfully determines the location, shapes, and number of the wire scatterers in the region of interest.

**Key words:** Conductive Wire Scatterer, remote sensing, remote detection, MUSIC, electromanyetic inverse scattering problem, qulaitative inverse scattering method, S parameters



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1. MUSIC yöntemi ile çalışılan, temel problem geometrileri .....	3
Şekil 2. Telsiz Kumanda ile patlatılan yol yanına yerleştirilmiş EYP .....	5
Şekil 3 Konvoy da bulunan karıştırıcı birimin kumandayı etkisiz getirilmesi .....	5
Şekil 4. Karıştırıcı etkili menzilden tel ile uzaklaştırılmış uzaktan kumandalı düzenek....	6
Şekil 5. Sadece araziye yerleştirilmiş tel ile kurulmuş EYP düzeneği.....	6
Şekil 6. Z koordinat ekseninde sonsuz uzunlukta, rastgele kesit alanlı birden fazla sayıda saçıcı.....	8
Şekil 7. Hermetian operatör A nin sinyal ve boş uzayının öz değerlere tarafınan kapsanması .....	15
Şekil 8. MUSIC yöntemi ters saçılım problemine uygulaması problem geometrisi.....	16
Şekil 9. Aydınlatıcı dalganın tel saçıcı doğrultusu ile ve paralel elektrik alanına sahip olması durumu.....	22
Şekil 10. Mükemmel iletken sonsuz uzunluktaki silindir ve TM düzlem dalga aydınlatması.....	23
Şekil 11. Mükemmel iletken silindir için çoklu statik radar kesit alanının tel çapı ile değişimi .....	25
Şekil 12. Polarizasyon Etkisi Ölçme Deney Düzeneği.....	26
Şekil 13. SCHWARDZBECK BBHA 9120A RF Geniş bantlı Horn Anten .....	27
Şekil 14. Bir numaralı saçıcı tel (TEL 1) ölçümleri .....	29
Şekil 15. İki numaralı saçıcı tel (TEL 2) ölçümleri.....	30
Şekil 16 .Üç numaralı saçıcı tel (TEL 3) ölçümleri.....	31
Şekil 17. 5 metre uzunluğunda saçıcı .....	32
Şekil 18. Alma gönderme anteni izolasyon ölçümü.....	33
Şekil 19. 3 GHz merkezli alma gönderme anteni izolasyon ölçümü.....	33
Şekil 20. Dört tel saçıcı için S21 parametresi ölçümleri ve boş ölçüm karşılaştırması.....	34
Şekil 21. Yatay polarizasyon olarak ayarlanmış anten düzeneği fotoğrafları .....	36
Şekil 22. Yatay polarizasyon olarak ayarlanmış anten düzeneği fotoğrafları .....	36
Şekil 23. Yatay polarizasyonda yerleştirilmiş anten izolasyon ölçümü .....	37
Şekil 24. Dikey polarizasyonda yerleştirilmiş anten izolasyon ölçümü.....	37
Şekil 25. Yatay ve Düşey polarizasyonda ile saçınan alan ölçümü (TEL 3).....	38
Şekil 26. Yatay polarizasyonda TEL 3 ün boş durumuna göre ölçümleri.....	39
Şekil 27. Dikey polarizasyonda TEL 3 ün boş durumuna göre ölçümleri .....	40

Şekil 28. İki Boyutlu Silindirik Koordinatlarda Saçıcıların Pozisyonunun Bulunması Problem geometrisi .....	42
Şekil 29. Benzetim Modeli Geometrisinde yöntem tarafından görüntü oluşturulan yüzey .....	43
Şekil 30. İlgi alanında bir saçıcı bulunan benzetim Sonuçları .....	44
Şekil 31. İlgi alanında iki saçıcı bulunan benzetim Sonuçları.....	45
Şekil 32. İlgi alanında üç saçıcı bulunan benzetim Sonuçları .....	46
Şekil 33. M sınır değeri seçiminin MUSIC yönteminin çıkardığı görüntüye etkisi.....	48
Şekil 34. Kartezyen Koordinat Eksenleri ile örtüşen Benzetim Problem geometrisi.....	49
Şekil 35. Benzetim Geometrisi Şematiği.....	50
Şekil 36. Düz Tel Saçıcı .....	51
Şekil 37. Eğik yerleştirilmiş Düz Tel Saçıcı .....	53
Şekil 38. V şekli verilmiş tel saçıcı geometrisi .....	54
Şekil 39. Çengel Şeklindeki saçıcı ve M parametresinin görüntü üzerine etkisi .....	55
Şekil 40. Çengel Şeklinde Saçıcının 3 boyutlu Kesitlerdeki oluşturulan görüntüleri .....	58
Şekil 41. Üç Düz Tel Saçıcı .....	61
Şekil 42. Farklı şekilli iki Tel Saçıcı .....	62
Şekil 43. Anten platformundan farklı uzaklıkta yerleştirilmiş, farklı şekilli iki saçıcı .....	63
Şekil 44. Anten platform düzlemine dik düzlemde oluşturulan görüntüleme.....	64
Şekil 45. Silindirik ve kartezyen koordinatlara uygun ölçümler için ölçme aralığı karşılaştırması .....	65
Şekil 46. Tek tel saçıcının, saçıcıya paralel ve dik polarizasyona sahip aydınlatıcı antenler ile oluşturulmuş görüntüleme çalışması .....	67
Şekil 47. Dikdörtgen saçıcının dikey ve paralel polarizasyona ile görüntüleme çalışması .....	69
Şekil 48. Çengel şeklinde bir tel saçıcının dikey ve paralel polarizasyona sahip antenlerle oluşturulmuş görüntüleme çalışması.....	70
Şekil 49. İki boyutlu silindirik koordinat eksenleri ile uyumlu saçıcıların pozisyonunun belirlenmesi için hazırlanan ölçme düzeneği .....	73
Şekil 50. Kullanılan Vivaldi antenlerin ön ve arka yüzleri .....	74
Şekil 51. Deneyde kullanılan seçici cisimlere verilen referans numaraları.....	75
Şekil 52. (1) Referans numaralı saçıcı için sonuçlar .....	76
Şekil 53. (2) Referans numaralı saçıcı için sonuçlar .....	76
Şekil 54. (3) Referans numaralı saçıcı için sonuçlar .....	76
Şekil 55. (1) ve (2) Referans numaralı saçıcı için sonuçlar.....	77

Şekil 56. (2) ve (3) Referans numaralı saçıcı için sonuçlar.....	77
Şekil 57. (1) ve (3) Referans numaralı saçıcı için sonuçlar.....	78
Şekil 58. (1), (2) ve (3) referans numaralı saçıcı cisimlerin deneyi sonuçları.....	78
Şekil 59. M Sınır değer seçiminin MUSIC yönteminin oluşturduğu görüntüye etkisi .....	79
Şekil 60. Kartezyen koordinatlarda tel saçıcı cisimlerin şeklinin belirlenmesi deneylerinde kullanılan düzenek .....	81
Şekil 61. Kartezyen koordinatlarda tel saçıcı cisimlerin şeklinin belirlenmesi deneylerinde kullanılan anten platformu, ölçme cihazı ve ölçme düzeneği fotoğrafları.....	82
Şekil 62. Anten platformuna 1 mt uzaklıkta yerleştirilmiş düz Tel Saçıcı Ölçümü.....	85
Şekil 63. Anten platformuna 1 mt uzaklıkta yerleştirilmiş eğimli düz tel saçıcı ölçümü... 86	
Şekil 64. Anten platformuna 1 mt uzaklıkta yerleştirilmiş karışık şekilli saçıcı ölçümü....	88
Şekil 65. Üç deneyin birlikte değerlendirmesi .....	88
Şekil 66. Çengel şeklindeki saçıcı deneyi ve M parametresinin oluşan üzerine etkisi .....	89
Şekil 67. Üç boyutlu anten platformuna çeşitli uzaklıktaki kesitlerde görüntü oluşturma ölçme ve deneyi.....	93
Şekil 68. Anten platformundan eşit uzaklıkta iki düz tel saçıcı .....	95
Şekil 69. Anten platformundan eşit uzaklıkta yerleştirilmiş düz tel ve çengel şekli verilmiş tel saçıcı.....	96
Şekil 70. Anten Platformuna farklı uzaklıkta yerleştirilmiş i ki ayrı saçıcı ölçme ve deneyi .....	97
Şekil 71. Anten Platformuna farklı uzaklıkta yerleştirilmiş farklı iki şekle sahip saçıcı ölçümleri.....	99
Şekil 72. Anten Düzlemine dik görüntüleme için koordinat referansları ve problem geometrisi .....	100
Şekil 73. Anten Platformuna dik düzlemde görüntüleme .....	101
Şekil 74. Silindirik ve Kartezyen koordinatlara uygun ölçümler için ölçme aralığı karşılaştırması.....	102
Şekil 75. Aydınlatma Anten Polarizasyonunun saçıcı görüntülenmesine etkisi .....	104
Şekil 76. Çengel şeklinde bir tel saçıcının dikey ve paralel polarizasyona sahip antenlerle oluşturulmuş görüntüleme çalışması .....	106

## SEMBOLLER DİZİNİ

$^{\circ}$	: Derece
$t$	: Zaman (s)
$VNA$	: Vektör Network Analizör
$MUSIC$	: Çoklu Sinyal sınıflandırma MULTIPLE SIGNAL CLASIFICATION :
$RF$	: Radyo Frekansı (Radio Frequency)
$EYP$	: El Yapısı Patlayıcı
$IED$	: Improvised Electronic Device
$LIDAR$	: Light Detection And Ranging
$w$	: Açısal frekans
$\mu_0$	: Manyetik geçirgenlik (Permeability) (Boşluk için)
$\epsilon_0$	: Elektriksel geçirgenlik (Permittivity) (Boşluk için)
$k$	: Dalga Sayısı (Wave Number)
$\pi$	: Pi sayısı
$c_0$	: Boşluktaki ışık hızı
$e$	: Euler Sayısı (Doğal Logaritmanın Tabanı)
$j$	: $j^2 = -1$
$  $	: Mutlak Değer
$\Delta$	: Laplas (Laplace) Operatörü
$H_0^{(1)}$	: Birinci Tip sıfır sıralı Hankel fonksiyonunu
$     $	: Öklid Büyüklüğü (Ecludian Norm)
$LSM$	: Doğrusal Örnekleme Yöntemi (Lineer Sampling Method)
$FM$	: Faktörizasyon Yöntemi (Factorisation Method)
$MLSM$	: Multi Level LSM
TM	: Transverse Magnetic
TE	: Transverse Electric
$J_n()$	: N inci dereceden Bessel Fonksiyonu
$H_n^{(2)}$	: N inci dereceden ikinci tip hankel fonksiyonu
$S_{11} S_{12} S_{21} S_{22}$	: İki kapılı bir devrenin S-parametreleri

# 1. GENEL BİLGİLER

## 1.1. Giriş

Elektromanyetik teoride ters saçılım problemi (Inverse Scattering Problem) teorik analizi ve nümerik çözüm problemleri açısından değerlendirildiğinde en zor çalışma alanlarından biridir. Ancak pratik açıdan değeri çok büyüktür. Ters saçılım probleminde, kaynak alan ve toplam alan bilinmekte ve saçıcının geometrik ve elektriksel özellikleri bulunmaya çalışılmaktadır. Böyle düşünüldüğü zaman görüntüleme, uzaktan algılama gibi pratikte çok ihtiyaç duyulan konularda uygulama alanı bulunmaktadır.

Ters saçılım problemleri yakın alan ve uzak alan çalışmalar olarak ikiye ayrıldığında, uzak alan analizlerinin tekillik ve matematiksel olarak nümerik çözüm kararlılık (stabilite) problemleri bulunmaktadır.

Bu çalışmada Ters saçılım problemlerinin bir alt kümesi olan ve saçıcı cisimlerin iletken tel olduğu durumda, bu iletken tellerin varlığının tespiti ve ek olarak ise tel iletken saçıcıların şekillerinin, pozisyonlarının ve sayılarının bulunması araştırılmıştır. Bu alt kümenin seçilme sebebi ve motivasyonu ise 1.2 başlığında açıklanmıştır.

Bu tez çalışması içeriği temel olarak tel saçıcılarının varlığının tespiti ve tel iletken saçıcıların şekillerinin, pozisyonlarının ve sayılarının görüntülenmesi olarak iki ayrı çalışma içerir. Başlık 2 de genel olarak elektromanyetik ters saçılım problemleri konusuna kısaca giriş yapılmış, ardından niceliksel ve niteliksel çözüm (quantitative / qualitative) yöntemleri ile ilgili temel bilgiler bütünlük açısından verilmiştir. 2.2 başlığında bu çalışmanın ana tel saçıcıların ise tel iletken saçıcıların şekillerinin, pozisyonlarının ve sayılarının bulunmasında yöntem olarak incelenmiş benzetim ve deneysel çalışmalarla incelenmiş ve sonuçları çalışma içerisinde verilmiş olan MUSIC (Multiple Signal Classification) yöntemi teorisi anlatılmıştır.

Bu çalışmada, tel saçıcıların varlığının tespiti yapılan kullanılan yaklaşım daha çok mühendislik ve deneysel doğrulama yaklaşımıdır. Temel varsayım, tel saçıcıların tel doğrultusu ile paralel polarizasyonda elektrik alanı içeren bir aydınlatıcı alan ile uyarıldığında (incident Electric Field), problem geometrisi sebebi ile dik polarizasyonla uyarıldığına göre çok daha fazla saçılım yapmasıdır. Bu temel varsayım kullanıldığında, ortamda bulunan tel şeklindeki saçıcıların, diğer saçıcılardan ayırt edilmesini mümkün

olduğu görülmektedir. Bu ise tel saçıcı tespit yöntemine temel oluşturmaktadır. Bu yaklaşım için gereken teorik altyapı çalışmanın 3.2.1 alt başlığında, bu yaklaşımın deneysel olarak doğrulanması ise alt başlık 3.2 nin devamında gösterilmiştir. Bu polarizasyon farkının etkisi ayrıca tel saçıcıların görüntülenmesi problemini MUSIC yöntemi çalışılan benzetim ve deneysel çalışmalarda da incelenmiştir. Aydınlatıcı alan polarizasyon etkisi ile ilgili MUSIC benzetim çalışma sonuçları alt başlık 3.3.2.5 de, deneysel lme sonuçları ise 3.4.2.5 de gösterilmiştir. MUSIC yöntemi sonuçlar, 3.2 altbaşlığında deneysel olarak çalışılmış olan polarizasyon etkisinin tel saçıcıların tespiti uygun bir yaklaşım olduğunu teyit etmektedir.

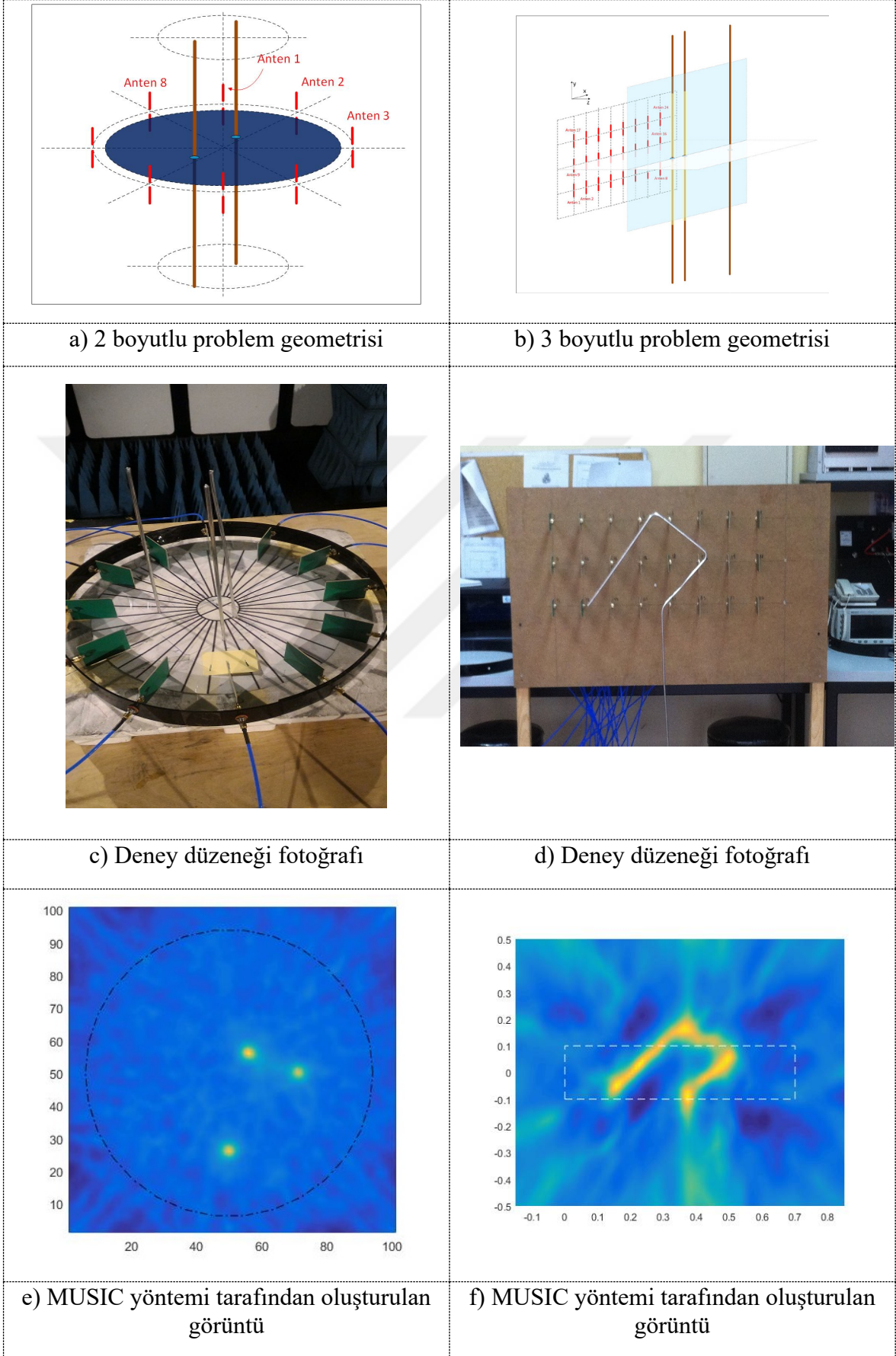
Çalışmanın devamı MUSIC yönteminin benzetim ve deneysel ölçmelerle doğrulanması şeklinde devam etmektedir. Benzetim sonuçları alt başlık 3.3 de deneysel doğrulama ve ölçmeler ise alt başlık 3.4 de çalışılmıştır. Benzetim ve deneysel ölçmeler mümkün olduğunca benzer geometriler kullanılarak çalışılmış böylece benzetim ve deneysel sonuçların karşılaştırılması sağlanmıştır.

Bu alışma kapsamında MUSIC yöntemi temel olarak iki ayrı problem geometrisi kullanılarak incelenmiştir.

şekil 1 de bu iki geometrinin anlaşılması için problem şematiği, örnek deneysel lme düzeneği fotoğrafları ve MUSIC yöntemi ile oluşturulan görüntü örnekleri gösterilmiştir.

şekil 1a da 2 boyutlu ters saçınım ile tel saçıcıların pozisyonlarının bulunması için kullanılan silindirik koordinatlara uygun problem geometrisi gösterilmiştir. Bu geometri belirli bir ilgi alanında bulunan tel saçıcıların konumunun bulunması sağlamaktadır. şekil 1c de deney düzeneği fotoğrafı, şekil 1e de ise MUSIC yöntemi ile oluşturulan görüntü gösterilmiştir. Bu geometrinin benzetim sonuçları alt başlık 3.3.1 de deneysel lme ve sonuçlar ise alt başlık 3.4.1 de gösterilmiştir.

şekil 1b de 3 boyutlu ters saçınım ile tel saçıcıların 3 boyutlu pozisyonu, sayısını bulan ve saçıcıların şekillerini görüntülemek için kullanılan kartezyen koordinatlara uygun problem geometrisi gösterilmiştir. şekil 1d de lme düzeneği fotoğrafı şekil 1f de ise MUSIC yöntemi ile oluşturulan görüntü gösterilmiştir. Bu geometrinin benzetim sonuçları alt başlık 3.3.2 de deneysel lme ve sonuçlar ise alt başlık 3.4.2 de gösterilmiştir.



Şekil 1. MUSIC yöntemi ile çalışılan, temel problem geometrileri

MUSIC yönteminin 3 boyutlu Kartezyen koordinatlara uygun problem geometrisi, uygulaması benzetim ve deneysel ölçme ve doğrulama çalışmalarında paralel olarak yöntemin aşağıdaki performanslarını benzetim ve deneysel olarak gösterecek şekilde ayrı ayrı gruplanmıştır. Bunlar MUSIC yöntemi ile:

- Tel Saçıcıların Şeklini Görüntüleyebilme
- Tel Saçıcıların Şeklini Anten platformuna Çeşitli uzaklıktaki kesit yüzeylerindeki Görüntüleyebilme ve Şekillerinin
- Birden fazla Tel saçıcı cismi 3 boyutlu Ayırt Edebilme, Görüntüleyebilme ve Şekillerinin belirlenmesi Benzetim Çalışmaları
- Anten Platformu Düzlemine dik düzlemde yapılan Görüntüleme
- Aydınlatma Elektrik alanı yönü ve tel saçıcı doğrultusu ile olan polarizasyon açısının, Saçıcı şekil, pozisyon ve Görüntüleme performansına etkisi

Benzetim çalışmaları ve deneysel doğrulama çalışmalarıdır. Çalışmanın son kısmında sonuçların değerlendirilmesi ve önerilere yer verilmiştir.

## **1.2. Problem Tanımı, Bu Çalışma İçin Seçilme Sebebi ve Potansiyel Uygulama Alanları**

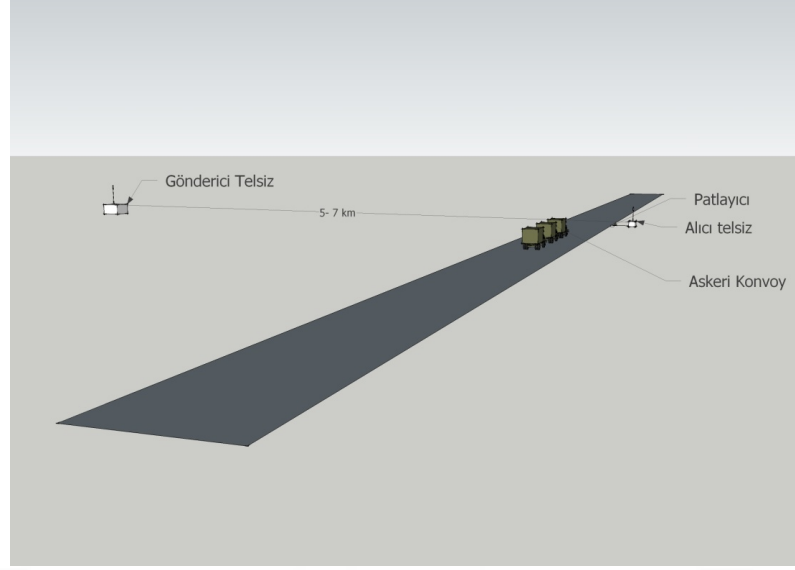
### **1.2.1. Araziye Yerleştirilmiş Elektrik Tellerinin Bulunması**

Savunma sektörü Dünya ekonomisinde önemli bir yer tutmaktadır. 11 Eylül 2001 tarihinde New York daki Dünya Ticaret merkezi Kulelerine yapılan terörist saldırılardan sonra Savunma sektörü ilgi alanında terörist faaliyetler ve bunlara karşı alınacak önlemler önemli yer tutmaya başlamıştır.

Terörizm günümüzde asimetrik savaş koşulu olarak değerlendirilmektedir. Standart düzenli ordular ve ekipmanları bu asimetrik ortama uyum sağlamakta zorlanmaktadırlar. Örneğin 10 milyonlarca dolar değerinde bir tank bin dolar değerinde bile olmayan bir tuzak düzeneği ile etkisiz hale getirilebilmektedir.

Teröristlerin en çok kullandığı metotlardan biri ise tuzaklama sistemleridir.





Şekil 2. Telsiz Kumanda ile patlatılan yol yanına yerleştirilmiş EYP

Şekil 2 de RF uzaktan kumandalı bir El Yapımı Patlayıcı (EYP) tuzak örneğinin şekli bulunmaktadır.

Öncelikle uzaktan kumandalı telsizler kullanılarak yapılan tuzak düzenekleri çoklukla kullanılmış ve buna önlem olarak ise RF karıştırıcı sistemler geliştirilmiştir.

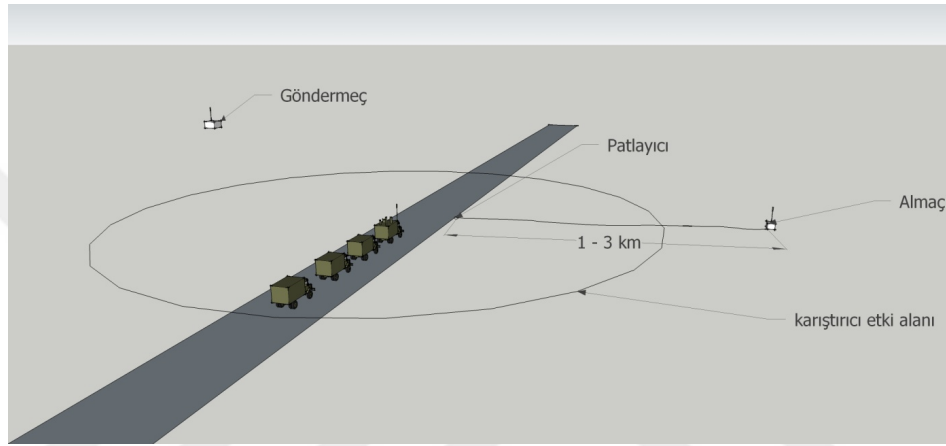
Şekil 3 de ise karıştırıcı sistem ve RF uzaktan kumandalı bir tuzak örneğinin gösterimi bulunmaktadır. Bu durumda karıştırıcı sistem göndermeç ve almaç telsiz sisteminin çalışmasını engellediği için tuzağın çalışmasına engel olmaktadır.



Şekil 3 Konvoy da bulunan karıştırıcı birimin kumandayı etkisiz getirilmesi

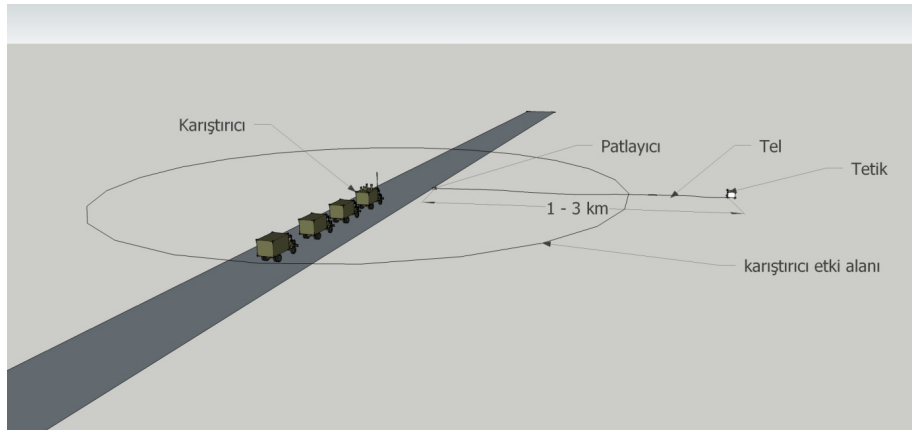
Ancak karıştırıcı sistemler daha basit ve daha eski bir tuzak sistemi olan tel kumandasına karşı etkili olamamaktadır. Bu durumda tuzak düzeneğinde telsiz kullanılmadığı için veya telsiz tel kullanılarak karıştırıcı menziline çıkarıldığı için bu tür tuzaklara karşı güvenlik kuvvetlerinin eline bir çözüm henüz bulunmamaktadır.

Şekil 4 de araziye iletken tel döşenerek telsiz alma cihazının karıştırıcı etkili menzili dışına çıkarılması sağlanmış uzaktan kumanda kullanan tuzak düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 4. Karıştırıcı etkili menziline tel ile uzaklaştırılmış uzaktan kumandalı düzenek

Şekil 5 de ise en basit ve etkili tuzaklama olan sadece tel ve manyeto/batarya kullanan bir tuzak görülmektedir.



Şekil 5. Sadece araziye yerleştirilmiş tel ile kurulmuş EYP düzenegi

Şekil 4 ve Şekil 5 de şekilde gösterilen EYP tuzaklama karşı güvenlik güçlerinin bir önlemi bulunmamaktadır. Özellikle sadece tel kullanan sistem son derece basit ve etkilidir.

Bu çalışmada, tel saçıcıların tespiti ve görüntülenmesi ana motivasyonu, araziye döşenmiş bu tellerin uzaktan algılanabilip, teröristler tarafından kullanılan bu el yapımı patlayıcı tuzaklarına karşı önlem alınabilmesi için gereken yöntemlerin araştırılması ve ürün geliştirme öncesinde gereken teorik, benzetimsel ve deneysel ön sonuçların ortaya çıkarılması olmuştur.

### **1.2.1. Yüksek Gerilim Tellerinin Bulunması**

Yüksek gerilim telleri alçaktan uçan helikopterler için tehdit oluşturmaktadırlar. Dünyada her sene yüksek gerilim tellerine takılıp kaza yapan helikopterler hem can ve mal kaybına sebep vermektedirler.

Lazer radar ilkesini (LIDAR) kullanarak bu işlev gerçekleştirilebilmektedir. Ancak lazer tabanlı bu sistemlerin hava şartlarına göre performansları değişebilmekte ve yağmur/kar/ sis ortamlarında etkinlikleri düşmektedir ağır koşullarda ise yitirmektedirler.

Bu tez kapsamında önerilecek tel tespit yöntemlerin, sivil havacılık alanında, hava koşullarından etkilenmeden, yüksek gerilim tellerinin tespit eden ve helikopter pilotunu uyaran ürün geliştirme çalışmaları için gereken teorik, benzetimsel ve deneysel ön sonuçların ortaya çıkarılması hedeflenmiştir.

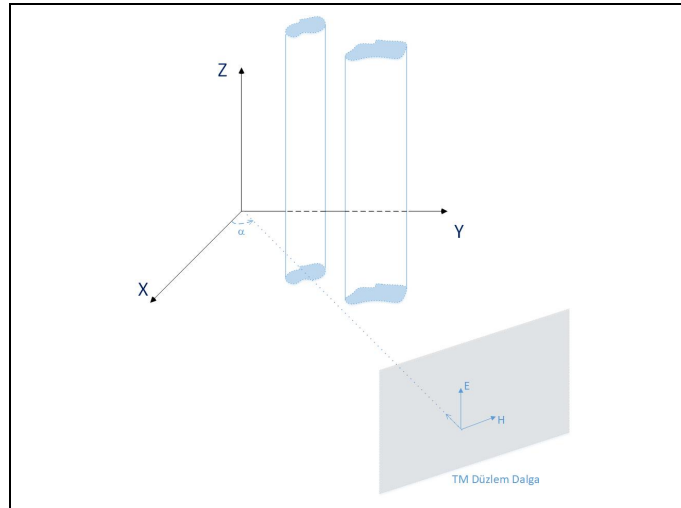
### 1.3. Elektromanyetik Görüntüleme Problemi

Tel şeklindeki saçıcıların uzaktan algılanması ve görüntülenmesini hedefleyen bu çalışma, daha geniş kapsamlı bir problem olan elektromanyetik görüntüleme probleminin bir alt kümesidir. Genel elektromanyetik görüntüleme problemi, belirli bir ilgi alanı içerisinde bulunan saçıcıların şeklini, dış hatlarını ve malzeme özelliklerini elektromanyetik dalgalar uygulayarak bulmak hedefindedir. Bu çalışmanın çözmeyi hedeflediği problemde ise, saçıcılar hakkında belirli önbilgilerin bulunması, bu çalışmada genel elektromanyetik probleme göre değişik yaklaşımların kullanılabilmesine olanak vermiştir. Yerinin ve şeklinin bulunmasının beklenen saçıcıların iletken tellerden oluşması ve saçıcıların bulma olasılığı olan bölgenin önceden biliniyor olması, bu çalışma kapsamında çözmeyi hedeflediğimiz problemi, genel elektromanyetik görüntüleme problemine göre göreceli olarak basitleştirmektedir.

Geometrik şekillerinden dolayı, uzun tel saçıcılar 2 boyutlu ters saçılım problemlerinde daha çok noktasal kaynak olarak davranmaktadırlar. Bu durumla paralel olarak öncelikli olarak 2 boyutlu ters saçılım problemlerine genel bir bakış yapılmıştır.

#### 1.3.1. İki Boyutlu Ters Saçılım Problemi

Şekil 5 de analiz edilmesi istenilen problem ile ilgili temel bilgiler görülmektedir.



Şekil 6. Z koordinat ekseninde sonsuz uzunlukta, rastgele kesit alanlı birden fazla sayıda saçıcı

Şekil 6 da gösterildiği gibi alanımızda rastgele kesit alanlı birden fazla sayıda rastgele taban alanlı, silindirik, kayıplı dielektrik saçıcı bulunmaktadır.

Bölge x koordinat eksenini ile  $\alpha$  açısı yönünden bir düzlem dalga ile aydınlatılıyor olsun. Matematiksel basitlik açısından, ilgili problemdeki saçıcılar ve aydınlatan düzlem dalganın elektrik alanının yönünün z koordinat eksenini ile çakıştığını kabul edelim. Saçıcılar dışında kalan tüm bölgenin kayıpsız bir homojen dielektrik malzemeden oluştuğunu düşünelim. Anlatım basitliği açısından bu malzemeyi boşluk olarak kabul edilebilir ancak herhangi bir kayıpsız homojen dielektrik malzeme olması formülasyonu değiştirmeyecektir. Bu durumda bir  $k$  dalga sayısı tanımlanabilir,

$$k = \frac{w}{c_0} \quad (2.1)$$

Denklem (2.1) de  $w$  frekansı,  $c_0$  ise boşluktaki dalga hızını göstermektedir. Bu gösterim ile saçıcılar dışındaki tüm bölgede Helmholtz denklemi sağlanmaktadır.

$$\Delta u + k^2 u = 0 \quad (2.2)$$

(2.2) de  $u$  ilgi alanımızda ki herhangi bir dalga büyüklüğünü göstermektedir. Aydınlatıcı düzlem dalgayı  $u^i$  ise aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$u^i = e^{jkr \cdot d}, \quad (j = \sqrt{-1}) \quad (2.3)$$

(2.3) de  $r$  vektörü ilgili noktanın iki boyutlu koordinat vektörünü  $(x, y)$  göstermektedir.  $d$  birim vektörü ise aydınlatıcı dalga  $u^i$  nin hareket yönünü ifade etmektedir. Aydınlatıcı dalga saçıcılarla iletişime girerek saçılan alanı  $u^s$  oluşturmaktadır. Toplam alan  $u$  ise aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$u = u^i + u^s \quad (2.4)$$

Aydınlatıcı düzlem dalganın etkisi ile oluşan saçılan alan orijine göre dışarıya doğru hareket eden bir dalgadır ve ortamdaki dalga hızı sabit varsayıldığı için denklem (2.5) de görülen Sommerfield radyasyon koşulunu sağlamaktadır.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r^{1/2} \left( \frac{\partial u^s}{\partial r} - jku^s \right) = 0 \quad (2.5)$$

Denklem (2.2), (2.3) ve (2.5) saçılan alanı tekil olarak bulunması için yeterli değildir. Saçılan alanı tekil olarak ifade edebilmek için saçılan alanı oluşturan fizik ile ilgili matematiksel ifadeleri de formül listesine katmamız gerekmektedir. Ancak aradığımız sadece saçıcıların şekli ve konumu olması durumunda bu bilgiye sahip olunması gerekmemelidir. [1] Özel bir durum ise saçılan alanın saçıcılardan uzak alanı mesafesinde ölçüldüğü durumdur. Bu durumda saçılan alan aşağıdaki asimptotik şekilde ifade edilebilir [2],

$$u^s(r) = \frac{e^{jkr}}{\sqrt{r}} u_\infty(\hat{r}, d) + O\left(\frac{1}{r}\right) \quad \hat{r} = \frac{r}{|r|} \quad (2.6)$$

Ölçme uzaklığı sonsuza yaklaştıkça, fonksiyon  $u_\infty$  saçılan alanın uzak alan patterni şeklinde adlandırılır ve sadece aydınlatma alanı yönü  $d$  ve  $\hat{r}$  ölçme yönüne bağlıdır. Teorik olarak saçılan alanı sonsuz yönde ölçebilmemize rağmen, pratikte ancak sınırlı sayıdaki ölçme yönünde ölçüm alınabilir. Sıklıkla bu noktalar ile aydınlatma alanını uygulandığı noktalar aynı yönlerdir. Ayrıca unutulmaması gereken bir nokta da, gerçek hayatta, saçılan alanın kendi başına ölçülmesinin mümkün olmadığı, ancak toplam alanın ölçülebilir olduğudur. Bu çalışmanın ilerleyen kısımlarında görülecek olan gerek benzetim gerekse deneysel ölçmelerde de bu durum geçerlidir. Aynı anten dizesi hem aydınlatma alanının sağlamakta hem de toplam alanı ölçmektedir.

Elektromanyetik görüntüleme probleminde tipik olarak, aydınlatan alan ve toplam alan bilinmektedir veya ölçülebilmektedir. Hedef toplam alanın içerisinde olan saçılan alanı yaratan saçıcı cisimlerin şekil, yer ve elektromanyetik özelliklerinin bulunmasıdır.

Elektromanyetik görüntüleme veya diğer bir deyimle elektromanyetik ters saçılım çözüm yaklaşımları iki ayrı koldan incelenebilir. Bunlardan ilki klasik ters problem çözme teknikleri diğerleri ise daha yeni bir yaklaşım olan ve daha çok saçıcıların sadece şekil ve

yerlerini bulmaya odaklanan Lineer Sampling (LSM) ve Factorizasyon (FM) yöntemleridir. [1]. Klasik çözümler yöntemleri oldukça eski olmasına rağmen, LSM oldukça yeni bir yöntemdir ve 1990 lı yıllarda Andreas Kirsch tarafından Almanya uçağını beklediği sırada Newyork JFK havalimanında bilgisayarı ile çeşitli denemeler yaparken bir nevi kazara bulunmuştur , [3]. Bu çalışma kapsamında, doğrulama çalışmaları yapılacak olan, MUSIC yöntemi LSM ve FM gibi niteliksel yöntemlerden olup, detaylı teori ve açıklama alt başlık 2.2 de verilmiştir.

### 1.3.1.1. Elektromanyetik Görüntüleme Problemi Klasik Çözüm Yaklaşımları

Elektromanyetik ters saçınım problemlerine, klasik çözüm yaklaşımları, ilgi dahilindeki bölgede bulunan saçıcıların, şekil, yer ve elektromanyetik özelliklerini hep birlikte bulmasını hedeflemektedirler.

Saçıcıların içerisine aydınlatıcı elektromanyetik dalganın nüfuz edebildiği varsayımı ile ve saçıcı elektromanyetik özelliklerinin boşluktan farklı olduğu düşünüldüğünde saçıcı içerisinde olan dalga hızı saçıcının elektromanyetik özelliklerinin (permittivity, iletkenlik ve permeability) bir fonksiyonudur, bu fonksiyon  $n(r) = c_0^2/(c(r))^2$  olarak ifade edelim. Bu durumda saçıcıların mevcut olmadığı  $r$  noktalarında  $n(r) = 1$  Saçıcıların içinde ise  $n(r) > 1$  olacaktır. Bu durum için denklem (2.2) aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\Delta u + k^2 n(r)u = 0 \quad (2.7)$$

Denklemler (2.7), (2.4) ve (2.5) tanımlanan bu problemin düz saçılım problemini yani aydınlatıcı dalga ve saçıcı özelliklerinin bilinip saçılan alanın çözüldüğü problemin çözümü için yeterli bir denklem setidir.

Uzak alan çözümü,  $n(r)$  fonksiyonun devamlı olması koşulu ile aşağıdaki şekilde yazılabilir [2]

$$u_\infty(\hat{r}, d) = -e^{j\pi/4} \sqrt{\frac{k^3}{8\pi}} \int e^{-jk\hat{r}\cdot y} (1 - m(y))u(y)ds(y) \quad (2.6)$$

(2.6) da gösterilen denklem bir integral denklemdir ve matematiksel olarak zor çözümlen, kararsız bir denklemdir. Çok basit saçıcı durumları dışında analitik çözümü

mümkün değildir. Bu denkleme sınırlı optimizasyon (constraint optimisation) yöntemleri ile çözüm yaklaşımları yaygındır. İteratif optimizasyon yöntemlerinin başarısı seçilen ilk koşul duruma (initial condition) çok bağlıdır. Klasik yaklaşım ile ilgili literatür oldukça gelişmiştir. Basitleştirici yaklaşımlar ve çözüm yöntemlerinin performansı gibi konular detaylı olarak ele alınmış ve özellikle saçıcının elektromanyetik özelliklerinin bulunmasının gerekli olduğu durumlarda bu yaklaşımın alternatifi olmadığı için akademik çalışmalar hala devam etmektedir. [4] [5] [6] [7] [8] [9]

### 1.3.1.2. LSM ve FM Yaklaşımı

Elektromanyetik ters saçılım problemine diğer bir yaklaşım ise Colton and Kirsch 3] [3] de getirilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi LSM (Lineer örnekleme yöntemi) Andreas Kirsch tarafından Almanya uçağını beklediği sırada Newyork JFK havalimanında bilgisayar ile çeşitli denemeler yaparken bir nevi kazara bulunmuştur, teorik altyapısı ise sonuçlar görüldükten sonra araştırılıp sağlamlaştırılmıştır. LSM iteratif optimizasyon temelli yöntemlere göre göreceli olarak hızlıdır ve sadece matematiksel olarak çok stabil olmayan (ill-posed) bir doğrusal denklemin çözümünü içerir. LSM temel olarak uzak alan denkleminde yer alan ve saçıcıların içinde bulunduğu varsayılan bölgede tanımlı bir  $g_Z \in L^2(\Omega)$  fonksiyonun bulunması dayanır.  $\Omega$  bölgesi saçıcıların içinde bulunduğu bir ön bilgi olarak bilinen bölgeyi ifade etmektedir.

$$\int_{\Omega} u_{\infty}(\hat{r}, d) g_Z(d) ds(d) = \Phi_{\infty}(\hat{r}, Z) \quad (2.7)$$

Denklem (2.7) deki  $\Phi_{\infty}(\hat{r}, Z)$  ise Z noktasında bulunan bir noktasal kaynağın oluşturduğu uzak alanı ifade etmektedir. İki boyutlu bir problemi düşündüğümüz zaman noktasal kaynağın oluşturduğu alan aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\Phi(\hat{r}, Z) = \frac{j}{4} H_0^{(1)}(k|x - y|) \quad (2.8)$$

(2.8) de  $H_0^{(1)}$  birinci Tip sıfır sıralı Hankel fonksiyonunu, x ve y ise kartezyen koordinat eksenlerini göstermektedir. (2.8) Uzak alan asimptotik hali ise



$$\Phi_{\infty}(\hat{r}, Z) = \frac{e^{j\pi/4}}{\sqrt{8\pi k}} e^{-jk\hat{r}\cdot Z} \quad (2.8)$$

Aşağıdaki tanımlı fonksiyon,

$$\psi(Z) = \|g_Z\|_{L^2(\Omega)}^{-1} \quad (2.9)$$

Denklem (2.9) LSM de saçıcıların bir gösterge fonksiyonu olarak davranır. Z test noktası saçıcıların bulunduğu alanda dolaştırıldığında, eğer saçıcılardan birisinin içerisinde bulunuyor ise  $g_Z$  sıfırdan büyük, saçıcıların dışında ise  $g_Z = 0$  dir. Denklem (2.7) de görülen  $u_{\infty}$  yavaş değişen bir fonksiyon olduğu için matematiksel olarak kararsız bir denklem olduğu görülmektedir. Bu sebeple çözümü için çeşitli düzgünleştirme (regularization) yöntemleri kullanılır. [10].

Arens [11] LSM nin bir ön bilgi olmadan saçıcıların şeklini belirlemede etkin bir yöntem olduğunu göstermiştir. Kirsch ve Grinberg [12] faktörizasyon yöntemlerinin çeşitli ters saçınım problemi ile ilgili örnekleri çalışmıştır (sayfa 40-69). Ek olarak Kirch ve Grinberg [12] faktörizasyon yöntemlerinin bir skaler ters problem olan empedans tomografi uygulamalarında kullanımını da incelemiştir (saya 141-158). Colton, Gieberman ve Monk [1] [13] LSM ve FM nin 3 boyutlu saçıcı cisimler için uygulamasını incelemişler ve yöntemlerin klasik yöntemlerin aksine nonlineer integral eşitliklerinden kaçılarak, lineer integral denklem çözümüne dayandığı için getirdiği avantajları göstermişlerdir. Jingzhi, Hongyu ve Jun [14], MLSM (çok seviyeli LSM yöntemi: Multi Level LSM) olarak adlandırdıkları ve orijinal LSM yönteminde  $n^N$  sayıda çözülmesi gereken uzak alan eşitliği sayısını  $n^{(N-1)}$  e indiren algoritmayı önermişmiş ve performansını raporlamıştır. Jingzhi, Hongyu ve Jun [15] aynı zamanda problem geometrisine gerçekte olmayan ve şekli top şeklinde belirli olan bir saçıcı yerleştirilerek, (LSM yönteminde pratikte gözlenen ve problemde probleme değişen cut-off değeri belirlenmesini kolaylaştıran bir yöntemi önermektedirler. Brignone, Bozza, Aramini, Pastorino ve Piana [16] LSM yönteminin 3 boyutlu saçıcı belirlenmesinde kullanılmasında daha hızlı ve etkili olması için yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Kirsch [17] düzgünleştirme yöntemlerini ve genel olarak ters saçılım problemlerinde faktörizasyon yöntemlerini incelemiştir.

Kirsch ayrıca faktörizasyon yöntemlerinin temelinde yatan matematiksel teorem ve ispatlarını detaylı olarak yayınlamıştır [18], [3]. FM nin born yaklaşımı tarafından

öngörülen dalga boyu limitinin ötesinde görüntüleme yapabildiği Simonetti ve Huang [8] tarafından gösterilmiştir.

### 1.3.2. MUSIC (MULTiple Signal Clasification) Yöntemi

MUSIC (MULTiple SIgnal Clasification) “çoklu sinyal sınıflandırma” yöntemi olarak Türkçeleştirilebilir. MUSIC algoritması öncelikli olarak gürültülü ortamlarda frekans belirleme ve yön bulma uygulamaları için geliştirilmiş bir sayısal sinyal işleme yöntemi olarak kullanılmıştır, [19]. MUSIC yönteminin geliştirilmiş bir şekli olan Time Reversal MUSIC ise görüntüleme probleminde kullanılmaya başlanmıştır. [20] [21]

Bu çalışma içerisinde kullanılan MUSIC yöntemi ile LSM ve FM arasındaki benzerlik CHENEY tarafından verilmiştir [22]. CHENEY tekil saçıcı cisimlerin bulunduğu elektromanyetik ters görüntüleme problemi ile LSM metodu arasındaki matematiksel benzerliği kullanarak MUSIC yönteminin LSM ve FM yöntemleri ile benzerliğine dikkat çekmiştir.

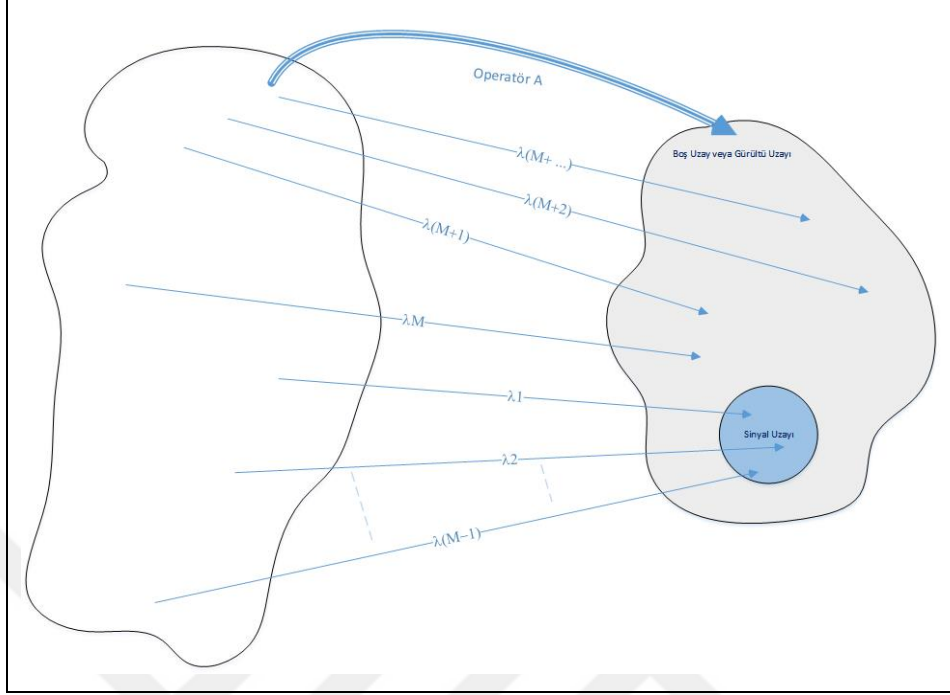
Bu kısımda MUSIC yöntemi ile ilgili temel bilgiler verilecektir.

#### 1.3.2.1. MUSIC Yöntemimin Temelleri

Matematiksel olarak MUSIC bir matrisin, daha genel olarak bir operatörün kapsadığı alanı karakterize etmek olarak yorumlanabilir.

$A$  Hermetian kendine bitişik (self-adjoint) bir operatör olsun.  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots$ ,  $A$  operatörünün öz değerleri (eigen value),  $v_1, v_2, \dots$  ler ise öz değerlere karşılık gelen öz vektörleri (Eigen Vector) gösterebilir. Belirli bir  $M$  sayısından büyük tüm öz değerlerin sıfır ve gerçekte sistemler için gürültü seviyesinden daha küçük olduğunu kabul edelim.  $\lambda_{M+1}=0$ ,  $\lambda_{M+2}=0, \dots$ , Böylece bu öz değerlere karşılık gelen  $v_{M+1}, v_{M+2}, \dots$  öz vektörleri  $A$  operatörünün boş alt uzayını tarar. Gerçek sistemler için ise bu öz değerler deneysel ölçmelerin gürültü alt uzayını tarar. Bu durum sembolik olarak Şekil 7 de gösterilmiştir. Gürültü alt uzayını aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$P_{\text{gürültü}} = \sum_{j>M} \langle v_j, v_j^T \rangle \quad (2.10)$$



Şekil 7. Hermetian operatör A nin sinyal ve boş uzayının öz değerlere tarafınan kapsanması

Denklem (2.10) da  $\bar{v}^T$  karmaşık eşlenik evrik (complex conjugate transpose),  $\langle , \rangle$  ise vektör iç çarpımını ifade etmektedir. Bu durumda her hangi bir  $f$  vektörünün sinyal alt uzayında olabilmesi için gürültü alt uzayına olan projeksiyonunun sıfır olması şarttır.

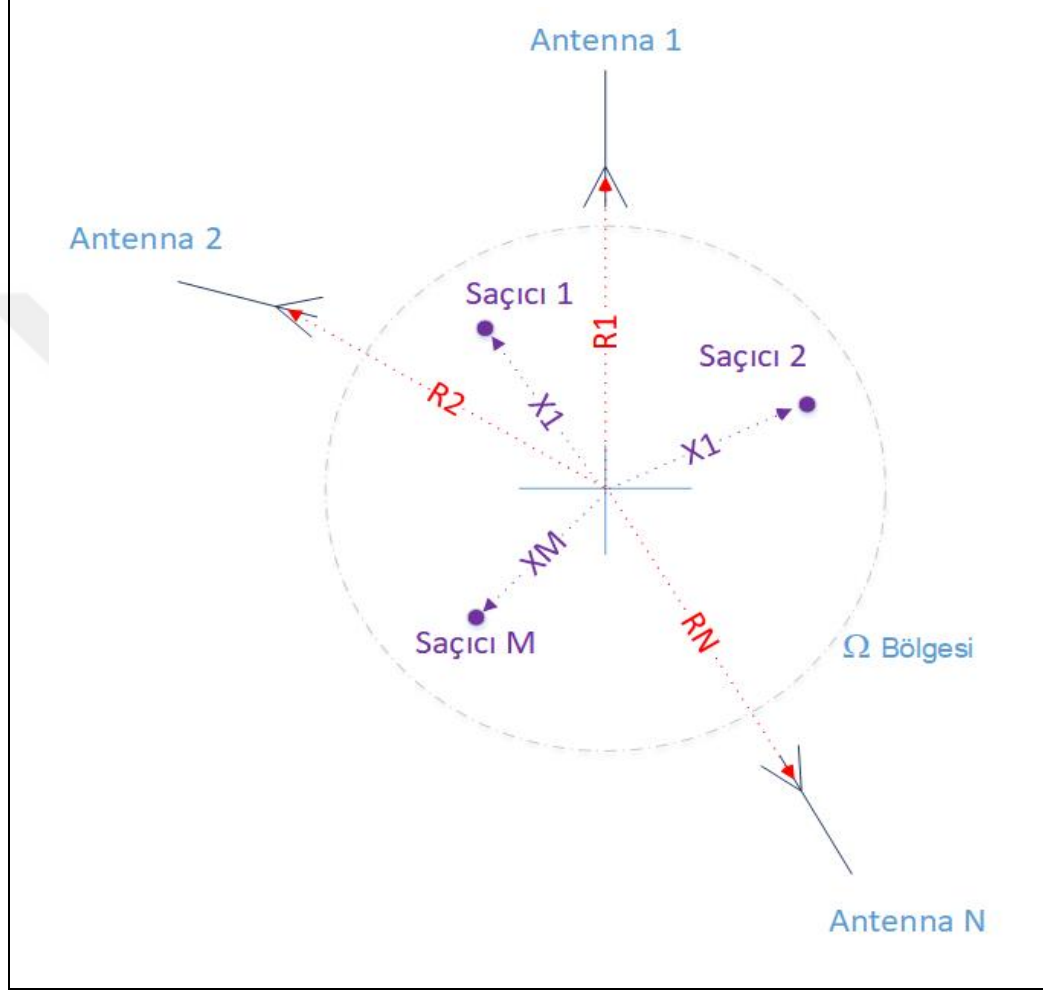
MUSIC yönteminin temel ifadesi ise, A operatörü Hermetian olarak tanımlandığı için A operatörünün gürültü alt uzayı ile sinyal alt uzayının birbirine dik olduğudur. Böylece sinyal alt uzayında olan bir  $f$  vektörü için

$$\|P_{gürültü}f\| = 0 \iff \frac{1}{\|P_{gürültü}f\|} = \infty \quad (2.11)$$

Denklem (2.11) sinyal alt uzayında olan tüm vektörler için geçerlidir [22] [23]. Denklem (2.11) herhangi bir  $f$  test vektörünün A operatörünün sinyal alt uzayında olup olmadığını test edilmesi amacı ile kullanılabilir. Eğer  $f$  vektörünün gürültü alt uzayına projeksiyonunun normu sıfır veya bu normun tersi sonsuza yaklaşıyor ise  $f$  vektörü sinyal alt uzayındadır çıkarımı yapılabilir.

### 1.3.2.2. MUSIC Yöntemimin Elektromanyetik Görüntüleme Uygulaması

MUSIC yönteminin elektromanyetik ters saçılım problemine uygulanmasının açıklandığı bu kısımda şekil 8 de görülen problem geometrisi referans alınacaktır.



Şekil 8. MUSIC yöntemi ters saçılım problemine uygulaması problem geometrisi

Şekil 8 de tanımlanmış  $\Omega$  bölgesinde Helmholtz denklemi (2.2) sağlanmaktadır. İlgili alanı bölgede M adet saçıcı bulunmaktadır. Saçıcı cisimlerin bulunduğu noktaların koordinatları  $X_1, X_2, \dots, X_M$  ile gösterilmiştir.  $\Omega$  bölgesini aydınlatan N adet anten bulunmaktadır. Bu antenler hem aydınlatma hem de saçılan alanı alma işlevini görmektedirler. Antenlerin bulunduğu noktaların koordinatları ise  $R_1, R_2, \dots, R_N$  ile gösterilmiştir.

Aydınlatıcı  $j$  numaralı antenin,  $m$  numaralı saçıcı üzerinde yarattığı alanı aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz.

$$\psi_j^{aydinlatma} = G(x, R_j)e_j \quad (2.12)$$

Denklem (2.12) de  $G$ ,  $\Omega$  bölgesinde geçerli Green fonksiyonunu,  $e_j$  ise  $j$  numaralı antenin ürettiği sinyalin şiddetini (gerilim cinsinden) ifade etmektedir.  $j$  numaralı antenin yarattığı dalga,  $m$  numaralı saçıcı ile etkileşime girmekte ve bir saçılan alan oluşmaktadır. Bu saçılan alanın  $l$  inci antende oluşturduğu ölçme alanı ise:

$$\psi_j^{saçıman}(R_l) = G(R_l, X_m)\tau_m G(X_m, R_j)e_j \quad (2.13)$$

Denklem (2.13) de  $\tau_m$ ,  $m$  numaralı saçıcının aydınlatma alanı etkisi ile ne büyüklükte bir saçılan alan oluşturduğunu gösteren bir katsayıdır. Bu katsayı saçıcı cismin geometrik ve elektromanyetik özelliklerin bağlıdır.  $M$  saçıcının  $j$  numaralı antenin yarattığı alanın oluşturduğu ve  $l$  numaralı anten tarafından alınan saçılan alan ise,

$$\psi_j^{saçıman}(R_l) = \sum_m G(R_l, X_m)\tau_m G(X_m, R_j)e_j \quad (2.14)$$

Denklem (2.14) yazılırken iki varsayımda bulunulmuştur. Bu varsayımlardan birincisi saçıcı cisimlerin noktasal kaynak olarak davrandığı, ikinci varsayım ise saçıcı cisimlerin zayıf ve birbirlerinden uzakta konumlandığı, bu sayede aralarında çoklu saçılım olmadığıdır. Denklem (2.14) diğer antenlerin de düşünülmesi ile Çoklu Statik Etki (Multi Static Response) matrisinin  $\mathbf{K}$  elemanını göstermektedir. Matris elemanı olarak yeniden yazıldığında,

$$K_{i,j} = \sum_m G(R_l, X_m)\tau_m G(X_m, R_j)e_j = \quad (2.15)$$

Burada  $K_{i,j}$  çoklu statik etki matrisi  $\mathbf{K}$  nın  $j$  numaralı antenin aydınlatıcı,  $l$  numaralı antenin ise ölçme anteni olarak davrandığı durumu gösteren elemanıdır.  $\mathbf{K}$  matrisi aydınlatıcı antenlerin ürettiği sinyalin şiddet vektörünü  $(e_1, e_2, \dots, e_N)^T$ ,  $N$  adet antenin ölçtüğü ölçme sinyal genliklerine transfer eden fonksiyonu tanımlar.  $\mathbf{K}$  matrisi aşağıdaki şekilde yeniden yazılabilir,

$$K_{i,j} = \sum_m \tau_m g_m g_m^T \quad (2.16)$$

$$g_m = (G(R_1, X_m), G(R_2, X_m), \dots, G(R_N, X_m))^T$$

Ölçme antenlerinin sayısının  $N$  saçıcı cisim sayısından  $M$  fazla olduğunu kabul edelim  $N > M$ . Green fonksiyonları simetrik fonksiyon olduğu için  $\mathbf{K}$  matrisi simetrik bir matristir. Ancak Hermetian kendine bitişik (self-adjoint) değildir. MUSIC yöntemini kullanabilmemiz için Hermetian bir matrise ihtiyacımız bulunmaktadır.  $\mathbf{K}$  matrisini kullanarak bir Hermetian  $\mathbf{A} = \mathbf{K}^* \mathbf{K} = \overline{\mathbf{K}} \mathbf{K}$  matrisi oluşturulabilir. Burada  $*$  **adjoint** işlemini, çizgi ise karmaşık (complex) conjugate işlemini göstermektedir.  $\mathbf{K}$  simetrik olduğu için adjoint işlemi complex conjugate işlemi ile aynıdır. Burada  $\overline{\mathbf{K}}$  matrisinin zamanı evrilmiş multi statik etki matrisinin (Time Reversal Multi Static Response Matrix) in frekans tabanındaki hali olduğu yorumlanabilir. CHENEY [22]  $\mathbf{A} = \mathbf{K}^* \mathbf{K} = \overline{\mathbf{K}} \mathbf{K}$  matrisini bir elektromanyetik saçınım deneyi yapılmasını ve alınan işaretlerin zaman evrilerek tekrar ikinci bir saçınım deneyinde giriş işareti olarak kullanılması şeklinde anlamlandırmaktadır.

$$\mathbf{A} = \sum_m \overline{\tau_m g_m g_m^T} \sum_j \tau_j g_j g_j^T \quad (2.17)$$

Denklem (2.17) den görüldüğü gibi  $\mathbf{K}$  matrisinde olduğu gibi  $\mathbf{A}$  matrisinin de öz değer vektörleri  $\overline{g_m}$  dir.

Bu durumda MUSIC yöntemi  $\mathbf{A}$  matrisi kullanılarak uygulanabilir [20].  $\Omega$  bölgesi içerisinde seçilmiş herhangi bir test noktası  $\mathbf{p}$  alındığında,  $\mathbf{p}$  noktasının saçıcılardan birisini üzerinde olabilmesi için,  $g^p = (G(R_1, p), G(R_2, p), \dots, G(R_N, p))^T$  test vektörünün gürültü alt uzayı üzerindeki projeksiyonunun sıfır olması gerekmektedir.

$$P_{gürültü} g^p = 0 \quad (2.18)$$

$$\frac{1}{\|P_{gürültü} g^p\|} \quad (2.19)$$

Test amacı ile  $\Omega$  bölgesi içerisinde seçilen  $\mathbf{p}$  noktaları için denklem (2.19) daki büyüklük çizdirilerek bir görüntü oluşturulduğu zaman, saçıcılar üzerine düşen noktalarda büyük tepe noktaları olacaktır.

Denklem (2.19) da tanımlanan ifade hesaplanırken, (2.17) de tanımlanmış  $A$  matrisinin özdeğer vektörlerinden kaç tanesinin sinyal uzayını kaç tanesinin gürültü uzayını temsil ettiğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu sınır değeri bu çalışmada sıklıkla  $M$  değeri olarak adlandırılacaktır. MUSIC yöntemi formülasyonunda, ideal noktasal ve ayırık saçıcılar için Bu  $M$  değerinin saçıcı sayısı ile belirlendiği Cheney [22] tarafından belirtilmiştir. İdeal durumda örneğin 2 noktasal saçıcının olduğu durumda  $A$  matrisinin özdeğer vektörlerinin sayısı kaç olursa olsun özdeğer vektörlerden 2 tanesi kaydedilebilir büyüklükte kalanlar ise gürültü uzayını temsil ettikleri için teorik olarak sıfır pratikte ise oldukça küçük olacaktır. Bu durumda MUSIC yöntemi çıktısı oluşturulurken (2.19) da ifade edilen büyüklük, en büyük 2 özdeğer vektörü kullanılmadan diğer kalan ve gürültü uzayını temsi eden özdeğer vektörleri kullanılarak oluşturulacaktır. Bu durumda MUSIC yöntemi az sayıda saçıcının bulunduğu fakat ölçme sayısının çok daha fazla olduğu geometrilerde daha başarılı sonuç vermesini sağlamaktadır.

Devaney [24], MUSIC yönteminin düzensiz ve seyrek multi statik ölçme elektromanyetik görüntüleme sistemlerindeki performansını incelemiştir.

Bu çalışma içerisinde kullanılan MUSIC yöntemi ile LSM ve FM arasındaki benzerlik Cheney tarafından verilmiştir [22]. Cheney tekil saçıcı cisimlerin bulunduğu elektromanyetik ters görüntüleme problemi ile LSM metodu arasındaki matematiksel benzerliği kullanarak MUSIC yönteminin LSM ve FM yöntemleri ile benzerliğine dikkat çekmiştir. Sinyal işleme problemlerine uygulanan klasik MUSIC algoritmasının, elektromanyetik görüntüleme uygulamalarındaki kullanımı genel olarak zamanda çevrilmiş MUSIC algoritması (Time reversal MUSIC) olarak adlandırılmaktadır. Bunun sebebi denklem 2.17 de tanımlanmış  $A$  matrisini oluşturan ( $A = K^*K = \bar{K}K$ ),  $\bar{K}$  matrisinin Multi Statik Response Matrisi  $K$ 'nın frekans ekseninde zamanda çevrilmiş hali olarak yorumlanmasıdır.

Ciunzo, Romano, ve Solimene [21] TR-MUSIC (Time reversal MUSIC) yönteminin performance analizini yayınlamışlardır. Fazli, Nakhkash, ve Heidari [25] deneysel ölçmelerdeki pratikte yaşanan sınırlamalarının elektromanyetik görüntüleme problemlerinde incelemiştir.

MUSIC algoritması çeşitli elektromanyetik görüntüleme problemleri için çalışılmıştır. Hossain ve Mohan [26] MUSIC yöntemini meme kanseri erken teşhisinde kullanımını incelemiştir. Yoon ve Amin [27] yöntemin duvar arkası görüntülemesi ile ilgi

çalışmalarını yayınlamışlardır. Zhang, Zhu, ve Kuang [28] yöntemin aşağı bakışlı çizgisel anten dizisi ile senetik açıklıklı 3 boyutlu görüntüleme üzerinde çalışmalar yapmıştır.

Deneysel ölçmelerle, MUSIC yöntemi ile elektromanyetik olarak görüntü üretmede kullanılan algoritma şu şekildedir. Aşağıdaki algoritma Şekil 8 de gösterilen problem referansları ile tek frekansta yapılan bir ölçme için anlatılmıştır.

- 1- Şebeke analizörü kullanılarak N adet anten kullanan düzende, deney düzeneği kaynaklı hataları yok edebilmek amacı ile ortamda saçıcı cisim bulunmadan bir referans ölçme olarak  $N \times N$  boyutlarında saçınım  $\mathbf{K}_0$  matrisi ölçülür.
- 2- Saçıcı cisimler yerleştirilerek, olarak  $N \times N$  boyutlarında saçınım  $\mathbf{K}_t$  matrisi ölçülür.
- 3- Deneysel düzeneğin etkilerinden arındırılmış, sadece saçıcıların etkisini barındıran  $\mathbf{K} = \mathbf{K}_t - \mathbf{K}_0$  hesaplanır.
- 4-  $\mathbf{A} = \mathbf{K}^* \mathbf{K} = \bar{\mathbf{K}} \mathbf{K}$  kullanılarak Hermetian  $\mathbf{A}$  matrisi hesaplanır.
- 5-  $\mathbf{A}$  Matrisi N adet öz-değerleri ve N adet öz-vektörleri hesaplanır.
- 6- N adet öz-değerlerin büyüklükleri sıralanır, en büyük kaç adet öz-değerin sayısına bakarak, öz-vektörlerin kaç tanesinin sinyal uzayını taradığına karar verilir. Bu sayı M olarak gösterelim ( $M < N$ ). Böylece N-M adet öz vektör gürültü uzayını taramış olmaktadır.
- 7- Görüntü oluşturulmak istenen yüzey (2 boyutlu problem için) veya hacim (3 boyutlu problem için), oluşturulmak istenen görüntünün çözünürlüğü düşünülerek parçalara ayrılır. Bu bölgeye ilgi alanı olarak adlandırılır.
- 8- İlgi alanı içerisinde bir adet p noktası seçilir.
- 9- Bu p noktası için  $1 / \|P_{gürültü} g^p\|$  ifadesi hesaplanır. Bu ifade hesaplanırken sadece gürültü uzayını tarayan öz-vektörler kullanılır. Hesaplanan büyüklük p noktası için eğer p noktası saçıcı cisimler tarafından oluşturulmuş olan sinyal uzayı içerisinde ise büyük, gürültü uzayında ise küçüktür.
- 10- 8 ve 9 numaralı adım ilgi alanındaki tüm noktalar için tekrarlanır.
- 11- 10 numaralı adımdaki hesaplanan büyüklükler çizdirilerek görüntü oluşturulur.



## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

### 2.1. Giriş

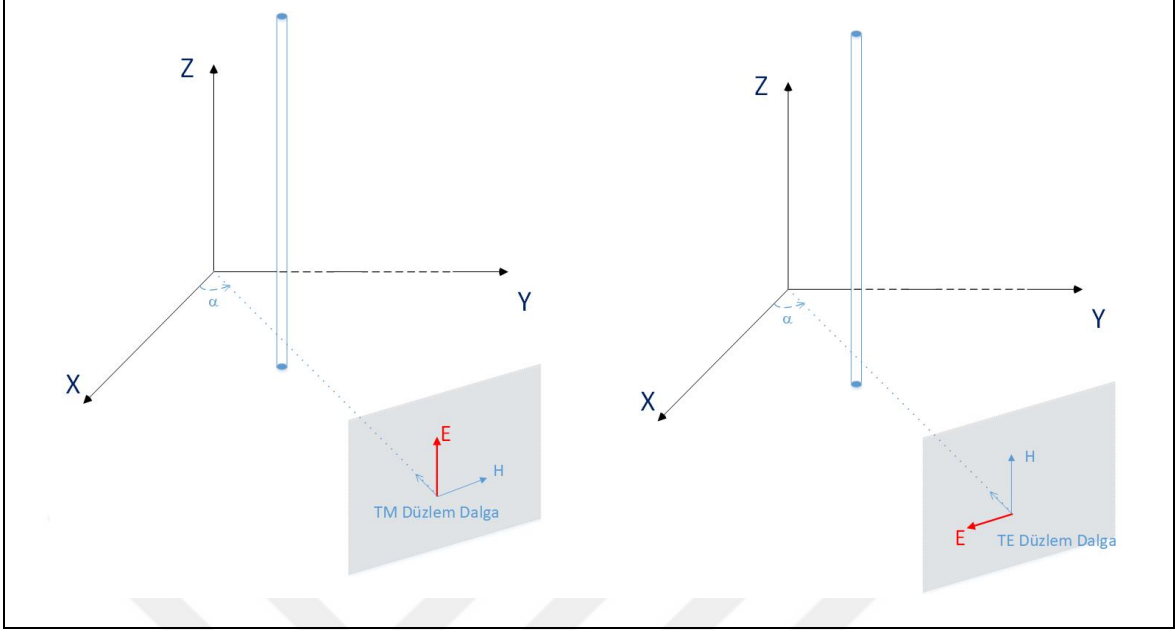
Bu doktora tezinde yapılan ölçme analiz ve deneyler ana hatları ile aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir.

- Tel saçıcı tespiti için, yansız oda (Un-Echoic Chamber) içerisinde yapılan, saçıcı polarizasyon etkisi ölçme deneyi
- Tel saçıcı 2 ve 3 boyutlu pozisyon, sayı ve saçıcı şekli görüntülenmesi amaçlı benzetim (Simülasyon) çalışmaları
- Yansız oda içerisinde yapılan, ince tel saçıcıların yerini belirlemeye yönelik ve 2 boyutlu silindirik koordinat eksenin de yerleştirilmiş tel saçıcı ölçüm deneyleri
- Laboratuvar şartlarında yapılan, ince tel saçıcıların 3 boyutlu konumunu, sayısını ve şeklini belirlemeye yönelik ve Kartezyen koordinat sisteminde yerleştirilmiş ölçme antenlerini kullanarak yapılmış tel saçıcı ölçüm deneyleri

### 2.2. Tel Saçıcı Tespiti İçin Yapılan Çalışmalar

Yöntemden bağımsız olarak, tel saçıcıların elektromanyetik görüntülenmesi problemine yaklaşırken, saçıcı cismin ince iletken tel cisim olma önbilgisi üzerinde düşünülmesi ve ayrıca analiz edilmesi gereken bir konudur.

Denklem (2.13) de  $\tau_m$ , parametresinin  $m$  numaralı saçıcının aydınlatma alanı etkisi ile ne büyüklükte bir saçılan alan oluşturduğunu gösteren bir katsayı olduğu gösterilmişti.  $\tau_m$  Parametresi saçıcı özellikleri ile ilgili çeşitli özelliklerden etkilendiği gibi, aydınlatıcı alanın sahip olduğu elektrik alanının yönü ile saçıcı telin yönü arasındaki açıdan da etkilenir.



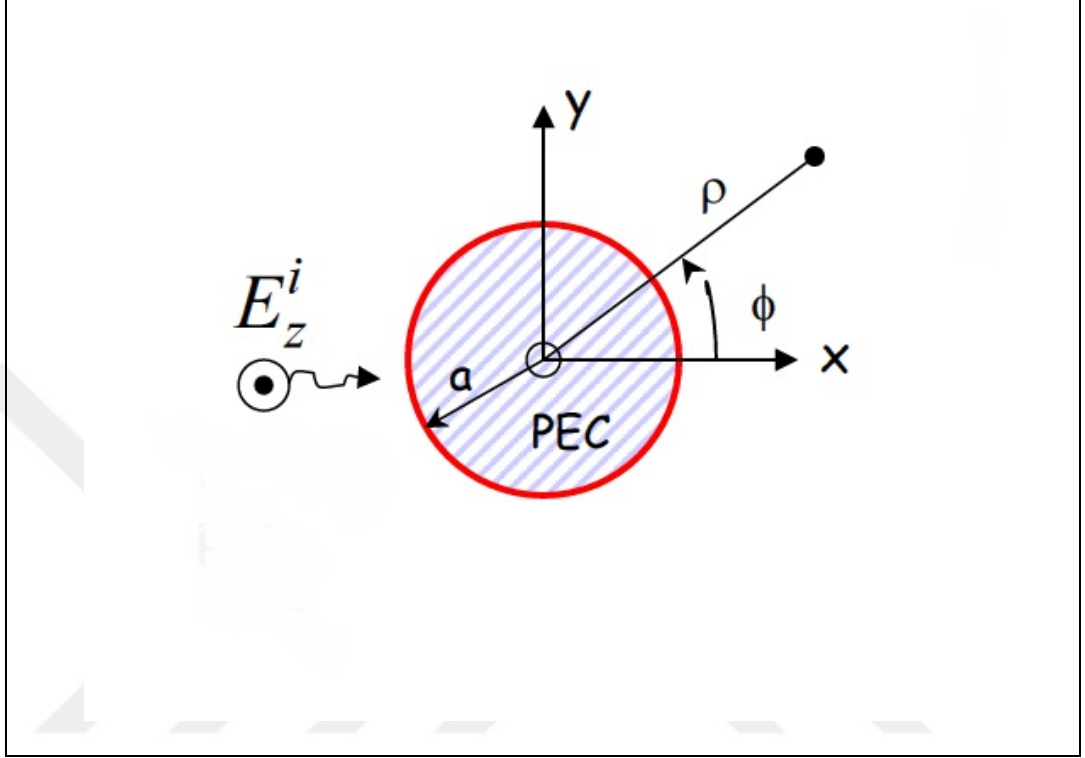
Şekil 9. Aydınlatıcı dalganın tel saçıcı doğrultusu ile ve paralel elektrik alanına sahip olması durumu

Şekil 9 da aydınlatıcı alanın sahip olduğu elektrik alan vektörünün tel saçıcı cisim ile paralel ve dik olduğu iki durum gösterilmiştir. Saçıcının  $z$  ekseninde sonsuz uzunlukta olduğu, saçıcı yarıçapının sıfır a yakınsadığı ve iletkenliğinin sonsuz olduğu teorik durum için, TE düzlem dalga durumunda tel saçıcı üzerinde bir akım indüklenmeyeceği için saçılan alan sıfır olacaktır. En fazla saçılan alanın olduğu durum ise Şekil 8 de gösterilmiş olan TM polarizasyon durumudur. Saçıcı cismin TM ve TE polarizasyon durumu dışında bir düzlem dalga ile aydınlatılması durumunda ise aydınlatıcı dalga TM ve TE iki bileşenine ayrılarak problem iki defa çözülüp sonuç süper-pozisyon ile birleştirilebilir.

Bu çalışmanın ileri aşamalarında, deneysel ölçme sonuçları değerlendirilirken, bu polarizasyon etkisi ve polarizasyonun değişik olduğu bu her iki durum denklem (2.15) de tanımlanmış olan özellikle çoklu statik etki matrisi  $K$  nın öz değer vektörlerine olan etkisi özellikle vurgulanmıştır.

Bu doktora çalışmasının ilk deneysel ölçmeleri bu polarizasyon etkisini laboratuvar koşullarında ölçmek üzere yapılmıştır. Bu ölçmelere geçmeden önce, mükemmel iletken bir silindir saçıcıdan TM düzlem dalga aydınlatması ile saçılım probleminin analitik çözümünü vermek bu tez çalışmasının bütünlüğü açısından gerekli görülmüştür.

### 2.2.1. Mükemmel İletken Bir silindir Kesitli Saçıcıdan, Düzlem Dalga Aydınlatmalı Alanlı Saçılım



Şekil 10. Mükemmel iletken sonsuz uzunluktaki silindir ve TM düzlem dalga aydınlatması

Şekil 10 da problem geometrisi şematığı gösterilmiştir.

Aydınlatıcı alanın  $-x$  koordinat eksenini yönünden geldiğini düşünelim.

$$\bar{E}^{aydinlatıcı} = \hat{a}_z E_0 e^{-jkx} = \hat{a}_z E_0 e^{-jk\rho \cos\phi} \quad (2.20)$$

Aydınlatıcı düzlem dalga, silindirik koordinat sisteminde sonsuz sayıda Bessel fonksiyonları toplamı olarak ifade edilebilir [4], [5].

$$\bar{E}^{aydinlatıcı} = \hat{a}_z E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^{-n} J_n(k\rho) e^{jn\phi} \quad (2.21)$$

Denklem (2.21) de  $J_n()$  Bessel Fonksiyonunu göstermektedir. Ortamda bulunan toplam dalga ise saçılan alan ve aydınlatıcı alanın toplamıdır.

$$\bar{E}^{toplam} = \bar{E}^{aydınlatıcı} + \bar{E}^{saçınan} \quad (2.22)$$

Saçılan alan orijinden (problem geometrisi merkezi) dışarı doğru ilerleyen dalga tipindedir. Bu sebeple saçılan alanı ikinci tip Hankel fonksiyonları serisi olarak ifade edebiliriz. [4]

$$E_z^{saçınan} = E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^{-n} a_n H_n^{(2)}(k\rho) e^{jn\phi} \quad (2.23)$$

Toplam alan ise aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$E_z^{toplam} = E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^{-n} \left[ J_n(k\rho) + a_n H_n^{(2)}(k\rho) \right] e^{jn\phi} \quad (2.24)$$

Saçıcı cismin mükemmel iletken olduğu düşünülürse, silindir yüzeyindeki teğet elektrik alanının sıfır olma sınır koşulu kullanılarak bilinmeyen  $a_n$  terimleri bulunabilir. [4].

Aşağıda saçılan alanın tüm bileşenleri verilmiştir [4]

$$E_\rho = E_\phi = H_z = 0$$

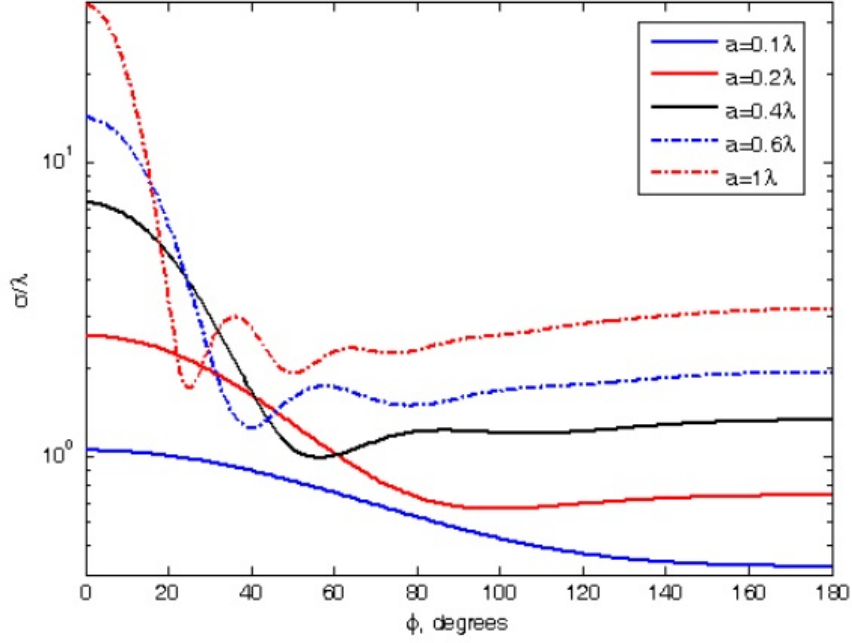
$$E_z = E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^{-n} \left[ J_n(k\rho) - \frac{J_n(ka)}{H_n^{(2)}(ka)} H_n^{(2)}(k\rho) \right] e^{jn\phi}$$

$$H_\rho = -\frac{E_0}{j\omega\mu\rho} \frac{1}{\rho} \sum_{n=-\infty}^{\infty} n j^{-n+1} \left[ J_n(k\rho) - \frac{J_n(ka)}{H_n^{(2)}(ka)} H_n^{(2)}(k\rho) \right] e^{jn\phi} \quad (2.24)$$

$$H_\phi = \frac{kE_0}{j\omega\mu} \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^{-n} \left[ J_n(k\rho) - \frac{J_n(ka)}{H_n^{(2)}(ka)} H_n^{(2)}(k\rho) \right] e^{jn\phi}$$

Radar kesit alanı  $\sigma$  ise aşağıdaki şekilde bulunur [4].

$$\sigma = \lim_{k\rho \rightarrow \infty} \left[ 2\pi\rho \frac{|E_z^{saçınan}|^2}{|E_z^{aydınlatıcı}|^2} \right] = \frac{4}{k} \left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{J_n(ka)}{H_n^{(2)}(ka)} e^{jn\phi} \right|^2 \quad (2.25)$$



Şekil 11. Mükemmel iletken silindir için çoklu statik radar kesit alanının tel çapı ile değişimi

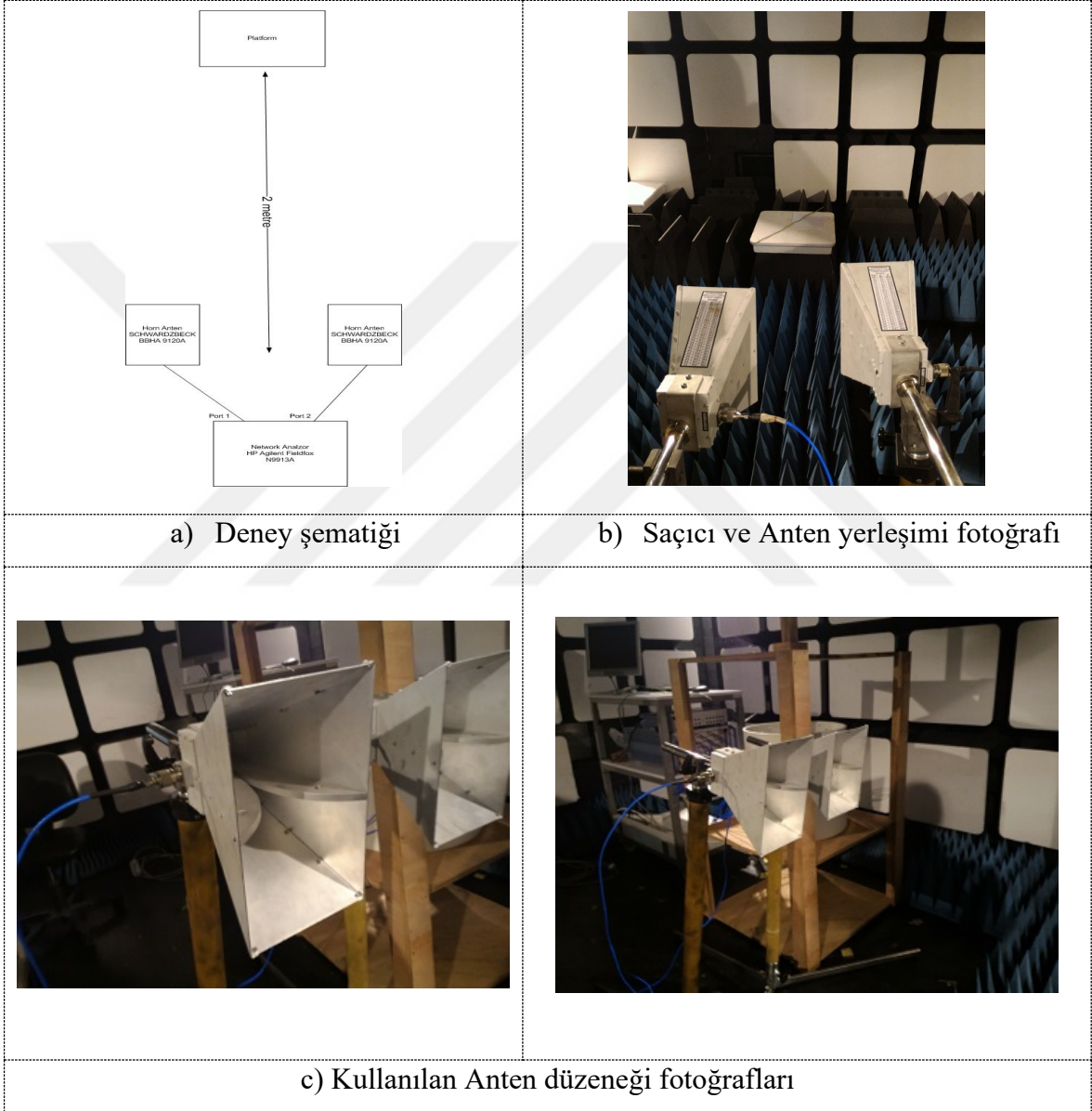
Şekil 11 de saçıcı iletken telin çapının değişiminin radar kesit alanına etkisi görülmektedir. Beklendiği gibi telin çapı azaldıkça, saçılan tel bir nokta kaynak olarak davranmakta ve herhangi bir gölgeleme etkisi olmadan üzerinde aydınlatıcı alan tarafından indüklenmiş olan akımı her tarafa simetriğe yakın bir şekilde yeniden yayınlamaktadır.

Aydınlatıcı dalganın sahip olduğu elektrik alanı yönünün, tel saçıcı doğrultusu ile yaptığı açının, oluşan saçılan alanı etkilemesi ve en fazla saçılımın iki doğrultunun paralel olduğu durumda oluşması, tel saçıcıları geometrisi değişik diğer saçıcılarda ayırt edici bir özellik olduğu için bu çalışmada çözülmek istenen tel saçıcı tespit problemi için önemlidir.

Bu özellik, bu doktora tezi çalışmasında, çözülmek istenen problem ile direkt ilgili olduğu için çok önemlidir ve ince tel saçıcıların, diğer geometrik olarak ince tel kapsamına girmeyen diğer saçıcılardan ayırt edilmesi için potansiyel bir yöntem olarak bu çalışmada önerilmiş ve deneysel olarak doğrulanması hedeflenmiştir.

### 2.2.2. Aydınlatıcı Dalga Elektrik Alanı Polarizasyon Vektörü ve Saçıcı Yönünün Saçılan Alana Etkilerinin Laboratuvar Ortamında Ölçülmesi

Bu doktora tezi çalışmasında, 3.2.1 alt başlığında, teorik olarak analiz edilen polarizasyon etkisi, laboratuvar şartlarında yapılan deney ve ölçmelerle gözlemlenmiştir.

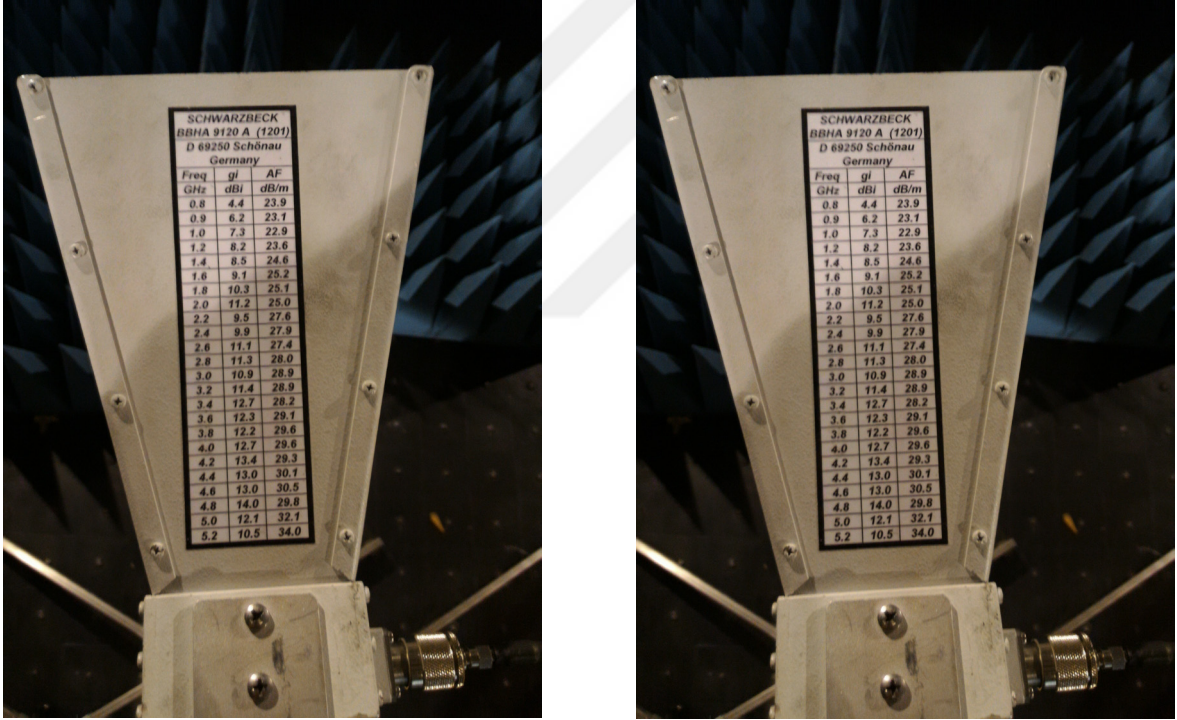


Şekil 12. Polarizasyon Etkisi Ölçme Deney Düzeneği

Deney düzeneği ve kullanılan anten platformu fotoğrafları şekil 12 de gösterilmiştir. Ölçmeler laboratuvar şartlarında ve Elektromanyetik Yansız Oda (Unechoic Chamber) içerisinde gerçekleştirilmiştir. Bu sayede dışarıdan gelebilecek elektromanyetik etkileşimin ölçmeye en az etkilemesi hedeflenmiştir. Deneyin amacı ince tel yansıtıcıların, aydınlatıcı

elektromanyetik dalganın elektrik alanının yönü ile tel yansıtıcının uzantısı arasındaki polarizasyon açısına bağımlılığını gözlemek ve polarizasyon etkisi kullanılarak, ilgili alanda herhangi bir iletken tel yansıtıcının tespit edilmesi yönünde kullanılabileceğinin gösterimidir.

Deney düzeneğinde ölçme cihazı olarak, HP Agilent Fieldfox N9913A, Vektör network analizör cihazı kullanılmıştır. Ölçme anteni olarak ise iki adet SCHWARDZBECK BBHA 9120A RF Geniş bantlı Horn Anten kullanılmıştır. BBHA 9120A anteni 0.8GHz den 10.5 GHz e kadar tanımlı bir kalibre laboratuvar ölçme antenidir. Kullanılan antenlerin fotoğrafları Şekil 13 de gösterilmiştir. Kullanılan antenler 0.8 GHz ila 5.2 GHz bandında çalışabilmektedir.



Şekil 13. SCHWARDZBECK BBHA 9120A RF Geniş bantlı Horn Anten

Ölçmeler sırasında 3 farklı Tel saçıcı kullanılmıştır, bunlar

1. TEL1: 30cm uzunluğunda
2. TEL 2: 74 cm uzunluğunda
3. TEL 3: 133 cm uzunluğunda

Ölçmelerde vektör şebeke (network) analizörü kullanılarak S21 saçınım parametresi (S parametre) ölçülmüştür. Şebeke analizörün çıkış gücü 0dBm alınarak, 40 noktalı, noktasal ortalama ölçme seçeneği seçilerek rastgele ortam gürültülerinin deney sonuçlarına etkisi azaltılmıştır.

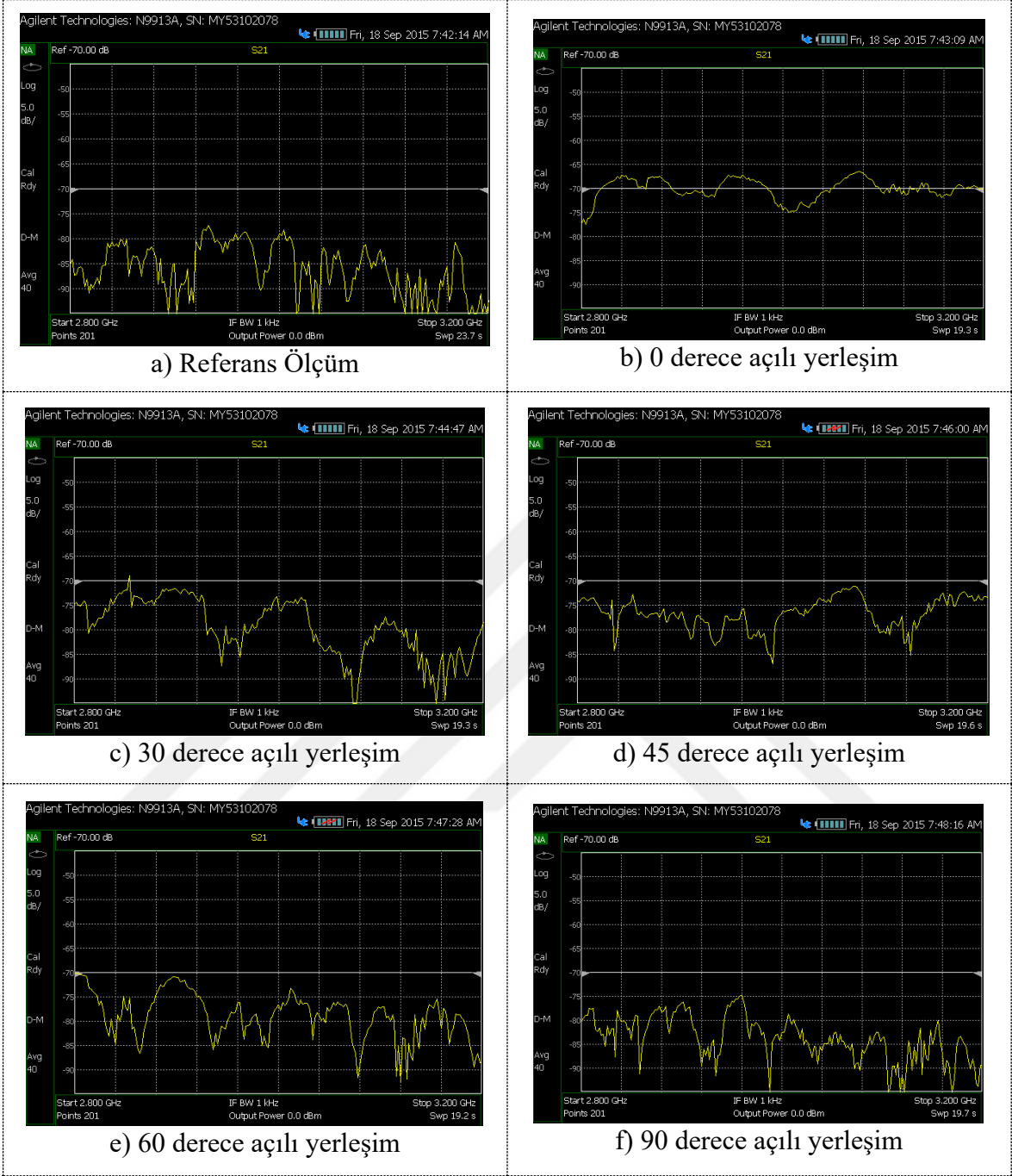
### **2.2.3. Boş Referans Ölçüm Kullanılarak Yapılan Laboratuvar Deneyi**

Laboratuvar deney düzeneği fotoğraflarımda görüldüğü şekilde, alma ve gönderme antenleri yana yana konulmuş durumdadır. Bu durumda antenlerin birbirini etkilediği ortadadır. Gönderme anteninin yayınladığı aydınlatıcı alanın bir kısmı, tel saçıcıya ulaşmadan alma anteni tarafından alınmaktadır. Saçılan alanın çok küçük olacağı düşünülürse, bu antenden antene olan kuplajın deneyi etkilemesinin önüne geçilmesi önemli bir deneysel sorundur. Bunu sağlamanın en kolay yolu saçıcı olmadığı durumda yapılan ölçmenin kayıt edilmesi ve daha sonra yapılacak olan ölçmelerden bu referans ölçümün çıkartılarak bakılmasıdır. Bu alt başlıkta sonuçları verilen ölçmelerde, saçıcının bulunmadığı durum referans ölçüm olarak alınmış ve daha sonra saçıcı yerleştirildiğinde, saçıcı ölçme verisinden, Network analizörün özelliği kullanılarak, referans ölçüm çıkarılmıştır. Bu özelliğin kullanıldığı resimlerde ekranın solunda görülen “D-M” (Data – Memory) işareti ile görülmektedir.

Ölçmeler her üç saçıcı için, saçıcı açısı 0, 30, 45, 60 ve 90 derece olacak şekilde ölçülmüştür. Her bir ölçüm sonucu, S2P touchstone veri formatında ve ekran görüntüsü olarak PNG formatında kaydedilmiştir. Saçıcı açısı gösterilen 0 derece, uygulanan aydınlatıcı elektromanyetik alanın elektrik alan yönü ile tel saçıcının yönünün aynı olduğu doğrultuyu, 90 derece ise dik olduğu doğrultuyu göstermektedir.

Saçıcı TEL 1 kullanılarak yapılan ölçmelerin Network Analizör ekran görüntüleri Şekil 14 de gösterilmiştir.

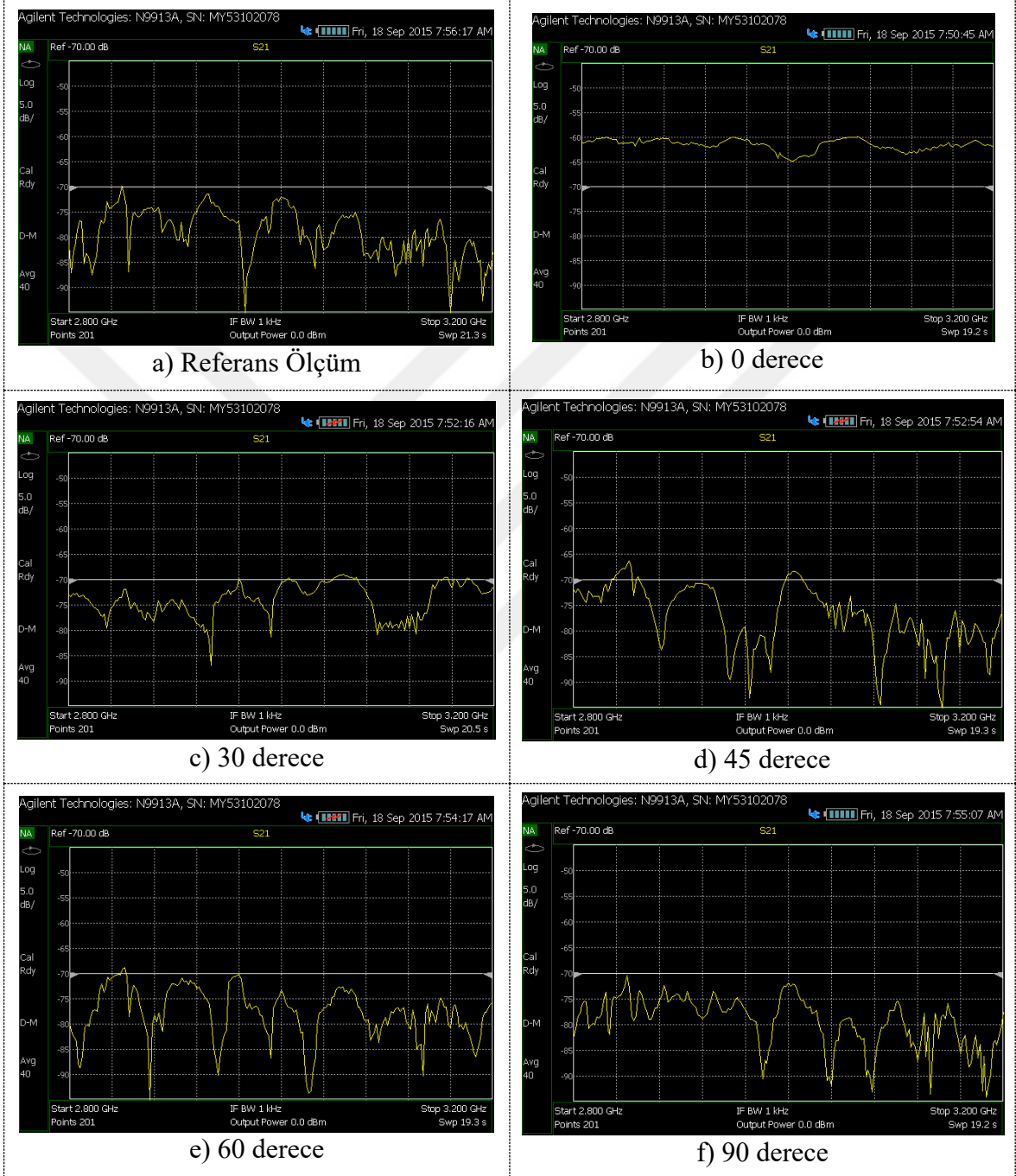




Şekil 14. Bir numaralı saçıcı tel (TEL 1) ölçümleri

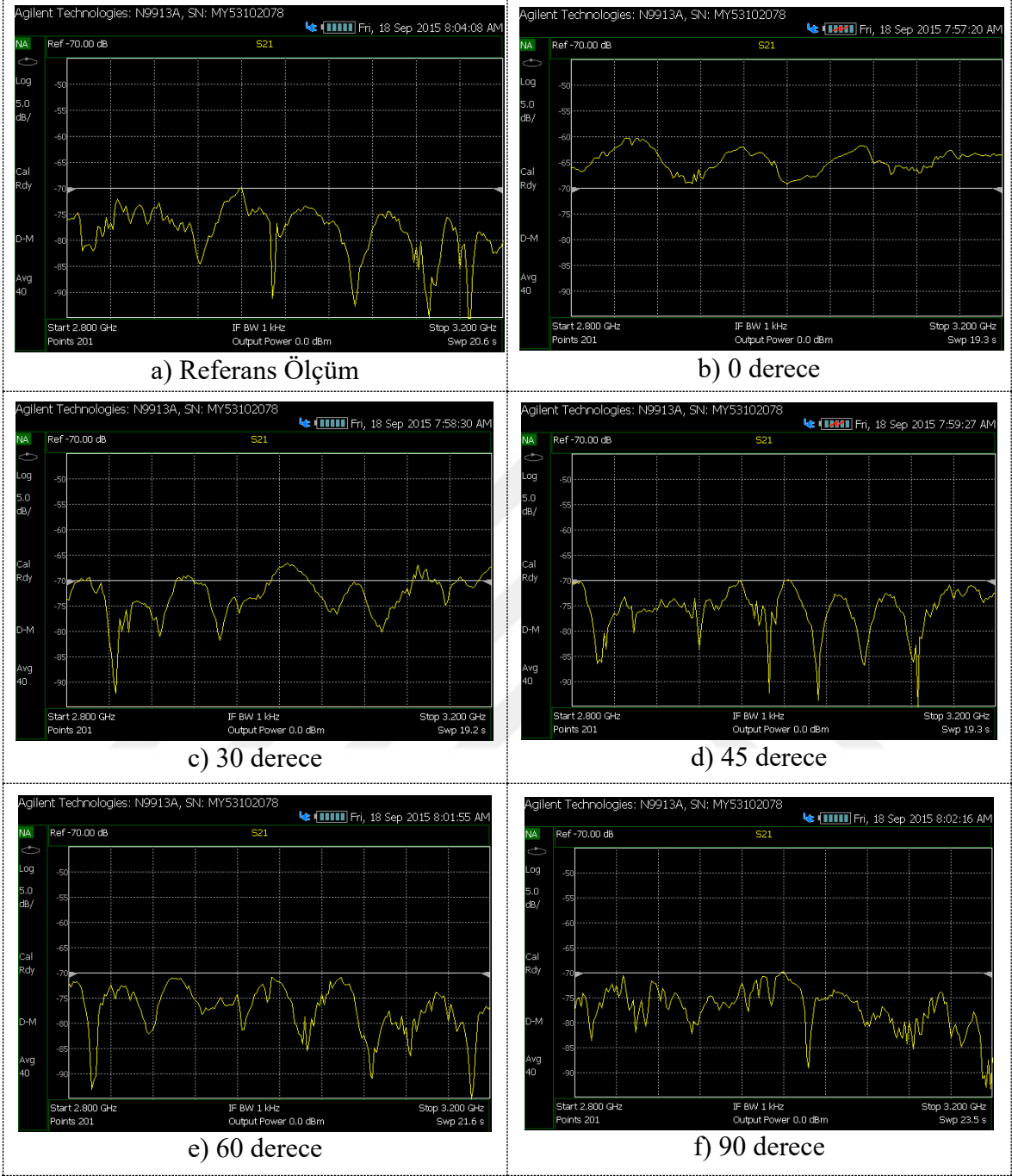
Şekil 14a da saçıcının olmadığı referans ölçme görülmektedir. Diğer alt şekiller olan b, c, d, e ve f de ise saçıcının konulmasından sonra alınan ölçmeden a da görülen referans ölçüm çıkarılarak ölçülmüş olan sonuçlar gösterilmiştir. Alt şekillerde gösterilen sonuçlarda, en fazla saçılımın Tel saçıcı 0 derece iken olduğu ve açı değiştikçe saçılan alanın azaldığını görülmektedir. Tel açısı 90 derece olduğunda ise saçılan alan ile boş referans ölçüm ile yani saçıcı olmadığı duruma yaklaşmaktadır.

Şekil 15 de İki numaralı saçıcı tel (TEL 2) kullanılarak yapılan ölçüm sonuçları gösterilmiştir.



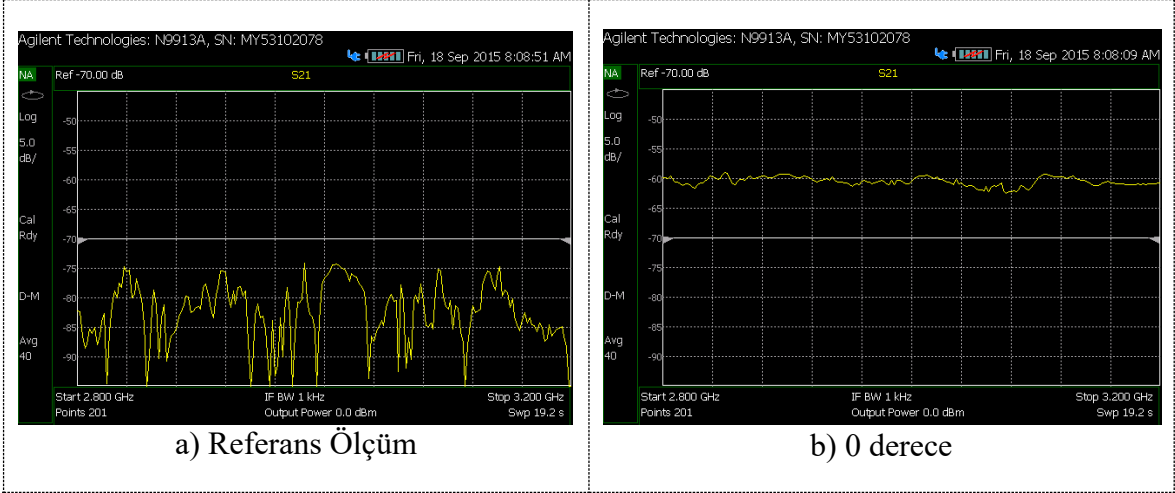
Şekil 15. İki numaralı saçıcı tel (TEL 2) ölçümleri

Şekil 16 da Üç numaralı saçıcı tel (TEL 3) kullanılarak yapılan ölçüm sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 16 .Üç numaralı saçıcı tel (TEL 3) ölçümleri

Üç ayrı saçıcı ile yapılan ölçmelerde polarizasyon etkisinin tüm saçıcılar için benzer sonuçlar verdiği Şekil 14, Şekil 15 ve Şekil 16 da gösterilmiş olan sonuçlarda görülmektedir. Ölçüm son olarak, uzun bir saçıcı denemesi olarak 5mt tel kullanılarak tekrarlanmıştır.



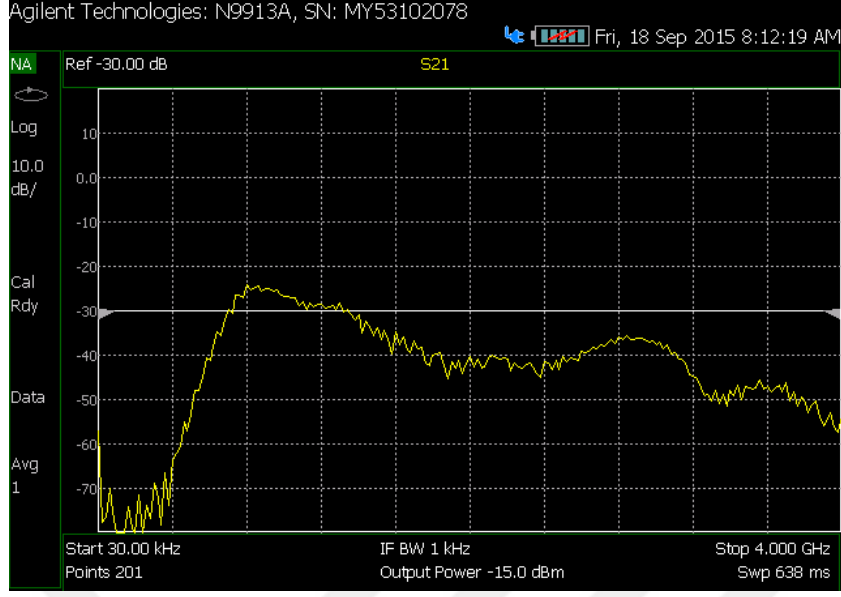
Şekil 17. 5 metre uzunluğunda saçıcı

Saçıcı cisim uzunluğu ve yansısız oda boyutları uygun olmadığı için sadece 0 derece açı ile ölçme yapılabilmektedir. Şekil 17 de ölçme sonucu gösterilmiştir. Sonucun diğer ölçmeler ile paralel olduğu görülmektedir.

#### 2.2.4. Boş Referans Ölçümü Kullanılmadan Yapılan Laboratuvar Deneyi

Deneyin ilk bölümünde öğrenilen boş referans ölçüm kullanılarak, laboratuvar koşullarında, telin tespitinin mümkün olduğu gösterilmiştir. Bu ölçmelerde saçıcının yönünün değiştirilmesi ise bu tez çalışmasında çözülmek istenen sorunun çözümü için uygun olamayacak bir yöntemdir. Araziye döşenmiş bir teli tespit edebilmek için telin yönünü değiştirmek kullanılabilir bir yöntem değildir. Bu sebep ile deneyin ikinci kısmında saçıcıya dokunulmadan ve referans kullanılmadan S21 ölçümleri yapılmış ve sadece S21 ölçümler kullanılarak, saçıcıya dokunmadan, sadece anten polarizasyonu değiştirilerek, tel saçıcının varlığı veya yokluğunun tespit edilebileceği gösterilmesi hedeflenmiştir.

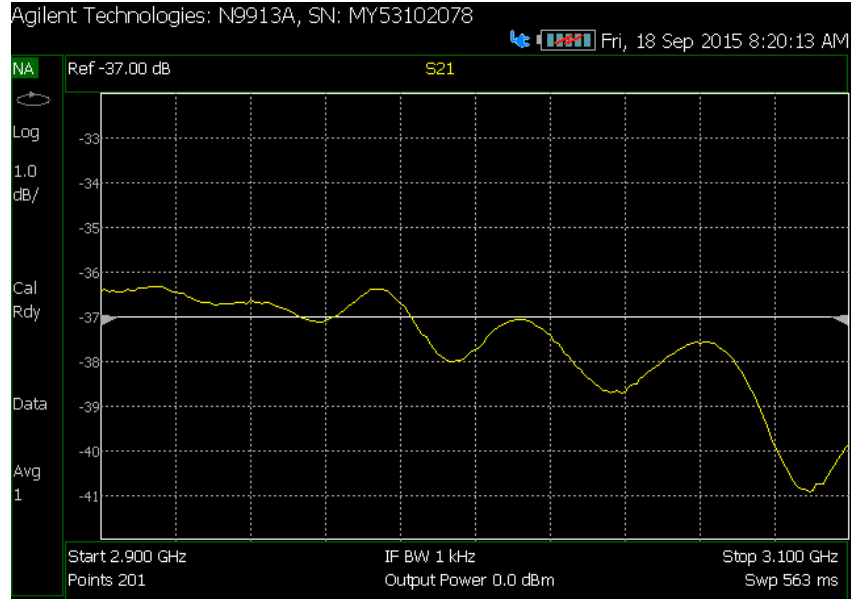
Karşıda saçıcı olmadığı durumdaki ölçüm gönderme ve Alma anteninin izolasyon değeri olarak alınabilir ve kullanılabilir. Laboratuvar deneyinde kullanılan anten düzeneği izolasyon ölçüm sonucu şekil 18 de gösterilmiştir. Bu ölçüm alma ve gönderme anteninin birbirlerine yaptığı kuplajı frekansa bağlı olarak göstermektedir. Antenler 0.8GHz den düşük frekanslarda alma ve gönderme yapamayan antenler olduğu için, düşük frekanslardaki kuplaj değeri düşük ölçülmektedir.



Şekil 18. Alma gönderme anteni izolasyon ölçümü

Şekil 18 de gösterilen geniş bant ölçümünde (30 KHz ila 4 GHZ ) antenlerin izolasyon değerinin 25 dB den iyi olduğu görülmektedir.

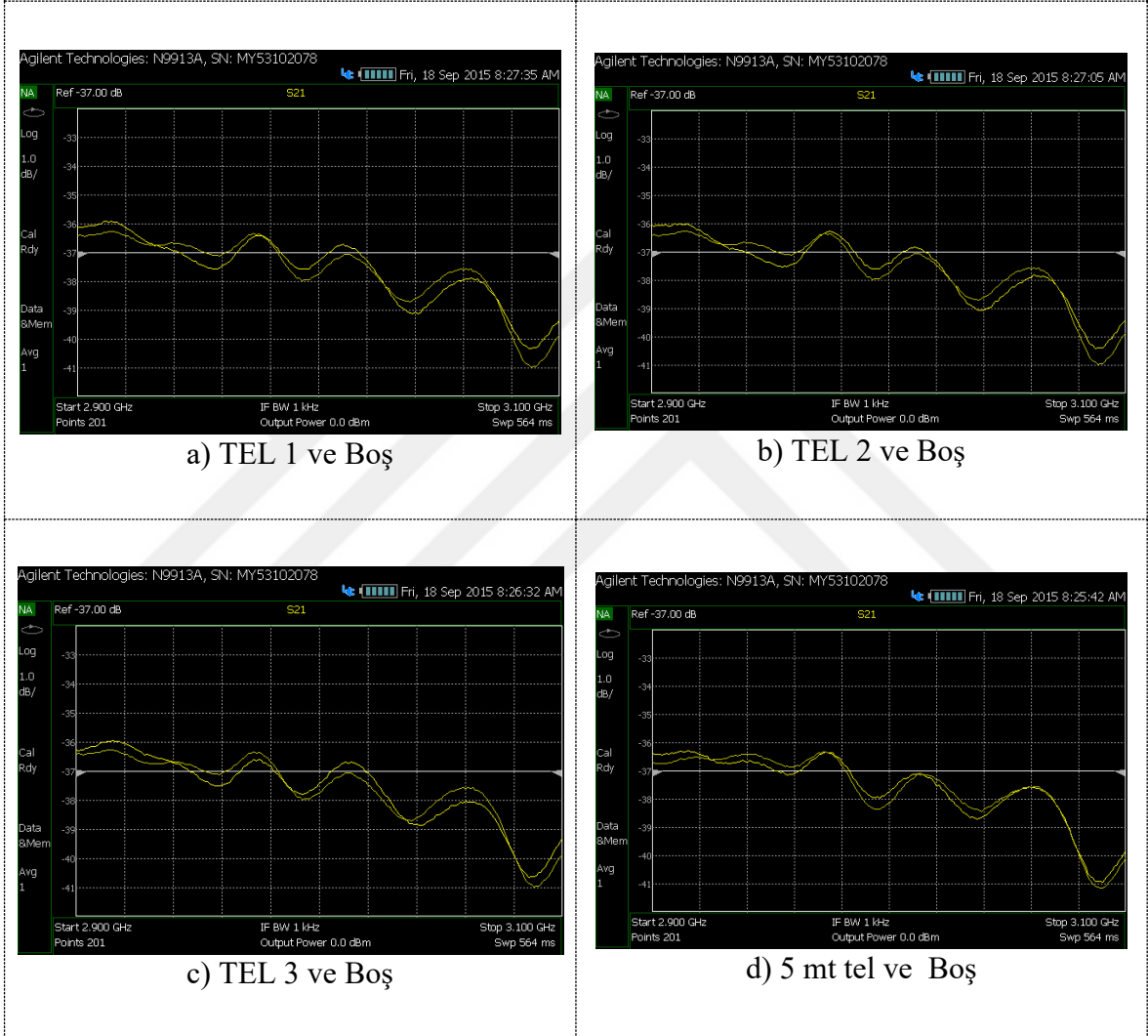
Deneyin devamında yapılan ölçmeler S21 açınım ölçmeleri ise 3GHz+/- 0.1 GHz bandında yapılmıştır.



Şekil 19. 3 GHz merkezli alma gönderme anteni izolasyon ölçümü

Şekil 19 da deneyde kullanılan ölçme frekans bandında saçıcı bulunmadan yapılan anten izolasyon ölçümü gösterilmiştir.

TEL1, TEL 2, TEL3 ve 5mt uzunluktaki saçıcının Boş ölçümüne göre yarattığı farklar aşağıda görülmektedir. Ölçümler her bir saçıcı için 0 derece için alınmıştır.



Şekil 20. Dört tel saçıcı için S21 parametresi ölçümleri ve boş ölçüm karşılaştırması

Şekil 20 de gösterilen sonuçlar, Tel saçıcıların belirli bir fark oluşturduğunu ancak bu farkın frekansa bağlı olarak değiştiği ve saçım seviyesinin küçük olduğunu göstermesi açısından önemlidir.

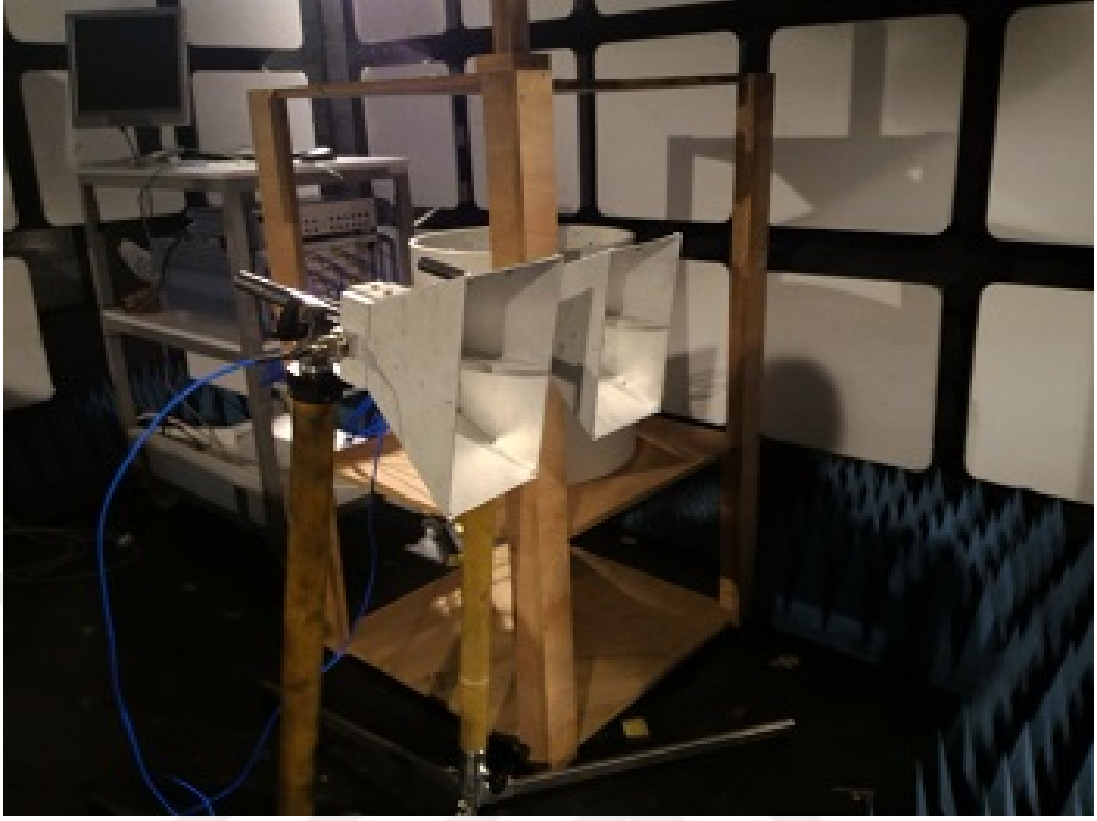
### 2.2.5. Gönderme ve Alma Anten Polarizasyonları Değiştirilerek Yapılan S21 lmleri

Telin yeri ve konumunun sabit olduğu düşünülürse, tespit için elde olan yöntemin kullanılabilmesi için gönderilen ve alınan elektromanyetik alan polarizasyonunu değiştirmek gerektiği açıktır. Bu sebep ile bu kısımdaki ölçmelerde tel saçıcılar 0 derecede tutulmuş, gönderme ve alma polarizasyonları ise lme antenler döndürülerek değiştirilmiştir.

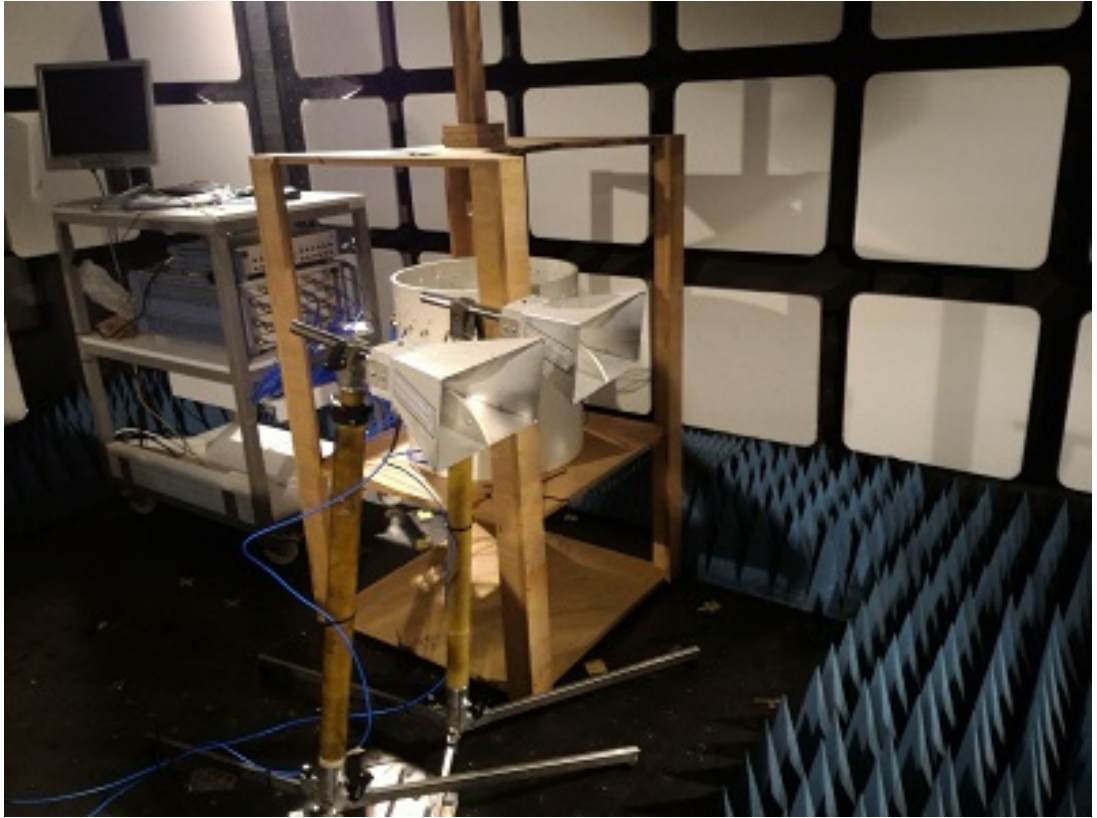
Laboratuvar lme deney geometrisinde antenlerin yatay polarizasyonda olduğunda uygulanan elektrik alanı polarizasyonu ile tel saçıcı doğrultusunun aynı doğrultuda olduğu durumdur. Antenlerin dikey polarizasyonda olduğu durum ise uygulanan elektrik alanı polarizasyonu ile tel saçıcı doğrultusunun dik doğrultuda olduğu durumdur.

DeneySEL doğrulama çalışmasından beklenti ise antenlerin yatay polarizasyonda olduğu durumda saçınan alanın büyük olması ve saçıcının fark yaratması, dikey polarizasyonda ise saçınan alan küçük olacağı için yaratmaması şeklinindedir.

şekil 21 ve şekil 22 de yatay ve düşey polarizasyon için deney düzeneğindeki antenlerin fotoğrafı aşağıdadır. Deney lmesi öncelikli olarak yatay polarizasyon kullanılarak yapılmış, ardından anten yönleri polarizasyon yönleri değiştirilerek ölüm tekrar alınmıştır.



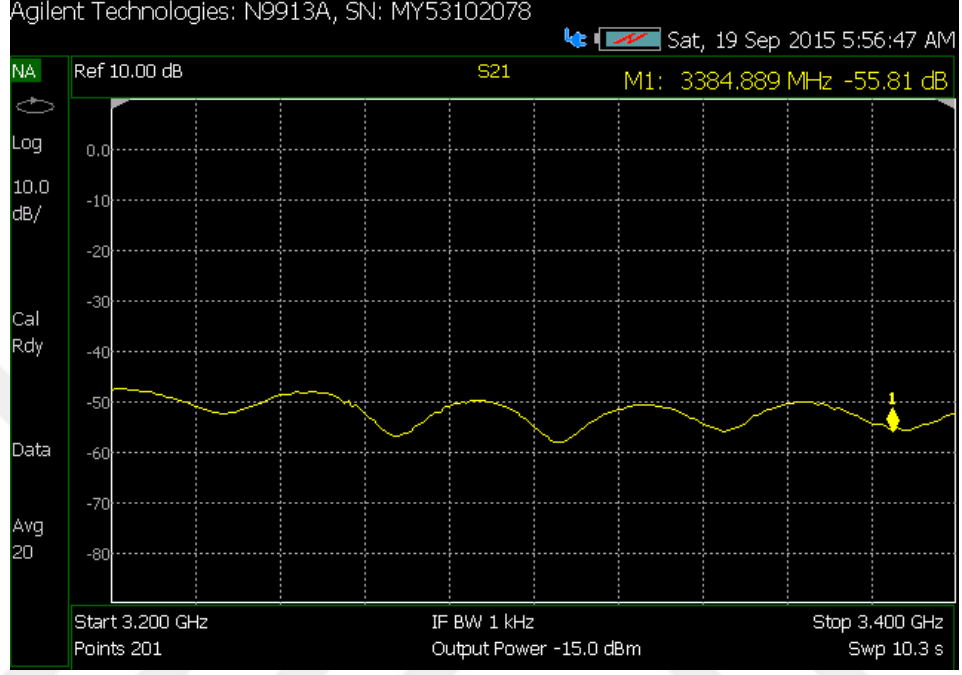
Şekil 21. Yatay polarizasyon olarak ayarlanmış anten düzeneği fotoğrafları



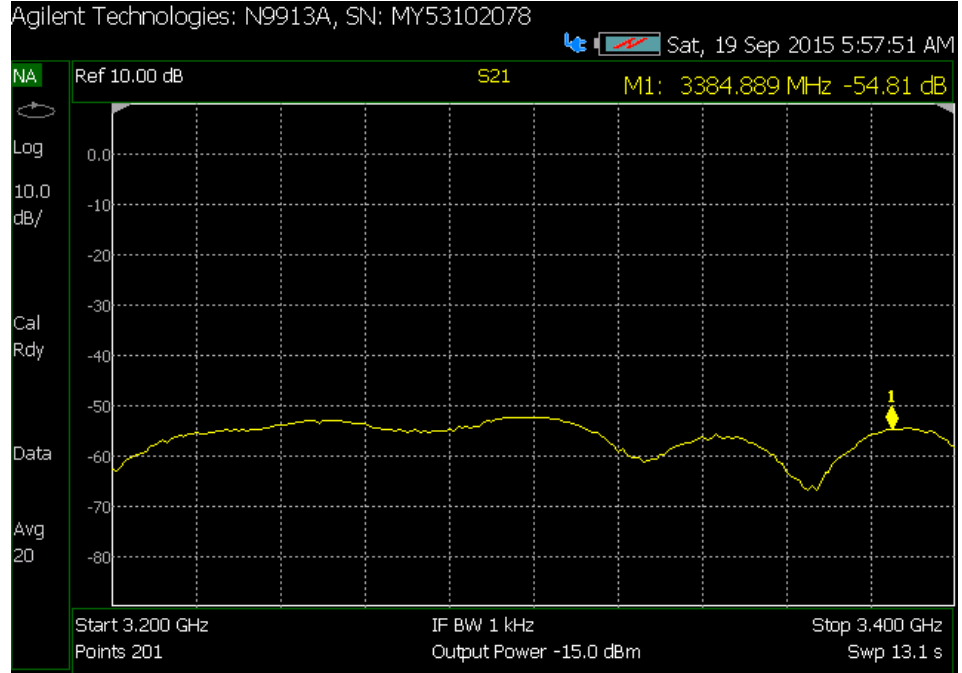
Şekil 22. Yatay polarizasyon olarak ayarlanmış anten düzeneği fotoğrafları



Antenlerin her iki yerleştirilme durumu için anten kuplajını gösteren izolasyon ölçmeleri Şekil 22 ve Şekil 23 de gösterilmiştir.



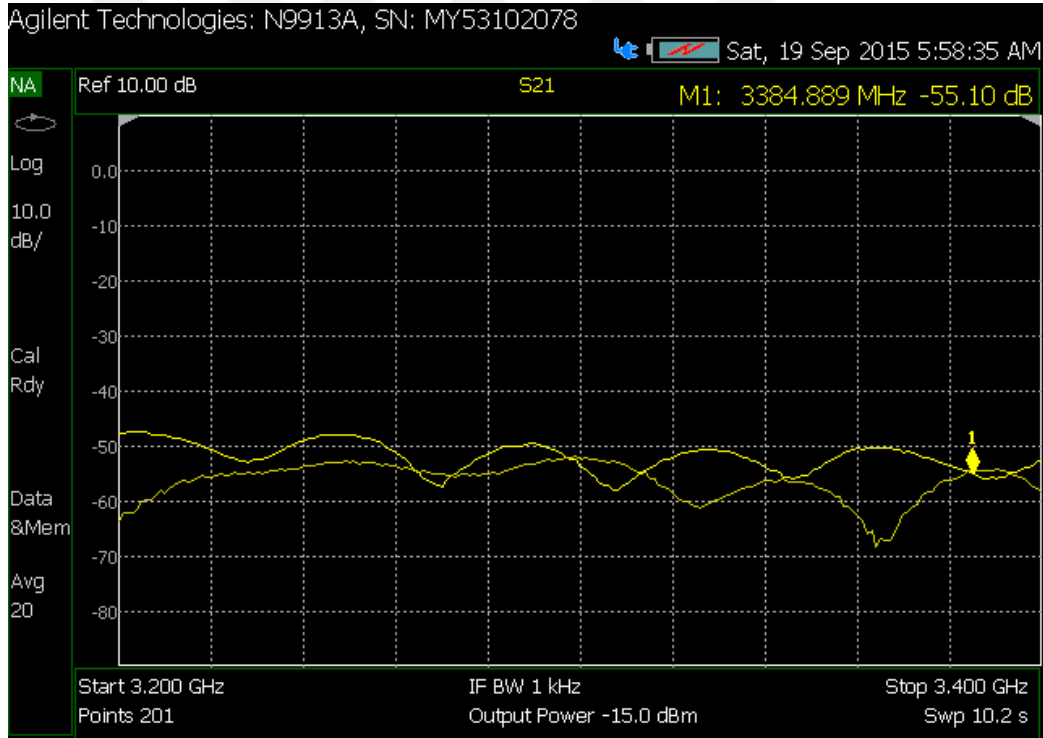
Şekil 23. Yatay polarizasyonda yerleştirilmiş anten izolasyon ölçümü



Şekil 24. Dikey polarizasyonda yerleştirilmiş anten izolasyon ölçümü

Şekil 23 ve 24 incelendiğinde, Yatay ve düşey polarizasyon yerleşimleri için anten izolasyon değerlerinin değiştiği görülmektedir. Bu durumun sebebi anten geometrisinin simetrik olmaması ve çevresel etkenlerdir. Ölçümler yansız odada yapılmış olmasına rağmen, odanın simetrik olamaması ve oda tabanının kaplanması (soğurucu koniler oda tabanında, duvarlarda olduğu kadar bulunmamaktadır). Ürün geliştirme çalışmalarında, antenler tasarlanırken bu noktaya dikkat edilerek bu etki azaltılabileceği değerlendirilmektedir.

Şekil 25 de antenlerin dikey ve yatay polarizasyon konumlarında yapılmış olan, 3 numaralı TEL saçıcının 0 derece açı ile bulunduğu ölçme aynı ekran üzerinde sonucu gösterilmiştir.



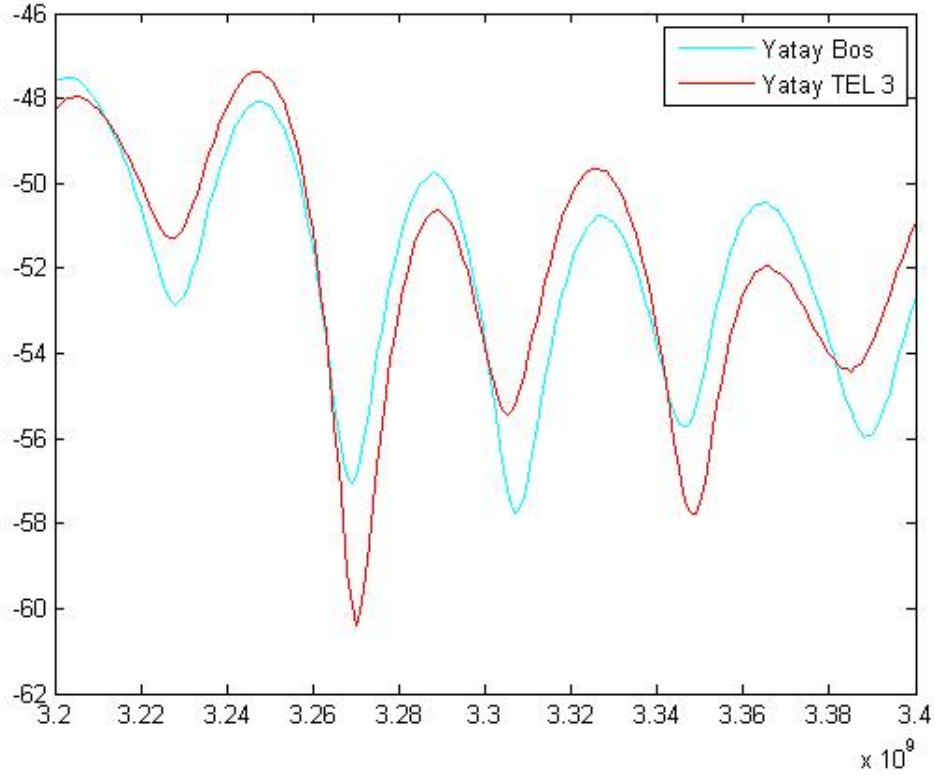
Şekil 25. Yatay ve Düşey polarizasyonda ile saçınan alan ölçümü (TEL 3)

Şekil 23 ve 24 de gösterilen izolasyon farkının tel saçıcının tespit edilmesinde engel olacağı açık olarak görülmektedir. Aşağıda bu durumu ortadan kaldıracak, yöntem önerilmiştir.

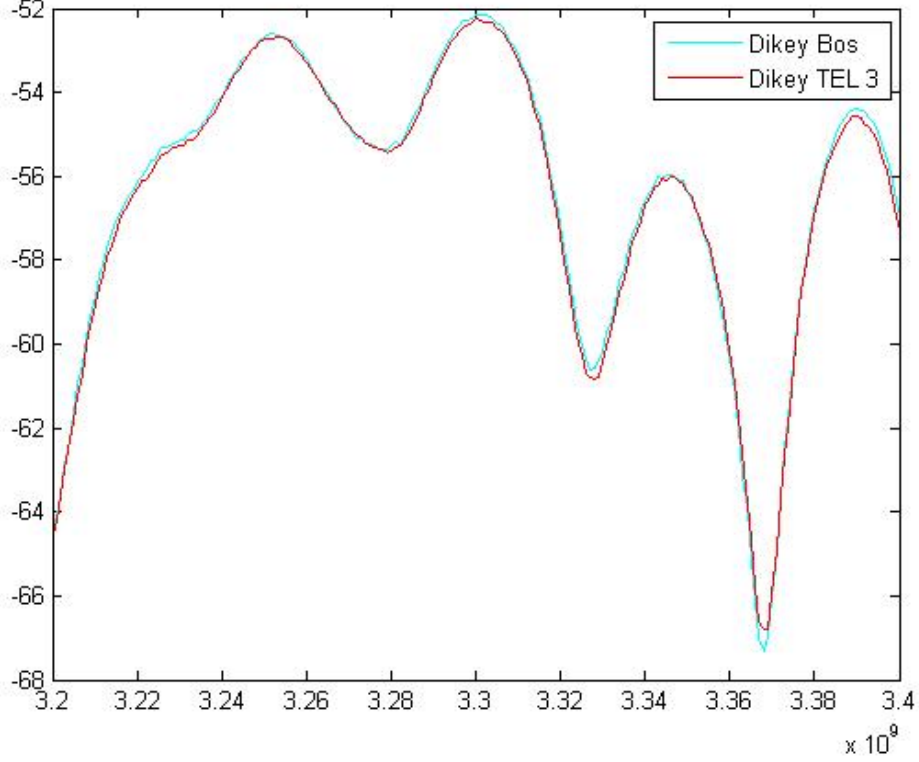
Tel saçıcı cisim tespiti için, aşasındaki algoritmanın geliştirilmiş ve ölçmelere uygulanmıştır. Uygulanan algoritma,

1. Yatay polarizasyon boş (izolasyon) referans ölçümü ve kaydedilmesi
2. Düşey polarizasyon için boş (izolasyon) referans ölçümü ve kaydedilmesi
3. Yatay polarizasyon ölçümü alınması
4. Yatay ölçümden yatay referansın çıkarılması ile yatay fark hesaplanması
5. Dikey ölçümden dikey referansın çıkarılması ile dikey fark hesaplanması
6. Yatay farkın belirli bir seviyeden fazla, düşey farkın belirli bir seviyeden az olması durumu, 0 derece konumunda tel varlığını işaret edecektir.

Önerilen algoritma, MATLAB platformunda deney ölçümü sonucuna uygulanmış ve sonuçları Şekil 26 ve Şekil 27 de gösterilmiştir.



Şekil 26. Yatay polarizasyonda TEL 3 ün boş durumuna göre ölçümleri



Şekil 27. Dikey polarizasyonda TEL 3 ün boş durumuna göre ölçümleri

Şekil 26 da tel saçıcının belirgin bir fark yarattığı, Şekil 27 de ise bu farkın daha az olduğu görülmektedir.

Deneyden elde edilen sonuçlar, önerilen algoritma ile değerlendirildiğinde, aydınlatıcı alan polarizasyonu ve tel saçıcı doğrultusu arasındaki polarizasyon açısı değiştirilerek yapılan ölçümlerin, ortamda bulunan tel saçıcının tespiti için kullanılabileceğini göstermiştir.

Ürün geliştirme çalışmalarında, simetrik tasarıma sahip izolasyon değeri düşük olan antenlerin tasarlanması gerekmektedir. Polarizasyon tip değişikliği mekanik veya elektronik olarak yapılabilmektedir. Elektronik polarizasyon ayarı durumunda dikey ve yatay iki konumlu polarizasyon kullanılması yerine açısı değiştirilebilir polarizasyon kullanılarak, daha fazla polarizasyon açısında ölçüm alınması ve ürünün tespit başarısının artırılması olası görülmektedir.

Laboratuvar test cihazı yerine bu amaçla tasarlanmış, daha yüksek RF çıkış gücü veren bir göndermeç ve alma hassasiyeti ve gürültüsü daha iyi bir almaç donanımı, tespit menzilin artmasını sağlayacaktır.

### 2.3. Benzetim Çalışmaları

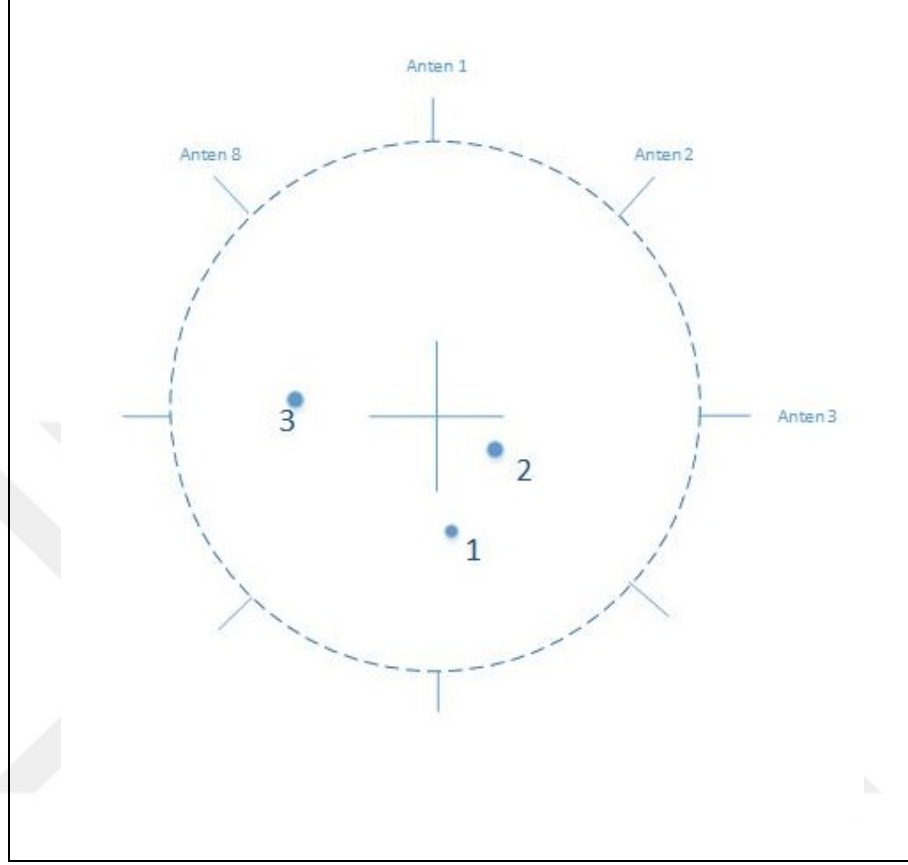
MUSIC algoritması ile tel şeklindeki saçıcıların görüntülenmesi ile ilgili laboratuvar deneylerine geçmeden önce, yöntemin performansı benzetim araçları kullanılarak çalışılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında iki temel çalışma planlanmıştır.

Bunlardan birincisi, düz tel saçıcıların, yerini belirlemeye yönelik benzetim (simülasyon) ve deneylerdir. Bu deneyin ve paralelde yapılan benzetimin geometrisi, silindirik koordinatlar ile ötüşmektedir. Detaylar ilgili bölümde (3.3.1) verilmiştir.

İkinci çalışma ise, düz tel saçıcıların, şeklini belirlemeye yönelik benzetim ve deneylerdir. Bu çalışmanın geometrisi, Kartezyen koordinatlar ile ötüşmektedir. Detaylar ilgili bölümde (3.3.2) verilmiştir.

### 2.3.1. MUSIC Yöntemi ile İki Boyutlu Silindirik Koordinatlarda, Tel Saçıcıların Pozisyonunun Bulunması Benzetimi Çalışmaları



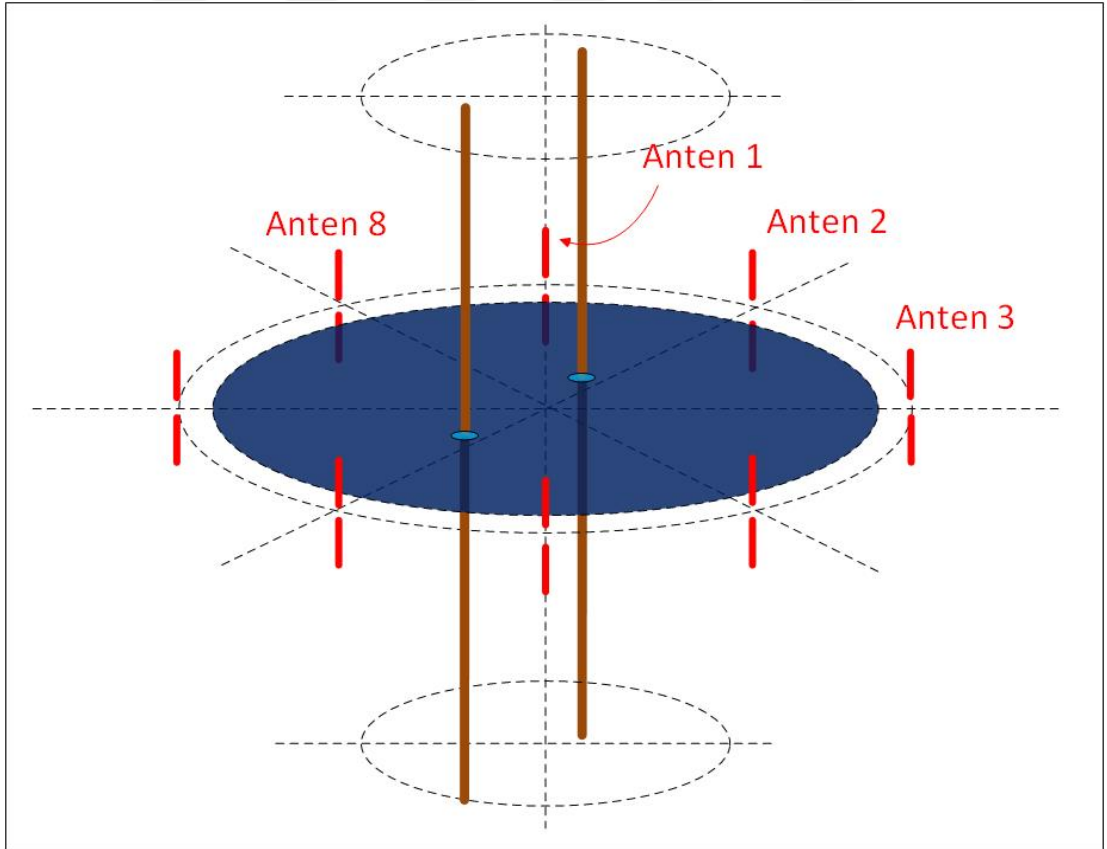
Şekil 28. İki Boyutlu Silindirik Koordinatlarda Saçıcıların Pozisyonunun Bulunması Problem geometrisi

Bu kısımda ele alacağımız problem belirli sayıda ölçme anteni ile çevrelenmiş bir ölçme uzayında bulunan, sonsuz uzunlukta iletken düz tel saçıcıların koordinatlarının bulunması şeklinde seçilmiştir. Deneysel doğrulama olarak kullanılması planlanan donanım ve benzetim yazılımı çalışma zamanı göz önüne alınarak 8 adet ölçme anteni bulunan bir benzetim probleminin uygun olduğu değerlendirilmiştir. Şekil Sim1'de bu kısımda kullanılan benzetim şematiği görülebilir. Şekil 28 de problem geometrisi gösterilmiştir.

Şekil 28 de gösterilen problem geometrisi silindirik koordinat eksenine göre tanımlanmıştır ve geometri 2 boyutlu elektromanyetik ters saçılım bir problem geometrisidir.

MUSIC yöntemi 2 boyutlu silindirik koordinatlarla uygun şekilde MATLAB platformunda kodlanmıştır. Yöntem giriş verisi olarak  $8 \times 8$  saçılım S parametreleri matrisini almakta ve çıktı olarak,  $R_0$  ve  $F_i$  düzleminde görüntü üretmektedir.

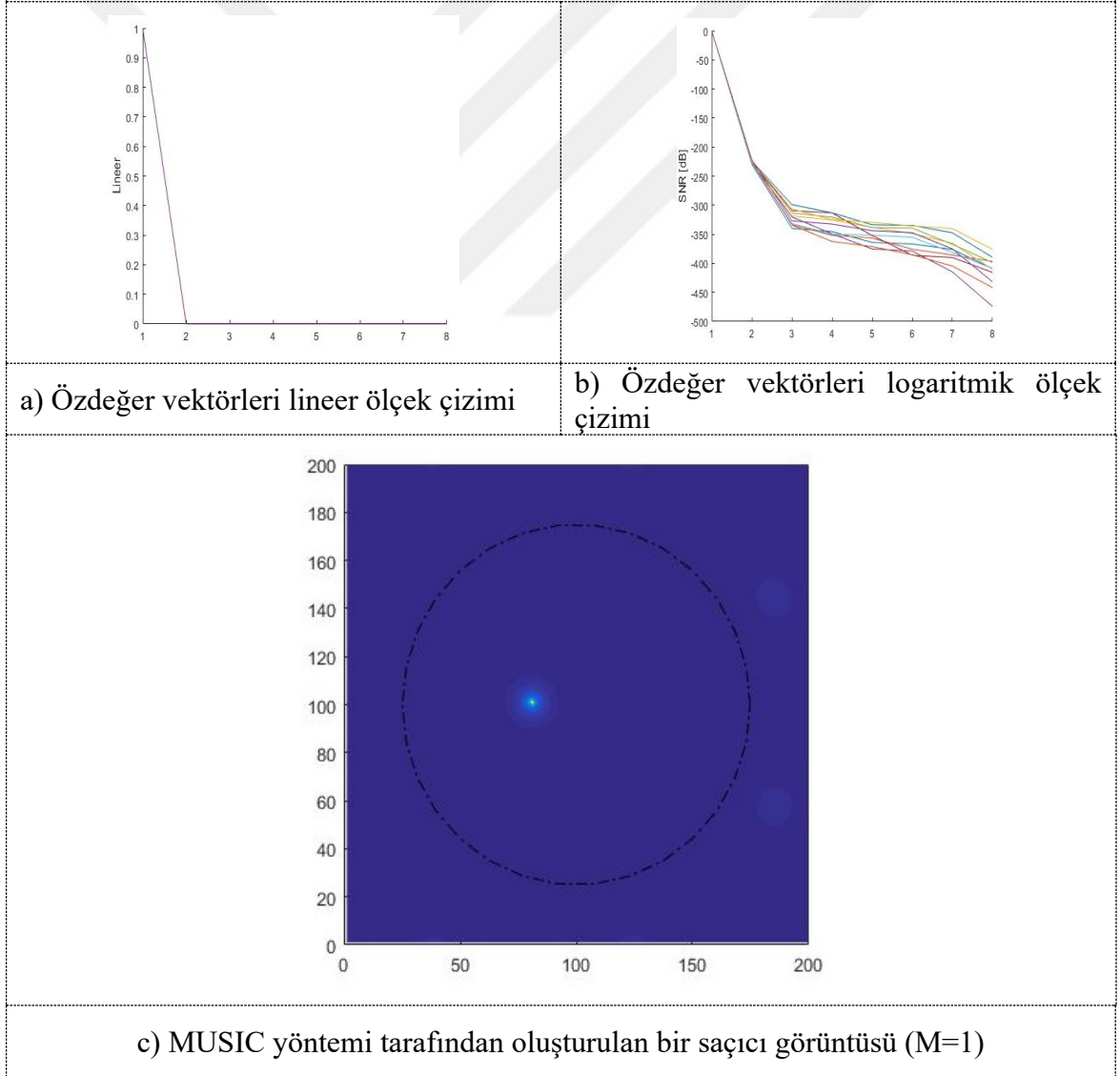
Benzetim platformunda, 8 adet ölçme ucu (port) tanımlanmıştır. İlk benzetim denemelerinde bu ölçme uçları, ilgili alanı düzlem dalga ile besleyecek ve saçınan alanı ölçecek şekilde ayarlanmıştır. Sonuçların tatminkâr çıktığı görüldükten sonra, benzetim çalışmalarının gerçeğe daha yakın olması açısından, 8 ölçme ucuma dipol anten yerleştirilmiş ve benzetim çalışmaları dipol antenler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dalga portlarının empedans uyumluluğunu sağlayabilmek için, kullanılan dipol antenlerin frekans karakteristiği ve giriş empedansı belirlenmesi amacı ile anten benzetimi ayrıca yapılmış ve en uygun çalışma frekansı ile ilgili frekanstaki anten empedansı bulunmuştur. Benzetim optimal anten frekansı çevresindeki bir bant genişliğinde çok frekanslı olarak yapılmıştır. Benzetim platformu benzetim sonucunda direkt olarak çok frekanslı  $8 \times 8$  saçınım S parametreleri matrisini oluşturmuştur. Bu matris ise MATLAB platformunda kodlanmış MUSIC yöntemine girdi olarak verilmiş ve çıktı olarak öz değerler ve tel saçıcıların yerini belirleyen görüntüler ortaya çıkmıştır. Görüntünün ortaya çıktığı düzlem şekil 29 de koyu mavi olarak işaretlenmiştir.



Şekil 29. Benzetim Modeli Geometrisinde yöntem tarafından görüntü oluşturulan yüzey

Bu kısımda, 1, 2 ve 3 adet tel saçıcı için Şekil 29 daki benzetim şematiği kullanılarak benzetim çalışmaları yapılmıştır. Benzetim platformunda aydınlatma ve ölçme antenleri olarak iletken teller ile modellenmiş olan dipol antenler kullanılarak, benzetim sonuçlarının gerçek hayattaki ölçümlerle daha fazla uyuşması hedeflenmiştir. Benzetim ortamının çıktı olarak verdiği çoklu frekanslı  $8 \times 8$  saçınım matrisi, MUSIC yönteminin kodlandığı MATLAB yazılımına giriş verisi olarak verilerek, yöntemin görüntü oluşturması sağlanmıştır.

Şekil 30, 31 ve 32 de bir, iki ve üç saçıcı cisimli benzetim sonuçlarından, MUSIC yöntemi ile oluşturulan görüntü ve özdeğer vektör çizimleri gösterilmiştir.

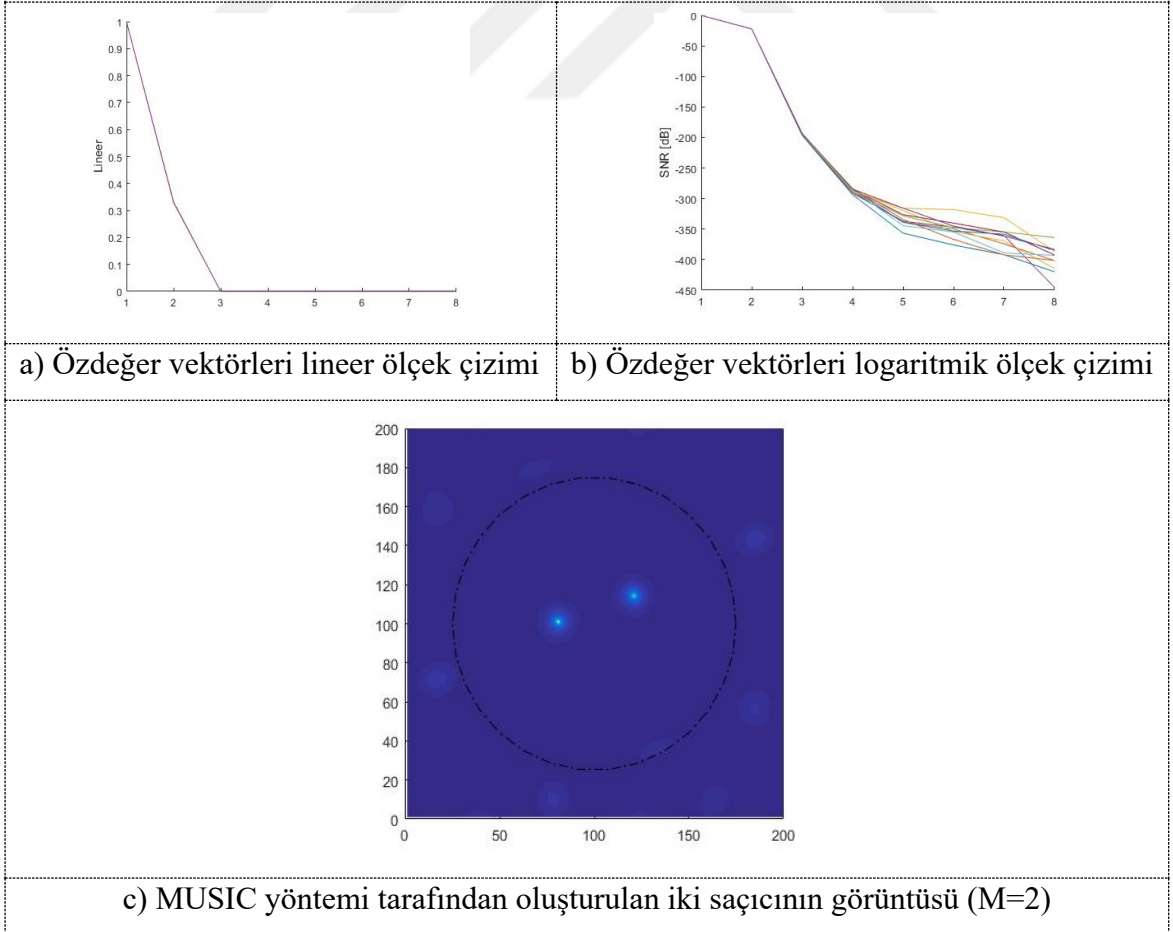


Şekil 30. İlgili alanında bir saçıcı bulunan benzetim Sonuçları



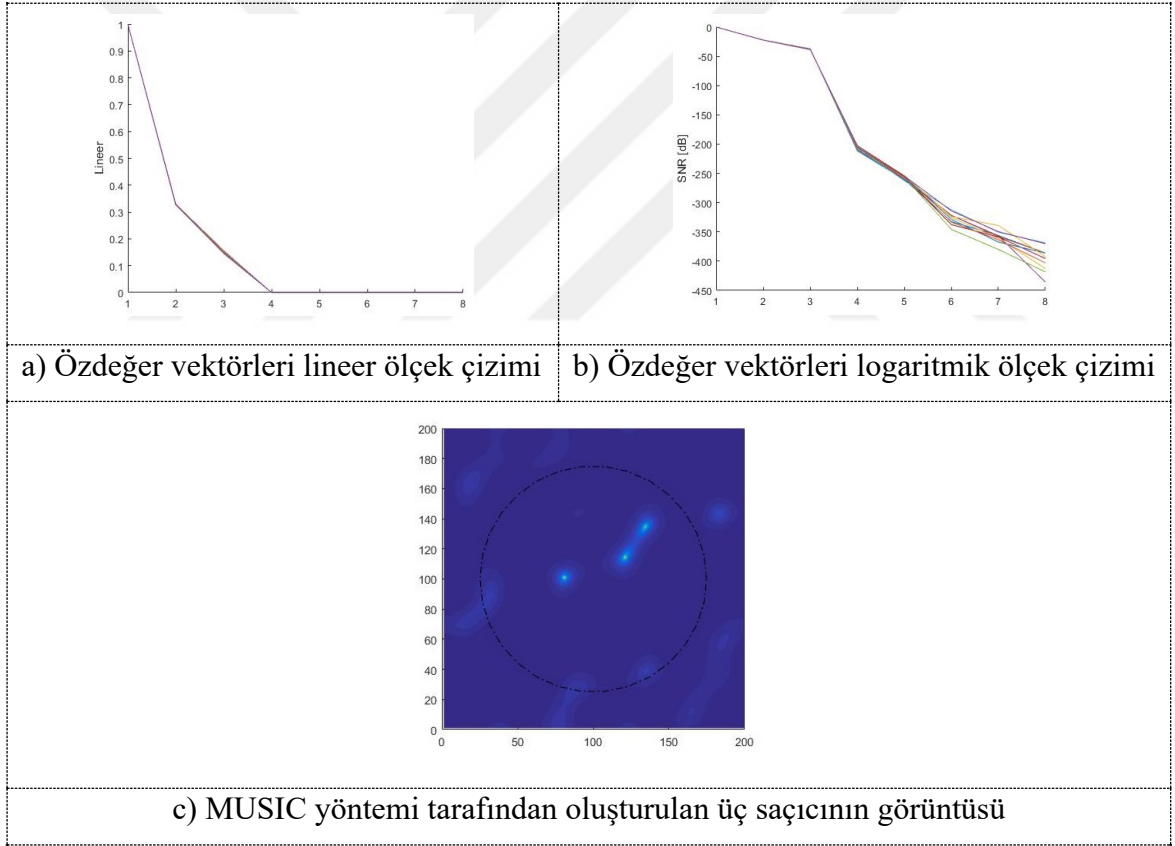
Şekil 30, Şekil 31 ve Şekil 32 de her durum için denklem (2.15) de tanımlanmış çoklu statik etki matrisi  $K$  nın öz değer vektör büyüklükleri Lineer ve logaritmik ölçeklerde çizilmiştir.  $K$  matrisi öz değer vektörleri büyüklükleri, her bir benzetim frekansı için ayrı renklerde çizilmiş olduğuna dikkat edilmelidir. Bu logaritmik ölçek çizimlerinde daha açık görülebilir.

MUSIC yöntemi çalıştırılırken kaç adet öz vektörün sinyal alt uzayını kaç âdetinin ise gürültü alt uzayını temsil ettiği yazılım parametresi öz-vektör çizimleri dikkate alınarak MUSIC yöntemi çalıştırılmıştır. Çalışmanın alt başlık 2.2.1 de MUSIC yöntemi teorik alt yapısının açıklandığı, denklem (2.11) de tanımlanmış olan test vektörünün gürültü alt uzayına olan projeksiyonu hesaplanırken denklem (2.10) da tanımlandığı gibi, büyükten küçüğe sıralanmış öz değer vektörleri içerisinde bir  $M$  sınır değeri tanımlanmakta ve test vektörü projeksiyonu bu  $M$  sınır değerinden daha yüksek öz vektörler kullanılarak hesaplanmaktadır.



Şekil 31. İlgi alanında iki saçıcı bulunan benzetim Sonuçları

Şekil 30 de açıkça görüldüğü gibi, tek saçıcı cisim olduğu için, öz vektör büyüklükleri çizimlerinde anlamlı büyüklüğe sahip öz vektörlerin sayısının bir olduğu görülmektedir. Şekil 30c de gösterilen görüntü çıkarılırken, MUSIC yöntemi alt başlık 2.2.1 de tanımlanmış olan  $M$  parametresi 1 şekilde ( $M=1$ ) çalıştırılmıştır.  $M$  parametresinin 1 olarak seçilmesi,  $K$  matrisinin öz değerlerinden sadece 1 tanesinin sinyal uzayını kapsadığı, geri kalan 7 adedinin ise gürültü uzayını kapsadığı anlamına gelmektedir. Alt başlık 2.2. de MUSIC yönteminin teorisinde verildiği gibi, Şekil 31c de gösterilen görüntü, sadece gürültü uzayını kapsayan öz değer vektörleri kullanılarak çıkarılmıştır. MUSIC yöntemi tarafından Şekil 30c deki görüntü, gürültü uzayını kapsayan, en küçük 7 öz değer vektörü kullanılarak oluşturulmuştur.



Şekil 32. İlgili alanında üç saçıcı bulunan benzetim Sonuçları

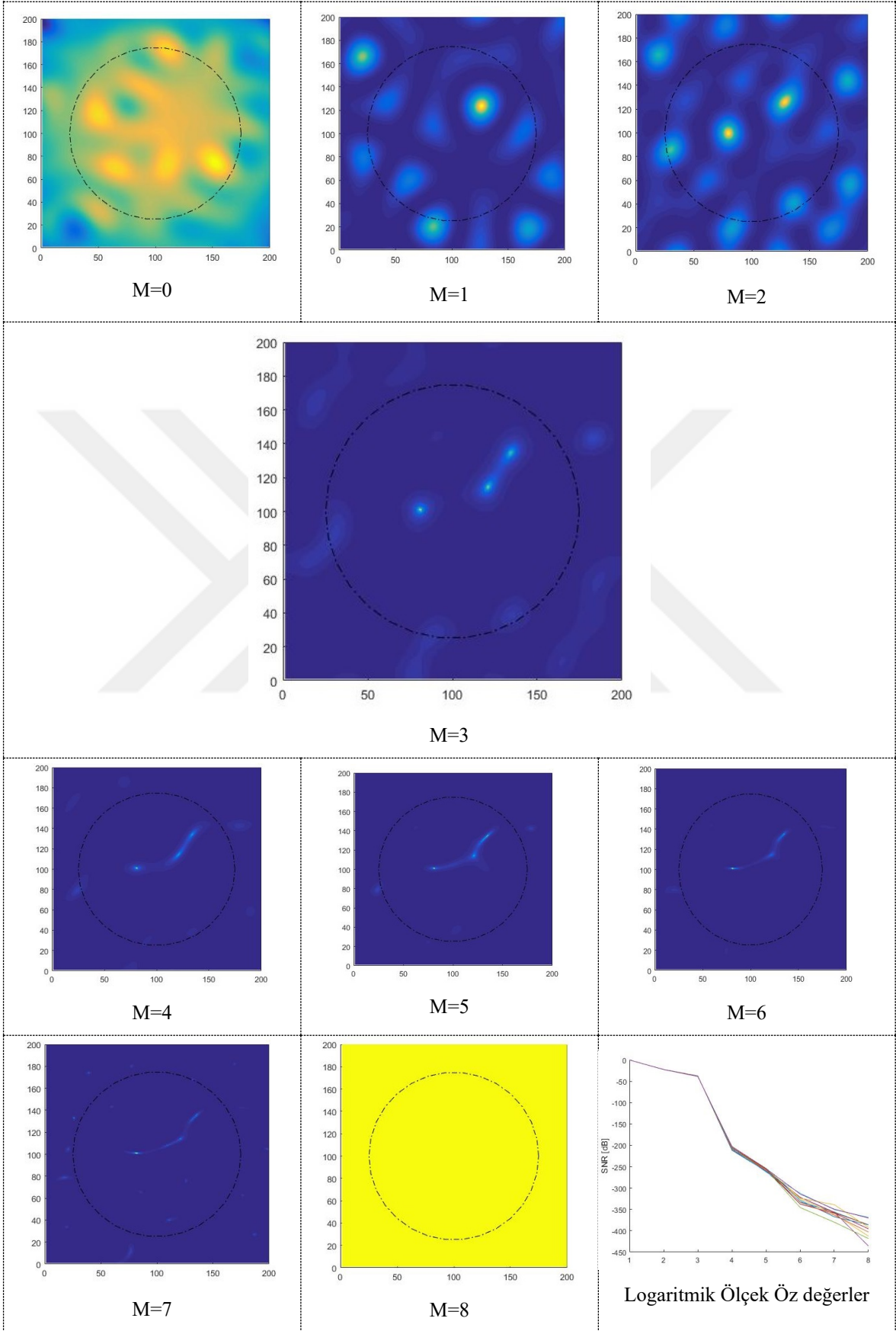
Şekil 31 de iki saçıcı cismin bulunduğu benzetim sonuçlarında anlamlı özdeğer sayısının 2 olduğu görülmektedir. Şekil 31c de  $M$  parametresi iki seçilerek çıkarılmış görüntü gösterilmiştir.

Benzer olarak Şekil 32 de 3 saçıcılı cisim problemi sonuçları verilmiştir.

M sınır değerinin MUSIC tarafından oluşturulan görüntüye etkisini göstermek amacı için, 3 saılı cismin bulunduğu benzetim sonuçları, M parametresi 0 dan başlayarak 8 e kadar olan parametre ayarları ile MUSIC yönteminin oluşturduğu görüntüler ile Şekil 33 de gösterilmiştir.

M sınır değerinin sinyal gürültü oranına göre seçilmesi ile ilgili bir çalışma bulunmaktadır [29]. Bu doktora çalışmasında ise bu seçim her benzetim ve deneysel ölçüm için en iyi görüntüyü alabilecek Şekilde z değer çizimlerine bakılarak karar verilmiştir. Özellikle deneysel doğrulamalarda, M sınır değeri seçilirken oluşan görüntü kalitesine de dikkat edilmiştir. İlgili kısımlarda, M sınır değer seçimin etkisini göstermek amacı ile çalışmanın ilgili kısımlarında Şekil 33 de olduğu gibi tüm olasılıklar için görüntü çıkarılarak oluşan görüntüler çalışma içerisinde eklenmiştir.

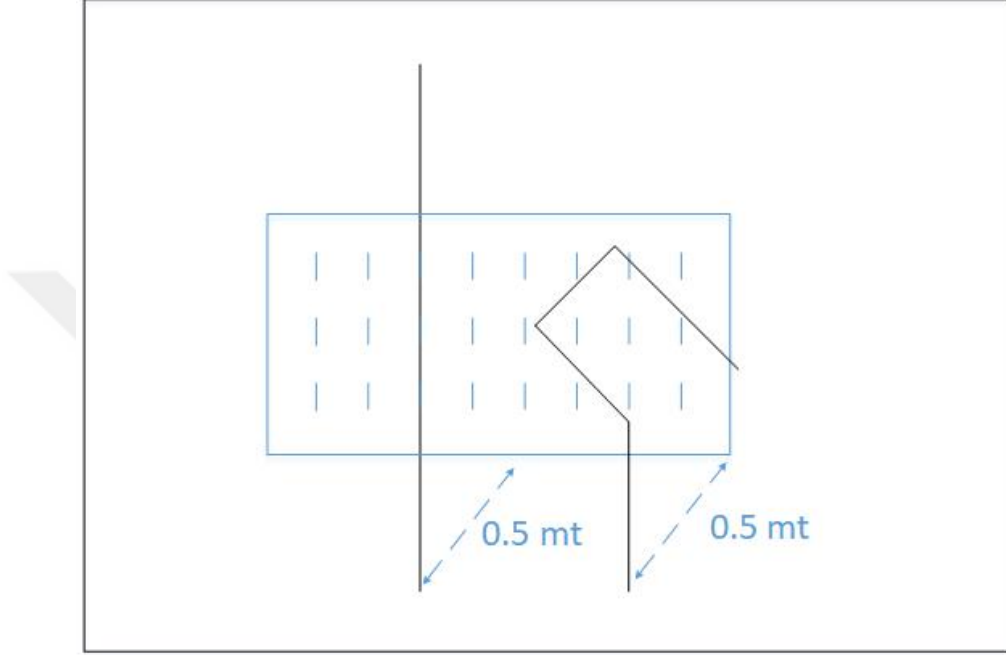
MUSIC Yöntemi ile İki Boyutlu Silindirik Koordinatlarda, Tel Saçıcıların Pozisyonunun Bulunması Benzetimi alışmaları sonuçları, yöntemin teorik öngörüler doğrultusunda, saçıcı cisimleri pozisyonlarını başarılı bir Şekilde belirleyebildiğini göstermiştir.



Şekil 33. M sınır değeri seçiminin MUSIC yönteminin çıkardığı görüntüye etkisi

### 2.3.2. MUSIC Yöntemi ile Üç Boyutlu Kartezyen Koordinatlarda Düz Tel Saçıcıların Şeklinin Bulunması Benzetim Çalışmaları

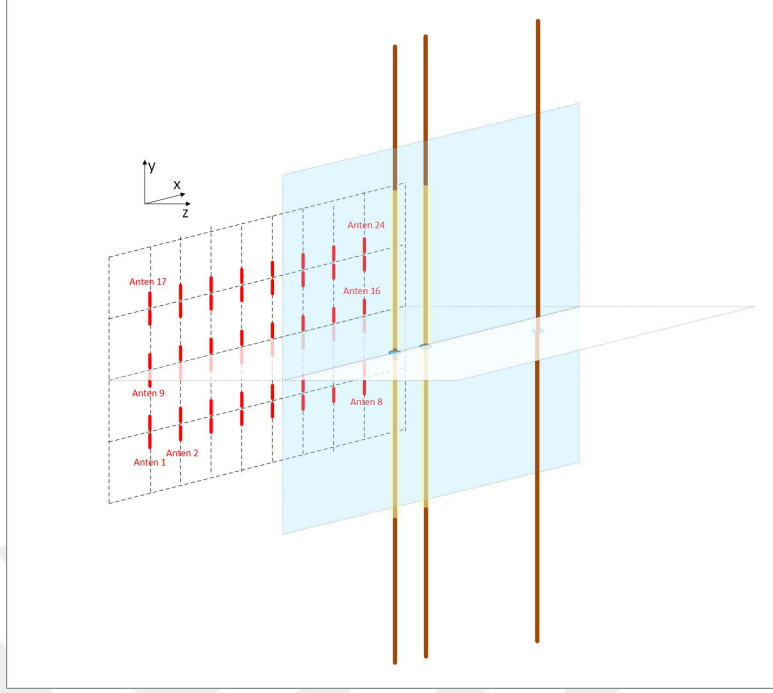
#### 2.3.2.1. MUSIC Yöntemi ile Tel Saçıcıların Şeklini Görüntüleyebilme Benzetim Çalışmaları



Şekil 34. Kartezyen Koordinat Eksenleri ile örtüşen Benzetim Problem geometrisi

Şekil 34 de Bu kısımda kullanılacak olan, 3 boyutlu Kartezyen koordinat eksenleri ile uyumlu geometri gösterilmiştir. Şekil 34 de görüldüğü gibi, tel saçıcı şekli bulma problemi, bir düzlem üzerinde yerleştirilmiş antenler kullanarak anten düzleminin ön tarafında bulunan düz tel saçıcıların şeklinin MUSIC yöntemi ile bulunmasının görüntülenmesini amaçlamaktadır.

Şekil 34 de gösterilen problem geometrisi Kartezyen koordinat eksenleri ile örtüşmektedir ve problem 3 boyutlu çözüm gerektirmektedir. Deneysel olarak doğrulanabilmesi ve bu tez çalışması kapsamında erişilebilecek ölçme cihazı değerlendirilerek, 24 adet ölçme anteni kullanan bir deney düzeneği öngörülmüştür. Bu sebeple benzetim yapılacak problem geometrisi 3 satır ve 8 sütuna yerleştirilmiş bir anten dizisi önüne yerleştirilmiş tel saçıcılar şeklinde planlanmıştır.



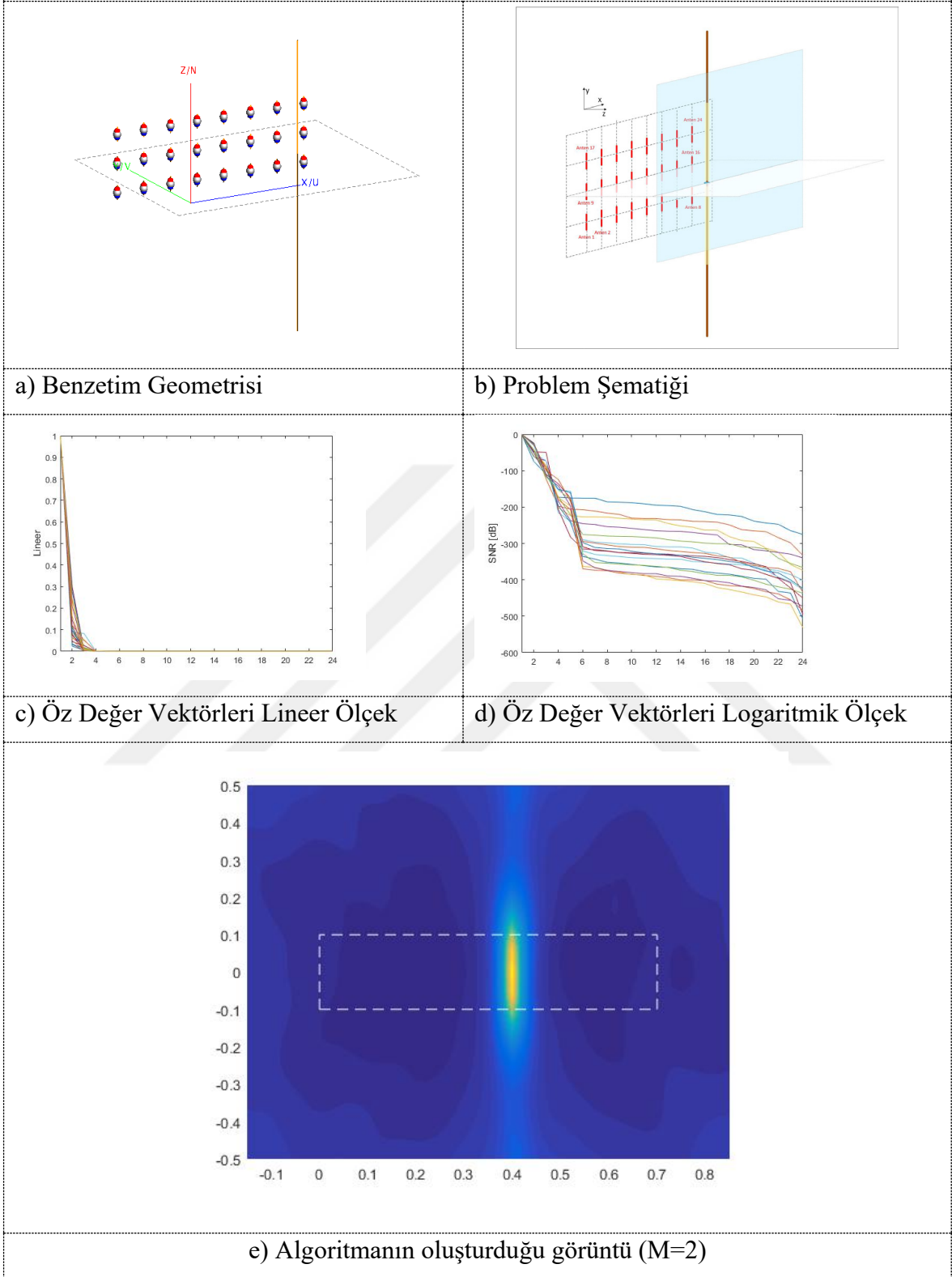
Şekil 35. Benzetim Geometrisi Şematığı

Benzetim geometrisi şekil 35 de gösterilmiştir.

Benzetim ortamında anten olarak (3.3.1) bölümünde kullanılan dipol antenler kullanılmıştır. Benzetim ortamında kullanılan dipol antenlerin empedansı ve frekans karakteristiği bulunmuş ve benzetim bu empedans ve frekans karakteristiği ile uyumlu parametreler kullanılarak yapılmıştır. Benzetim ortamı kullanılan antenlerin frekans/empedans karakteristiğinin en iyi olduğu frekans değeri çevresinde bir frekans bandında olmak üzere optimal frekans çevresinde bir bantta 1 den fazla frekansta çalıştırılmış ve benzetim platformu her bir frekans için 24x24 saçının parametreleri oluşturmuştur.

MUSIC yöntemi 3 boyutlu Kartezyen koordinatlarında olacak şekilde MATLAB platformunda kodlanmıştır. Yöntem giriş verisi olarak çoklu frekanslı 24x24 açınım parametreleri matrisini verilmiş ve çıktı olarak, seçilmiş z koordinat kesiti için için x ve y düzleminde görüntü üretmiştir.

İlk benzetim problemi olarak anten dizisi önüne yerleştirilmiş tek düz bir tel saçıcı için benzetim yapılmıştır.



Şekil 36. Düz Tel Saçıcı

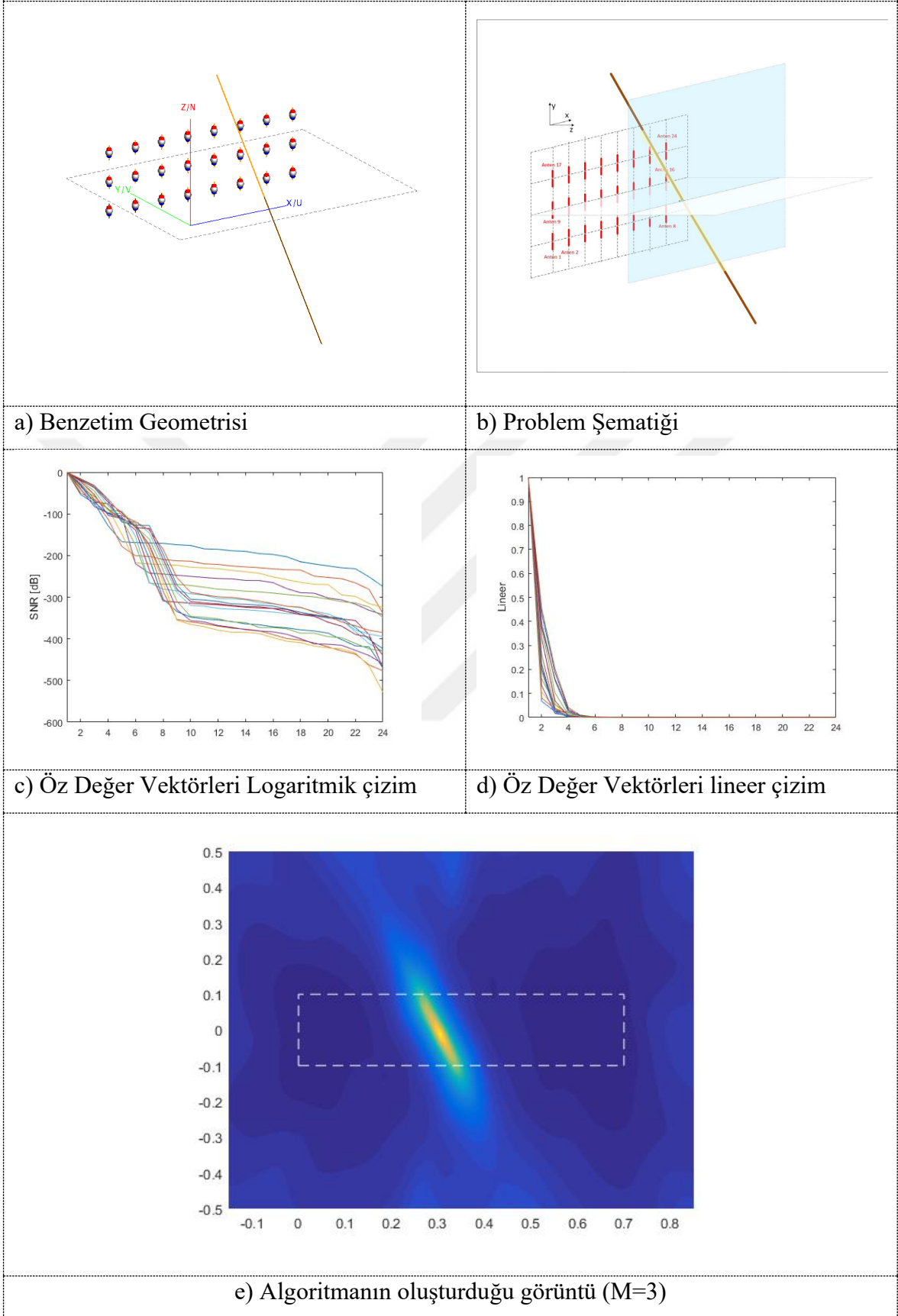
Şekil 36a da problem geometrisinin benzetim ekranı görüntüsü 36b de ise problem şematığı görülmektedir. MUSIC algoritması 3 boyutlu Kartezyen koordinat ekseninde

seçilen z eksen değeri kesitinde için x -y düzleminde görüntü üretecek şekilde kodlanmıştır. MUSIC yöntemi ile görüntü oluşturulan kesit Şekil 36b de mavi yüzey olarak gösterilmiştir. Şekil 36c her bir frekans için farklı renkte gösterilmiş özdeğer vektörleri normalize edilmiş lineer ölçekte, Şekil 36d de logaritmik ölçekte gösterilmiştir. Şekil 36d deki çizim özdeğer vektörlerinin işaret gürültü (SNR) oranı olarak düşünülebilir. Benzetim ortamına ilave bir gürültü eklenmemiştir. Şekil 36e deki çıktı MUSIC yöntemi denklem (2-10) tanımlanmış olan **M** parametresi 2 seçilerek çalıştırıldığında ortaya çıkan görüntüdür. Kullanılacak **M** parametresi, özdeğer vektörlerin büyüklükleri ve karmaşık problemler için yöntemin oluşturduğu görüntünün kalitesine bakılarak seçilmiştir. **M** parametresinin 2 olarak seçilmesi, her bir frekans değeri için 24x24 boyutlarında olan çoklu statik etki matrisi **K** nın 24 özdeğer vektörlerinin en büyük 2 tanesinin sinyal uzayını kalan 22 tanesinin ise gürültü uzayını temsil ettiği şeklinde açıklanabilir. MUSIC Şekil 36e deki görüntüyü, gürültü uzayını kapsayan en küçük 22 özdeğer vektörünü kullanarak çıkartmıştır. Şekil 36e deki beyaz kesikli çizgilerle işaretlenmiş alan ölçme antenlerinin problem geometrisine bulunduğu yeri göstermektedir.

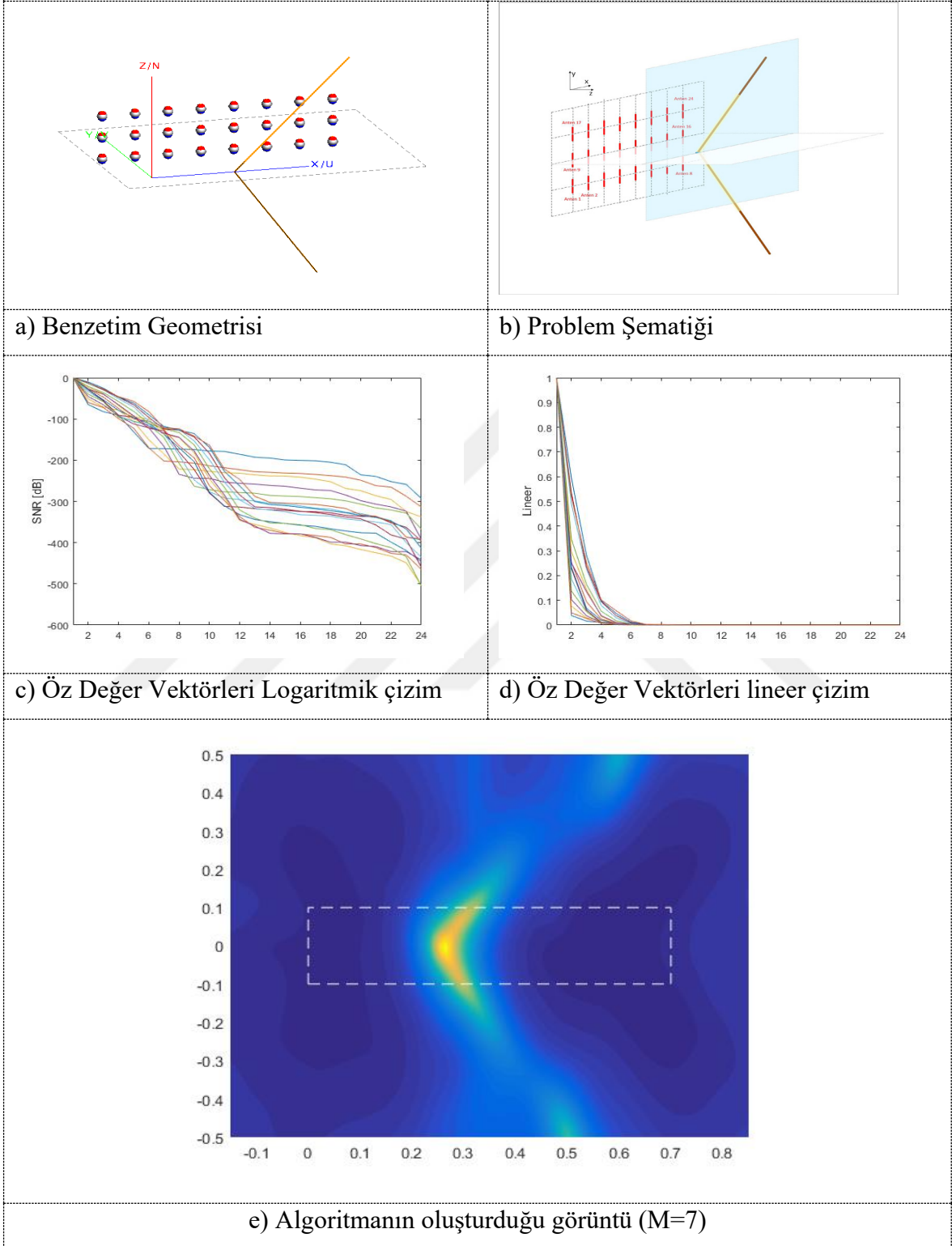
Bir sonraki benzetim problemi olarak, anten dizisi önünde eğik yerleştirilmiş bir düz tel saçıcı kullanılmıştır. Şekil 37 de benzetim geometrisi ve sonuçları gösterilmiştir. Şekil 37 de özdeğer vektörleri büyüklüğü hem logaritmik hem de lineer olarak çizilmiştir. Şekil 37e deki görüntü MUSIC yöntemi **M** parametresi 3 olarak seçilerek çalıştırıldığında ortaya çıkan görüntüdür. Bu karar ise Şekil 7d de gösterilmiş olan özdeğer vektörlerinin lineer çizimine bakarak verilmiştir. Şekil 37 sonuçları incelendiğinde, beklendiği gibi, problem geometrisinde tel saçıcının açıl yerleştirildiği için, noktasal bir saçıcı gibi davranmadığını ve bu sebeple, sinyal uzayını temsil eden öz değer vektör sayılarının arttığı gözlenmektedir. Bu etki logaritmik ölçekte daha belirgin olarak görülmektedir.

Bir sonraki benzetim problemi olarak anten dizisi önüne yerleştirilmiş V şeklinde bükülmüş bir tel saçıcı seçilmiştir. Şekil 38 de sonuçlar verilmiştir.





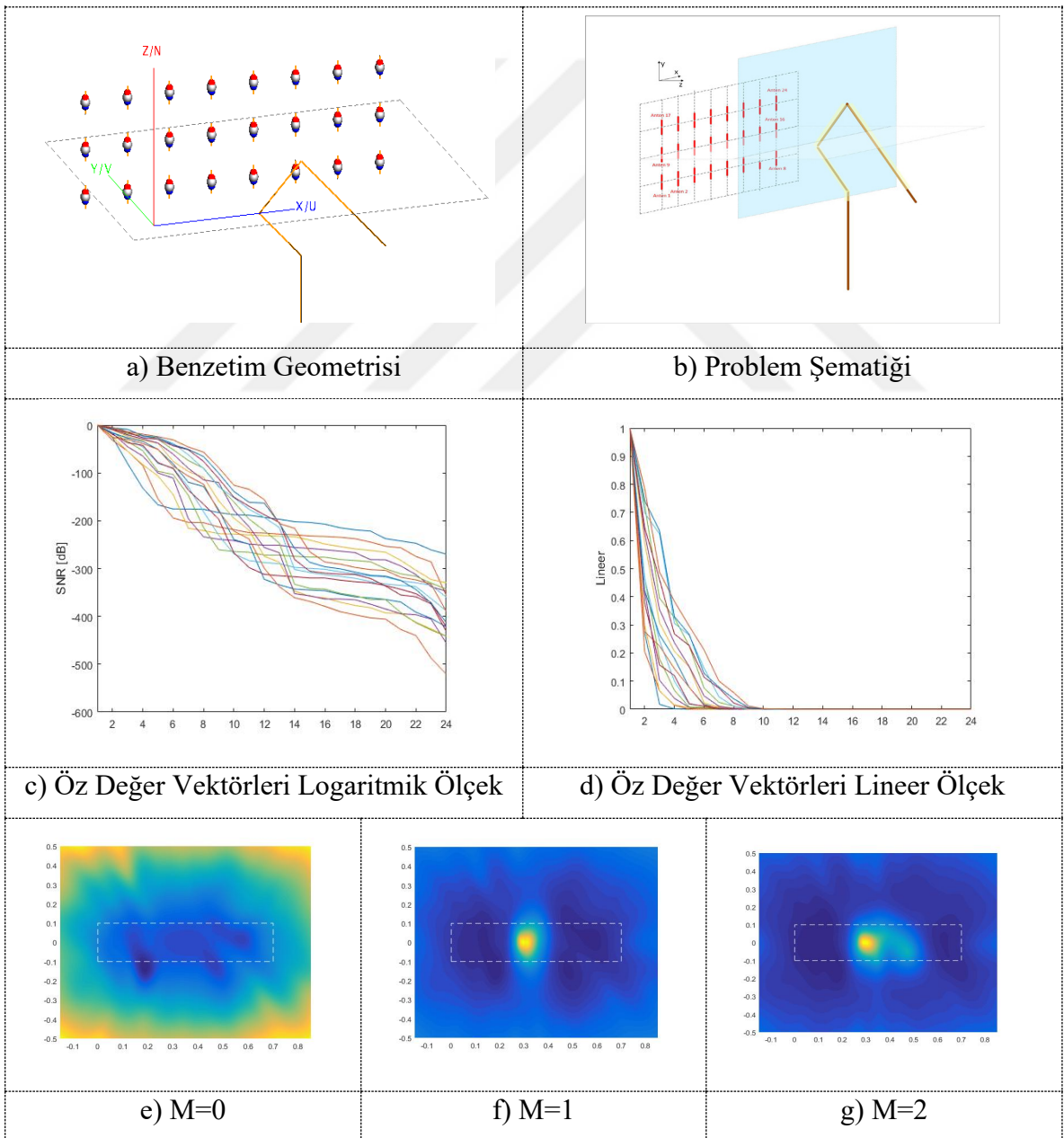
Şekil 37. Eğik yerleştirilmiş Düz Tel Saçıcı



Şekil 38. V şekli verilmiş tel saçıcı geometrisi

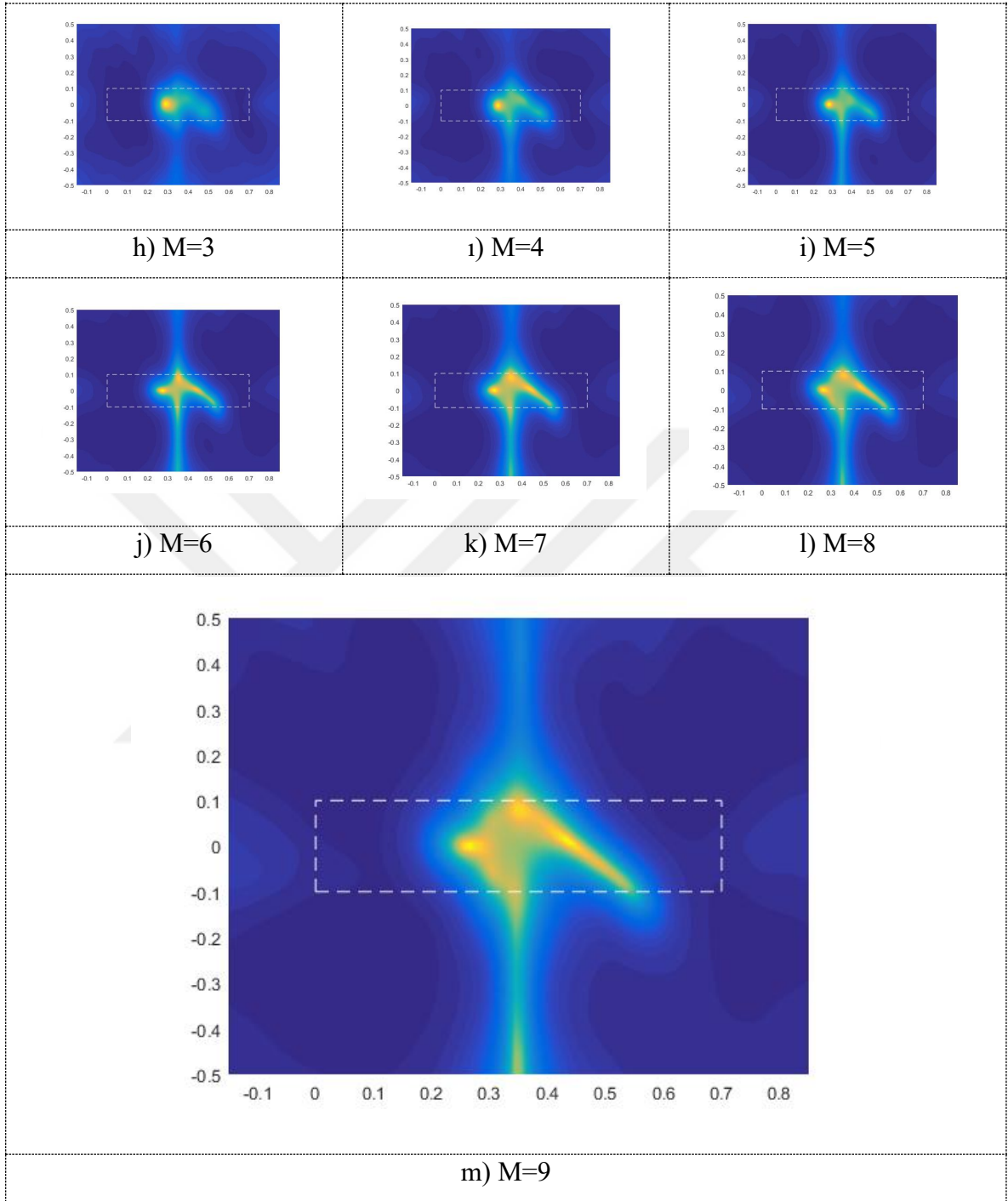
Şekil 38e deki görüntü MUSIC yöntemi en  $M$  parametresi 7 olarak çalıştırıldığında çıkan görüntüdür. Bu karar ise Şekil Sim 7 d de lineer büyüklükte çizilmiş olan özdeğer vektör çizimine ve oluşan görüntü kalitesine bakarak verilmiştir.

Bir sonraki Benzetim çalışması olarak biraz daha karmaşık şekilli bir saçıcı olarak çengel şeklinde ki bir saçıcı incelenmiştir. Bu kısımda ayrıca, MUSIC algoritması çalıştırılırken en önemli parametrelerden birisi olan, en yüksek kaç tane öz vektörün sinyal uzayını temsil ettiğini belirleyen  $M$  parametresi değiştirilerek, MUSIC yönteminin çıktısının görsel olarak nasıl değiştiği gösterilmiştir. Şekil 39 da sonuçlar görülebilir.

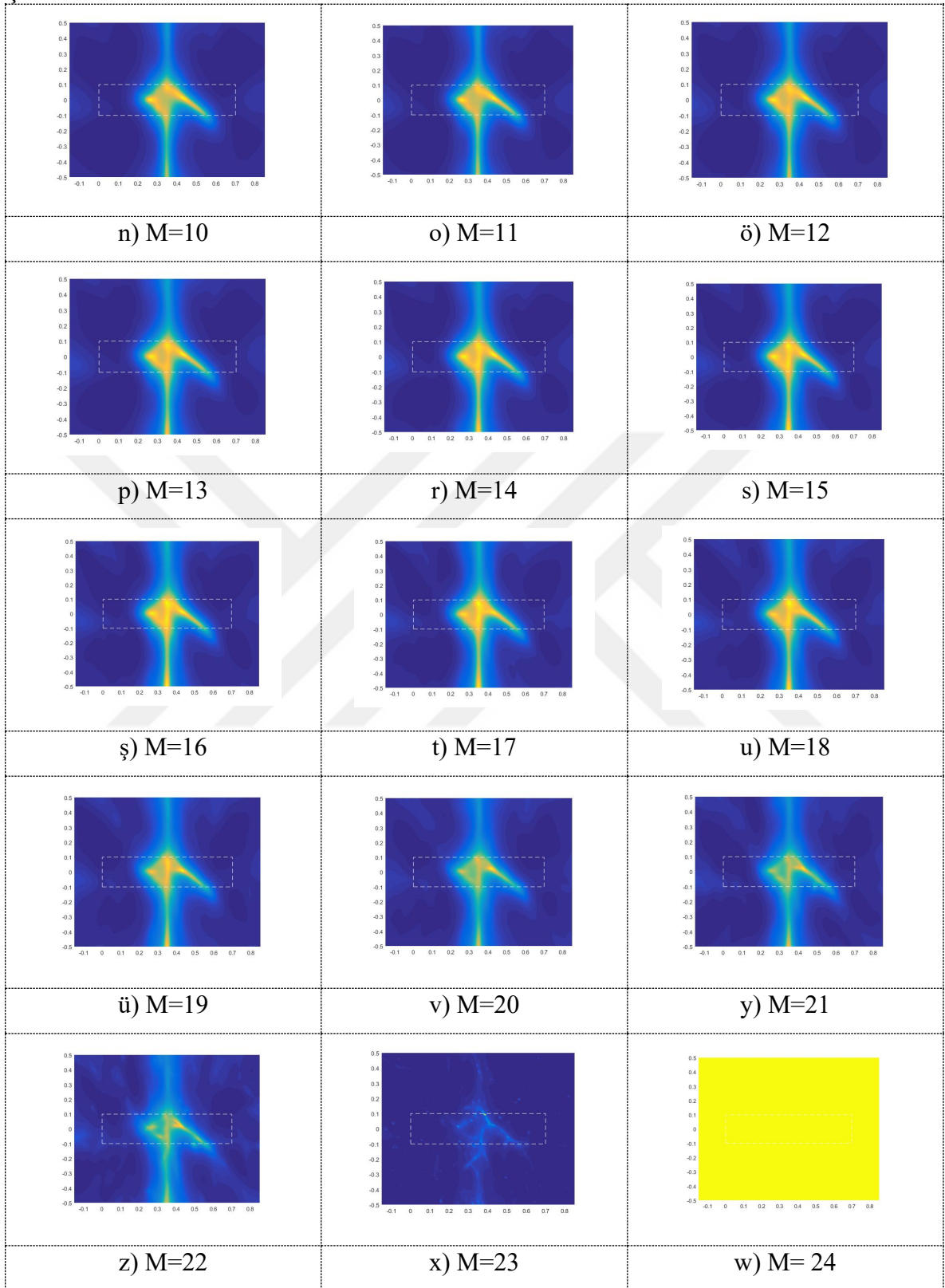


Şekil 39. Çengel Şeklindeki saçıcı ve  $M$  parametresinin görüntü üzerine etkisi

Şekil 39'un devamı



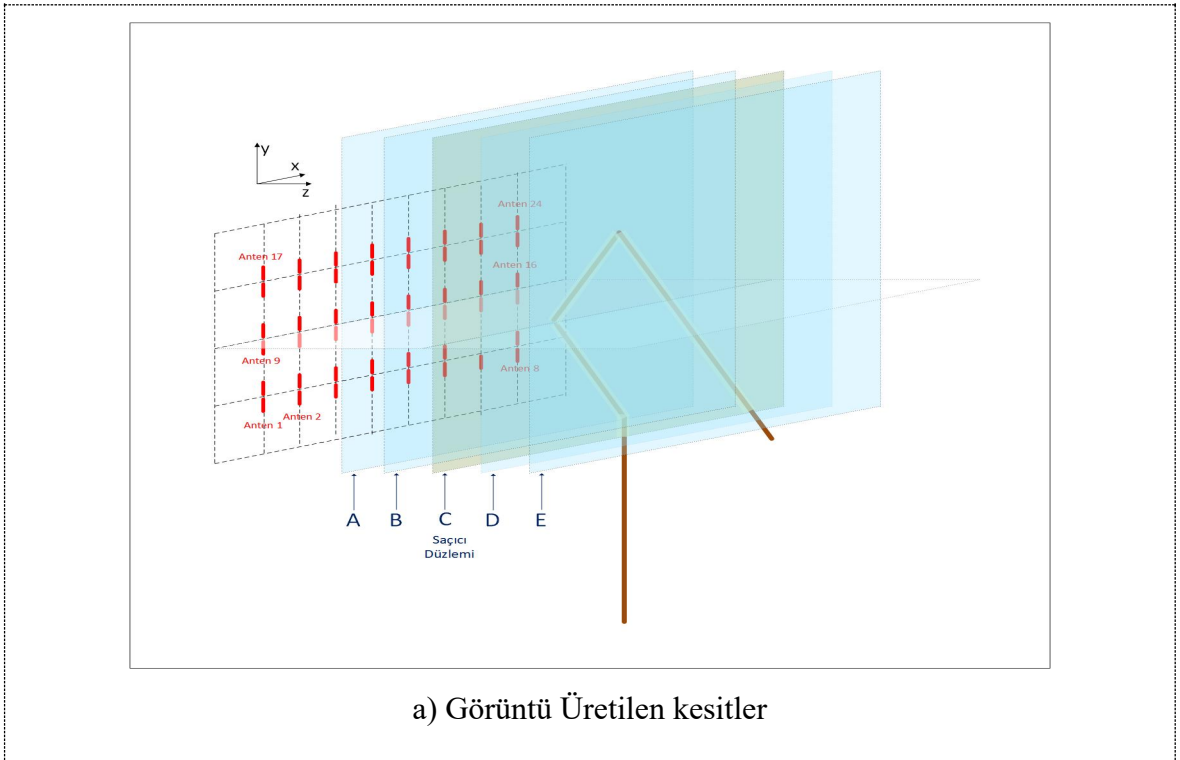
Şekil 39'un devamı



Şekil 39a ve 39b de Benzetim geometrisi ve problem şematığı gösterilmiştir. Şekil 39 c ve 39d de ise öz vektörlerin logaritmik ve lineer çizimleri yerleştirilmiştir. Şekil 39 in geri kalan çıktıları ise sinyal uzayını temsil eden öz vektör sayısı  $N=0$  dan  $N=24$  e kadar değiştirilerek MUSIC yöntemi ile görüntü oluşturulmuş ve çıktıları ilgili alt çizimlerde gösterilmiştir. Öz vektör büyüklüklerinin lineer çizimine ve görüntü kalitesine bakılarak karar verilen  $M=9$  için çıkan görüntü Şekil 39m de daha büyük olarak gösterilmiştir.

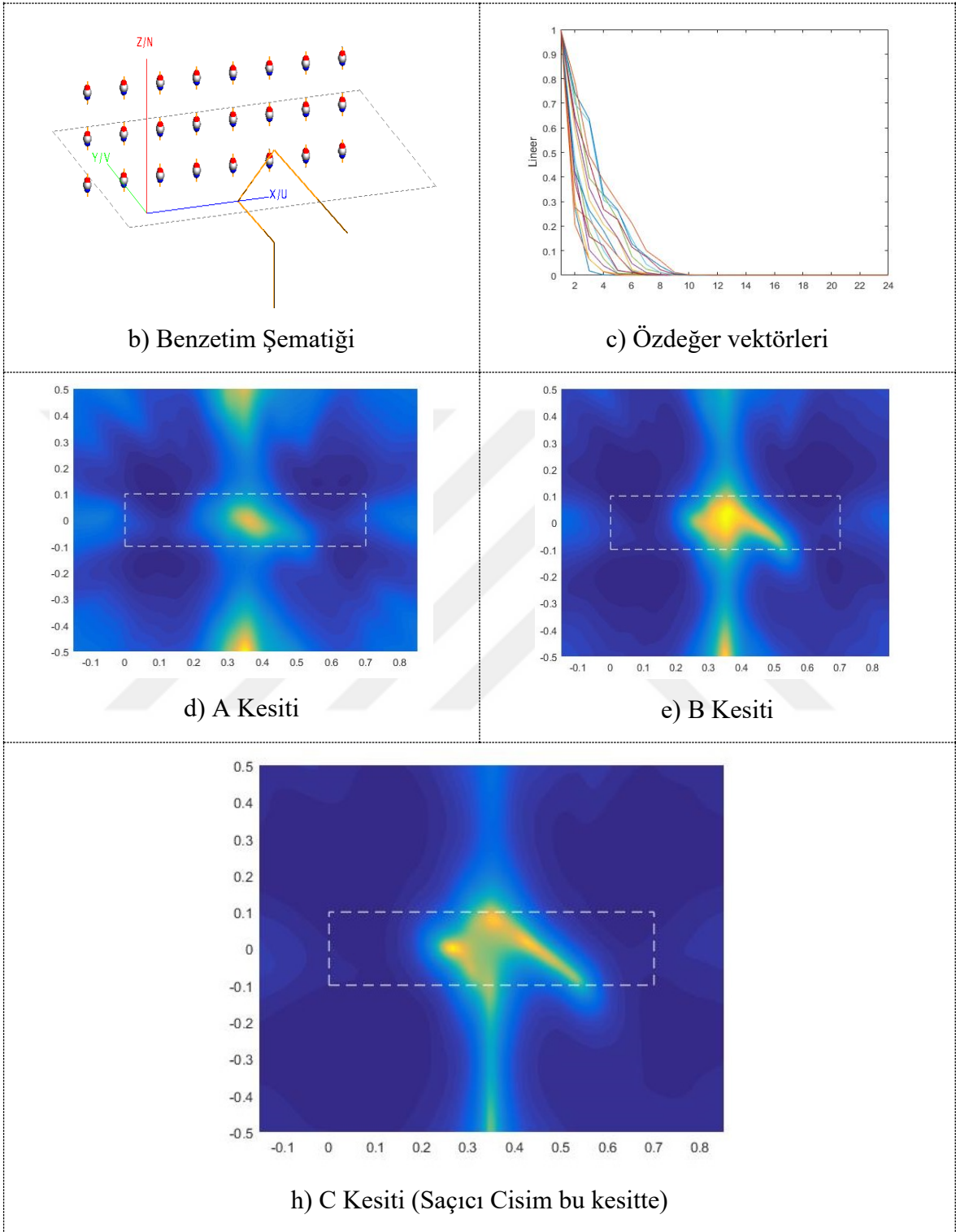
### 2.3.2.2. MUSIC Yöntemi ile Tel Saçıcıların Şeklini Anten platformuna Çeşitli Uzaklıktaki Kesit Yüzeylerindeki Görüntüleyebilme ve Şekil Belirlenmesi Benzetim Çalışması

Bu benzetim çalışmasında anten dizisi önünde çengel şeklinde bir tel saçıcı modellenmiştir. Benzetim platformu bu problemi çözerek sonucunda 24 adet antenden ölçülen  $24 \times 24$  frekans sayısı boyutlarında bir saçınım matrisini üretmiştir. Benzetim ortamından çıkan bu matris MUSIC yöntemine girdi olarak verilmiş ve MUSIC yöntemi Şekil 40a de gösterilmiş problem şematığı şeklinde görülen A,B,C,D,E kesitlerinde görüntü çıkarılmıştır. Saçıcı cisim C kesitinde bulunmaktadır.

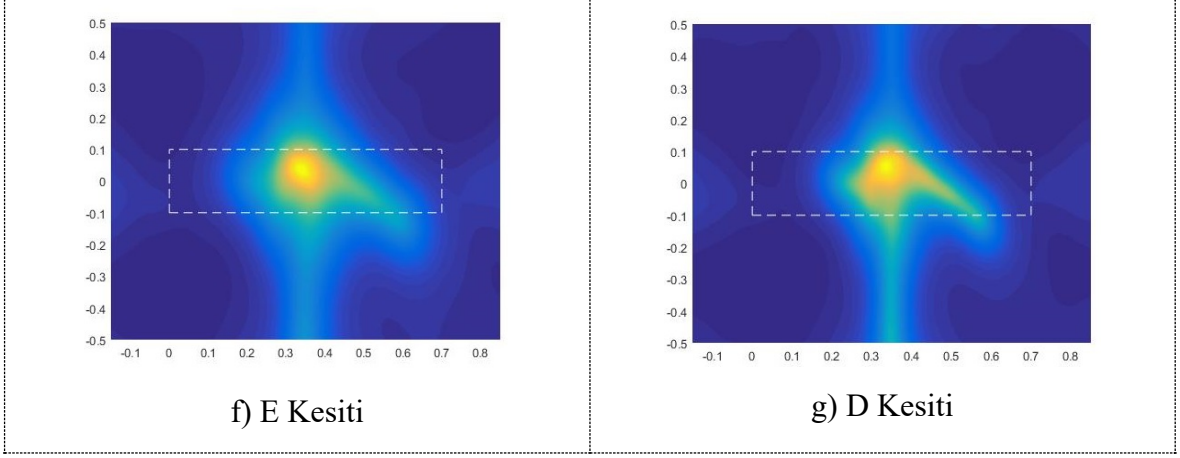


Şekil 40. Çengel Şeklinde Saçıcının 3 boyutlu Kesitlerdeki oluşturulan görüntüleri

Şekil 40'ın devamı



Şekil 40'ın devamı

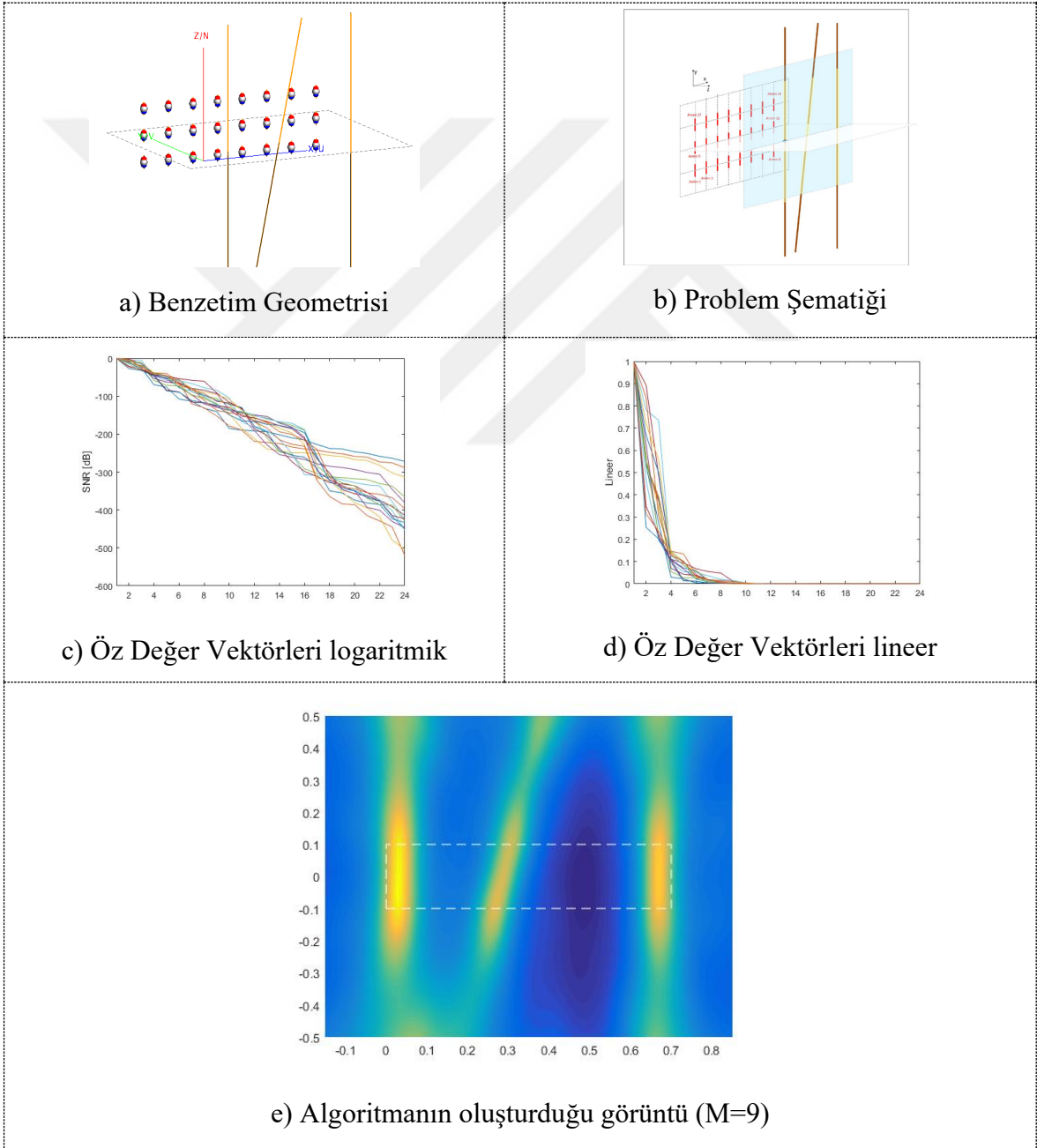


Şekil 40 deki görüntüler, MUSIC yöntemi M parametresi 7 seçilerek çalıştırılan görüntülerdir. MUSIC yönteminin oluşturduğu görüntü sonuçları, cismin bulunduğu kesit dışındaki görüntülerin bulanık olduğunu, en net görüntünün Şekil 40h da, cismin bulunduğu kesitte oluştuğunu göstermektedir.



### 2.3.2.3. MUSIC Yöntemi ile Birden Fazla Tel Saçıcı Cismi 3 Boyutlu Ayırt Edebilme, Görüntüleyebilme ve Şekillerinin Belirlenmesi Benzetim Çalışmaları

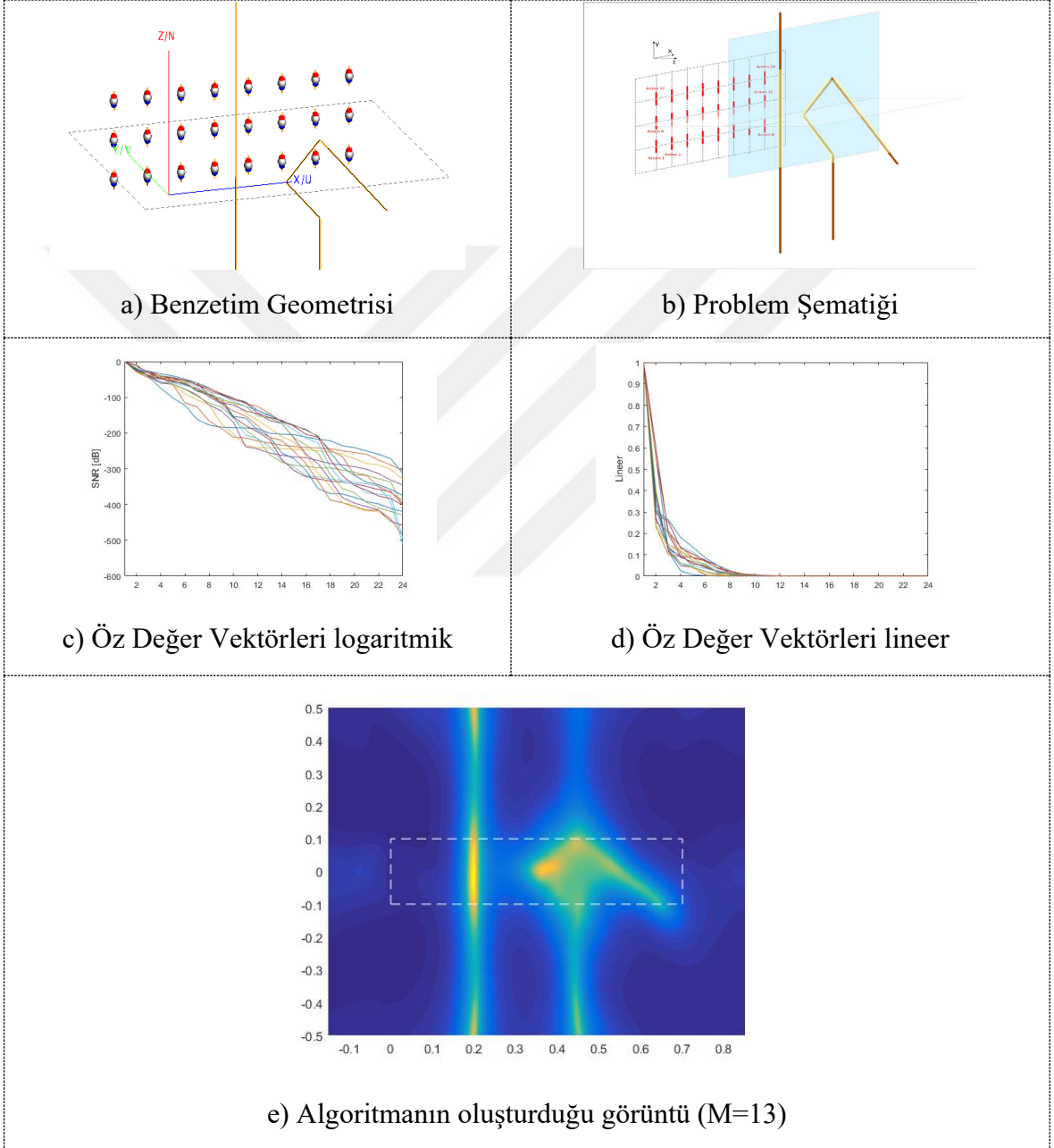
Bu kısımda MUSIC yönteminin birden fazla tel saçıcının şeklinin görüntülenmesine yönelik benzetim çalışmalarının sonuçları çalışılmıştır. İlk benzetim çalışması anten dizisi önüne yerleştirilmiş üç düz tel saçıcı üzerine yapılmıştır. Bu üç saçıcının ikisi dik olarak, sonuncusu ise eğik olarak yerleştirilmiştir.



Şekil 41. Üç Düz Tel Saçıcı

Şekil 41 de MUSIC yöntemi sonucu görülmektedir. Yöntem M parametresi 9 seçilerek çalıştırılmıştır.

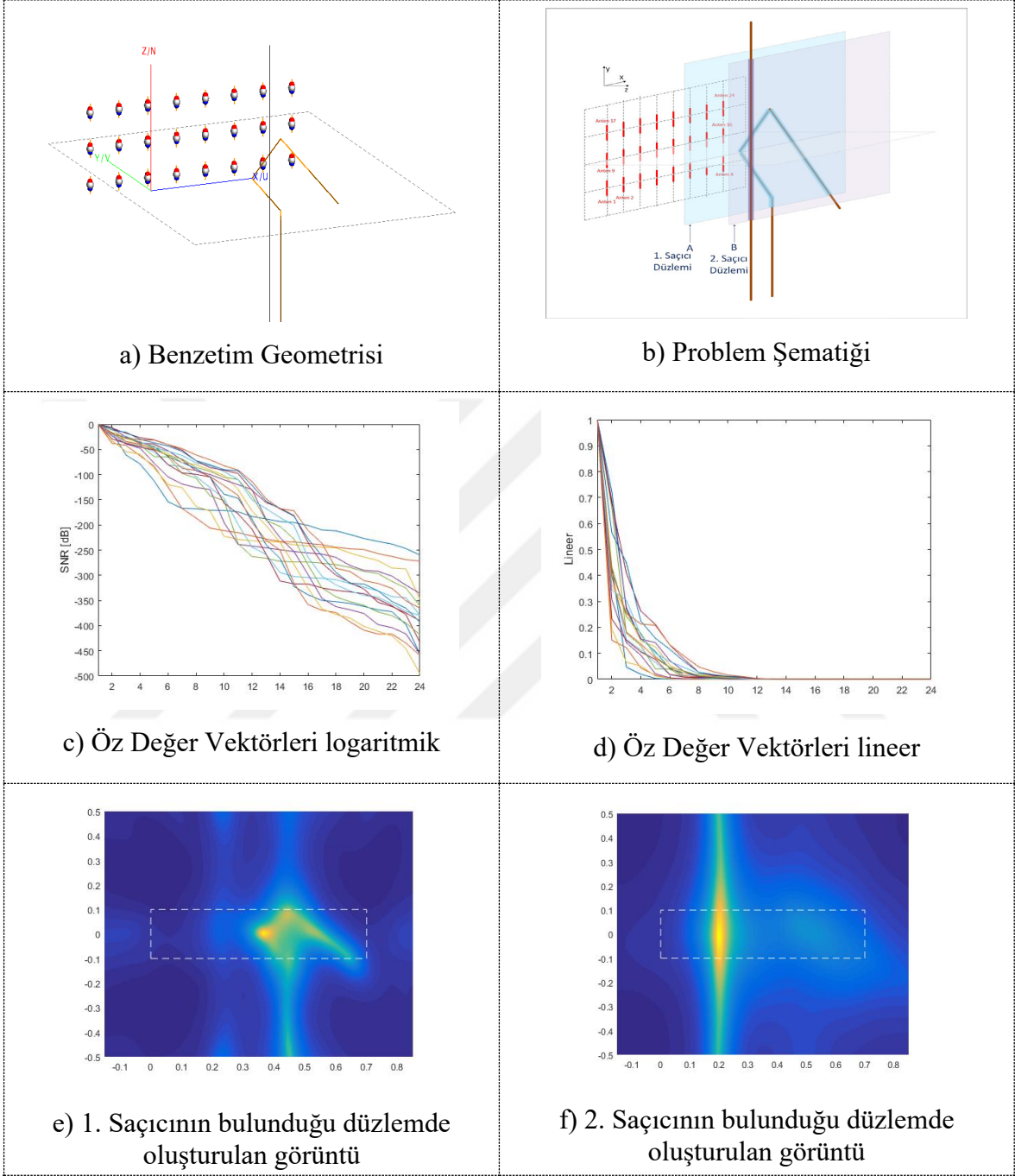
Bir sonraki benzetim olarak iki farklı şekilli tel saçıcının anten dizisinin önünde durduğu durum seçilmiştir.



Şekil 42. Farklı şekilli iki Tel Saçıcı

Şekil 42’de MUSIC yönteminin M=13 seçilerek çalıştırıldığı zaman çıkardığı sonuçlar gösterilmiştir.

Bir sonraki benzetim geometrisi olarak, farklı iki şekildeki iki saçıcı cismin anten dizisinden farklı uzaklıklarda konumlandırılması şeklinde planlanmıştır.



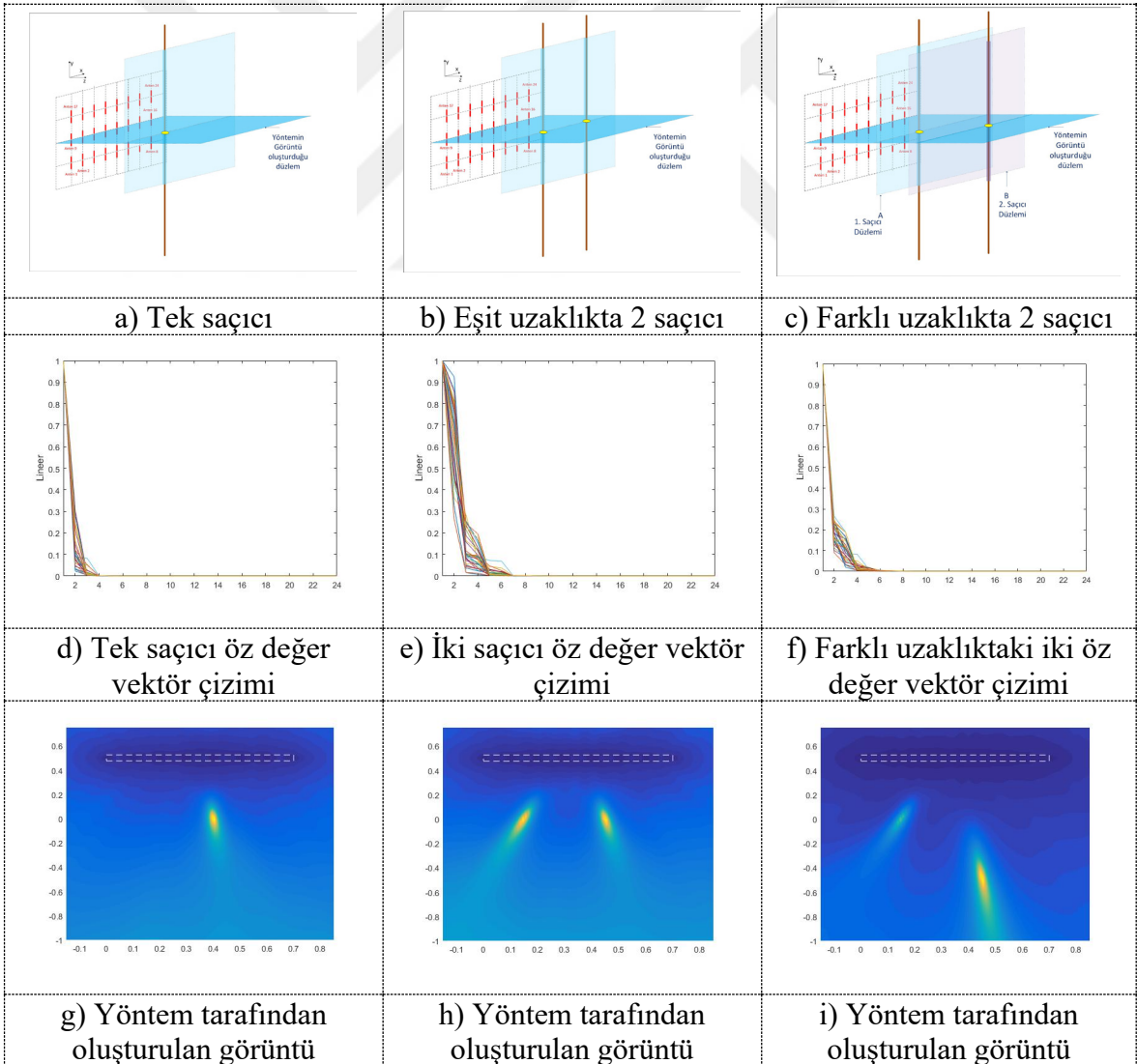
Şekil 43. Anten platformundan farklı uzaklıkta yerleştirilmiş, farklı şekilli iki saçıcı

Şekil 43 de MUSIC yönteminin  $M=11$  seçilerek çalıştırıldığı çıktılar görülebilir. Şekil 43e ve 43f de her iki saçıcının bulunduğu düzlemde çıkarılmış görüntüler gösterilmiştir. Bu benzetim çalışması, yöntemin birden fazla saçıcının 3 boyutlu ayırt edicilik performansını

göstermektedir. Şekil 43 de gösterilen sonuçlar, MUSIC yönteminin 3 boyutlu olarak iki cismi görüntüleyip ayırt edebildiğini göstermektedir.

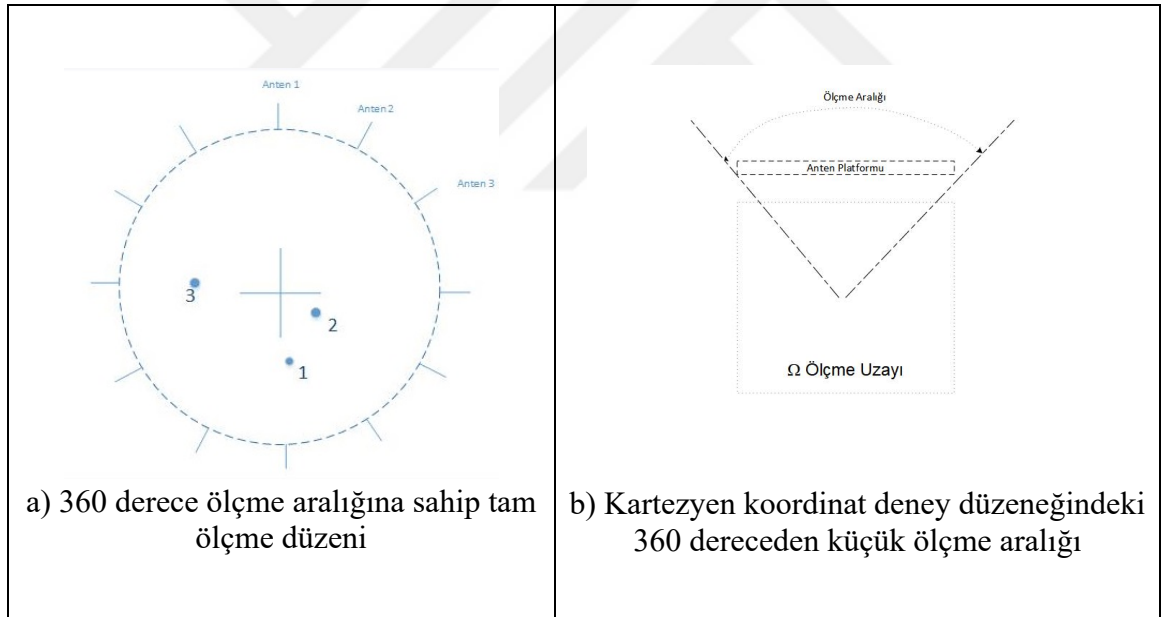
### 2.3.2.4. Anten Platformu Düzlemine Dik Düzlemde Yapılan Görüntüleme

Bu kısımda gösterilen benzetim çalışması, Yöntemin 3 boyutlu Kartezyen koordinatlarda farklı düzlemlerde görüntü oluşturma performansı göstermesi açısından seçilmiştir. Aynı zamanda bu geometri, bir önceki 2 boyutlu silindirik benzetim çalışmalarında sonuçları gösterilmiş olan problem geometrisinin görüntü oluşturduğu düzlem yüzeyde MUSIC yönteminin 3 boyutlu olarak görüntü oluşturma performansını göstermektedir.



Şekil 44. Anten platformu düzlemine dik düzlemde oluşturulan görüntüleme

Şekil 44 de çalışılan 3 ayrı benzetim problemi geometrisi Şekil 44a, 44b ve 44c gösterilmiştir. Şekil 44 de tek saçıcı tel, anten platformuna eşit uzaklıktaki 2 saçıcı tel ve son olarak anten platformuna farklı uzaklıktaki 2 tel saçıcı olmak üzere 3 ayrı problemin benzetim geometrisi, özdeğer vektör çizimleri ve MUSIC yönteminin oluşturduğu görüntüler gösterilmiştir. Anten platformunun pozisyonu, Şekil 44g, 44h ve 44i de, Yöntem tarafından oluşturulan görüntülerde kesikli beyaz çizgi ile gösterilmiştir. Bu kısımdaki benzetim çalışması bir önceki kısımda çalışılan, yöntemin 2 boyutlu silindirik koordinat ekseninde görüntüleme performansına paralel sonuç verdiği görülmektedir. Şekil 28 ve Şekil 29 de, Bir önceki benzetim geometrisinde kullanılan 8 antenin saçıcıların etrafındaki 360 derecelik bir alana eşit olarak yerleştirildiği görülmektedir. Şekil 34 ve Şekil 35 de ise anten platformunun saçıcıların tek tarafında olduğu ve ölçme alanının (aperture) 360 dereceden daha küçük olduğu görülmektedir.



Şekil 45. Silindirik ve kartezyen koordinatlara uygun ölçümler için ölçme aralığı karşılaştırması

3.4.1 alt başlığı Şekil 45a de kullanılmış olan ölçme düzeneğinde antenlerin yerleşimi 360 derecelik bir ölçme aralığı (Measurement Aperture) sağlamaktadır. Şekil 45b de ise 3x8 24 adet antenin kullanıldığı düzende kullanılan ölçme aralığının çizimlerin anten platformundan uzaklığı ile değişen bir ölçme aralığına sahip olduğu görülmektedir. Şekil 45b için teorik olarak cisim anten platformuna yaklaştıkça ölçme Aralığı 180 dereceye

yakınsamakta, cisim uzaklaştıkça ise uzaklığa bağlı olarak 180 dereceden azalmaya başlayarak, sonsuz uzaklık için 0 dereceye doğru limit değer (asimptotic) olarak azalmaktadır. Bu durumu gösteren şematik çizimler Şekil 45 de gösterilmiştir. Şekil 45b de ölçme aralığı açısı değerinin 180 dereceden daha küçük olduğu görülebilir.

Şekil 44 deki sonuçlar incelendiğinde, düşük ölçme aralığında (Measurement Aperture) yapılan ölçümler sebebi ile oluşan belirsizlik görülmektedir. Cisimler anten platformundan uzaklaştıkça, uzaklık bilgisi belirsizleşmekte ve gözlemlenen nitelik daha çok cismin anten platformuna göre olan açısı olmaktadır.

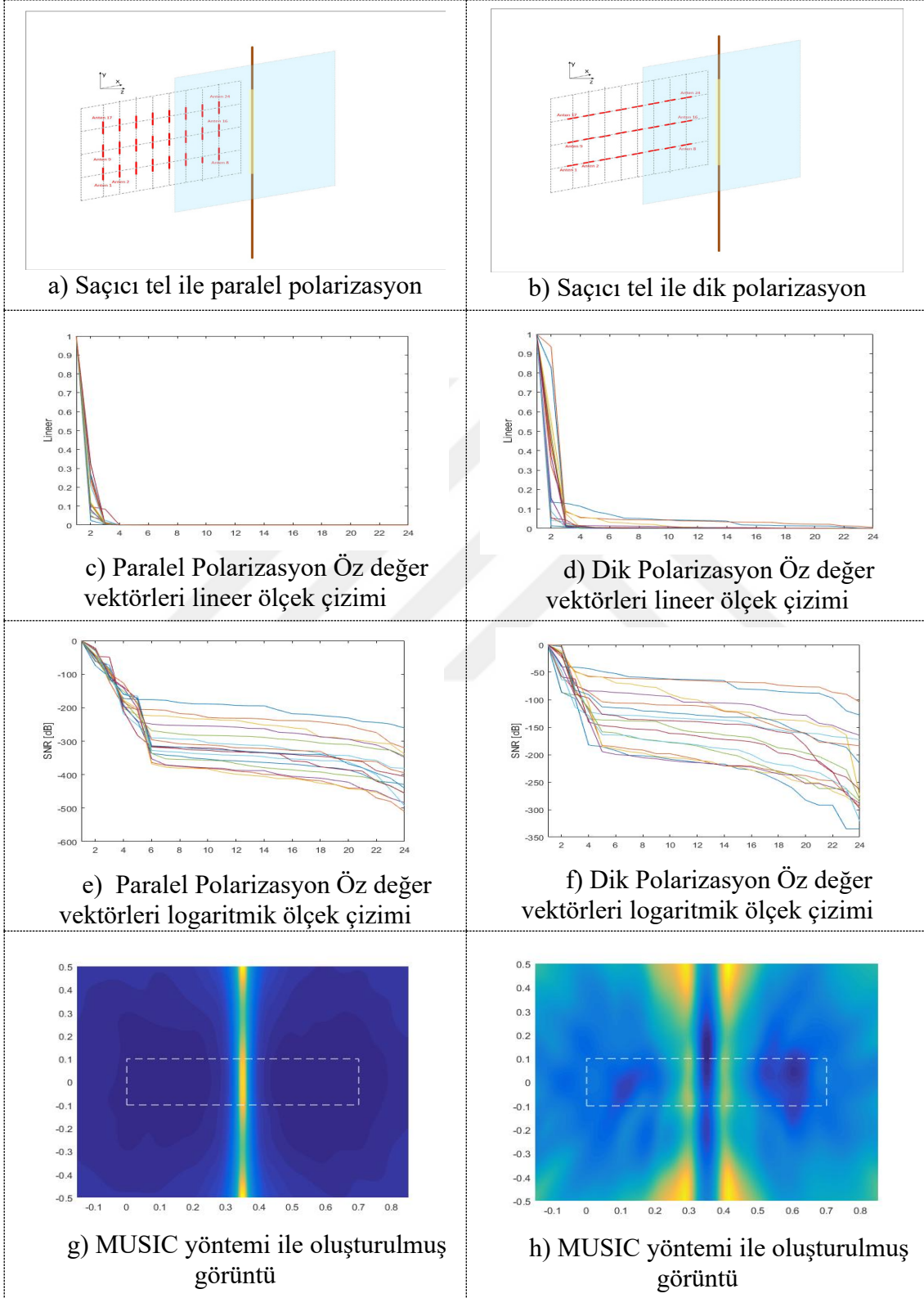
Şekil 44 de gösterilen, yöntem tarafından oluşturulan görüntüler saçıcıların yerinin belirlenmesinde, yöntemin kısıtlı bir ölçme alanı kullanıldığında da başarılı olduğunu göstermektedir.

### **2.3.2.5. MUSIC Yöntemi ile Aydınlatma Elektrik Alanı Yönü ve Tel Saçıcı Doğrultusu ile Olan Polarizasyon Açısının, Saçıcı Şekil, Pozisyon ve Görüntüleme Performansına Etkisi Benzetim Çalışması**

Bu çalışmanın 3.2 alt başlığında, aydınlatıcı alan ile tel saçıcının polarizasyonunu paralel ve dik olma durumunda, saçınan alana etkisi, tel saçıcının tespit edilmesine yönelik etkileri teorik olarak incelendi ve laboratuvar ölçmeleri ile gösterildi. Çalışmanın bu kısmında, aydınlatıcı alan ile tel saçıcı polarizasyon farkının, tel saçıcının şeklini belirlenmesine olan etkisi, benzetim ile gösterilecektir. İlk benzetim problemi olarak tek düz tel saçıcının, saçıcı ile paralel ve dik polarizasyona sahip aydınlatıcı anten düzlemi ile oluşturulmuştur.

Yapılan benzetim sonuçları Şekil 46 de gösterilmiştir. Problem geometrisi şekil 46a ve 46b de, ilgili öz değer vektörleri çizimleri ise Şekil 46 c, 46d, 46e ve 46f de gösterilmiştir. MUSIC yöntemi tarafından oluşturulmuş saçıcı görüntüsü ise ilgili şeklin 46g ve 46h alt şekillerinde gösterilmiştir. Oluşan görüntüler incelendiğinde paralel polarizasyona sahip durumda (Şekil 46g) saçıcının çok net olarak görüntülediği, dik polarizasyonda ise (Şekil 46h) saçıcının bulunduğu yerde boşluk, çevresinde ise bir gölge gösterildiği gözlemlenmektedir. Aydınlatıcının saçıcıya dik polarizasyonda görülen gölgelenmenin sebebi, benzetim ortamında saçıcının ve dipol antenlerin gerçek belirli bir çapa sahip tel kullanılarak modellenmesi ve oluşturulan aydınlatıcı dalganın düzlem dalga değil silindirik dalga yüzeyine sahip ve uzak alanda küresel bir dalgaya yakınlaşmasıdır. Küresel dalga yüzeyine sahip bir aydınlatıcı dalganın ise elektrik alanı polarizasyon vektörü ölçülen

noktanın antene göre konumuna bağı olarak x, y ve z koordinatlarında bileşenleri bulunmaktadır.



Şekil 46. Tek tel saçıcının, saçıcıya paralel ve dik polarizasyona sahip aydınlatıcı antenler ile oluşturulmuş görüntüleme çalışması

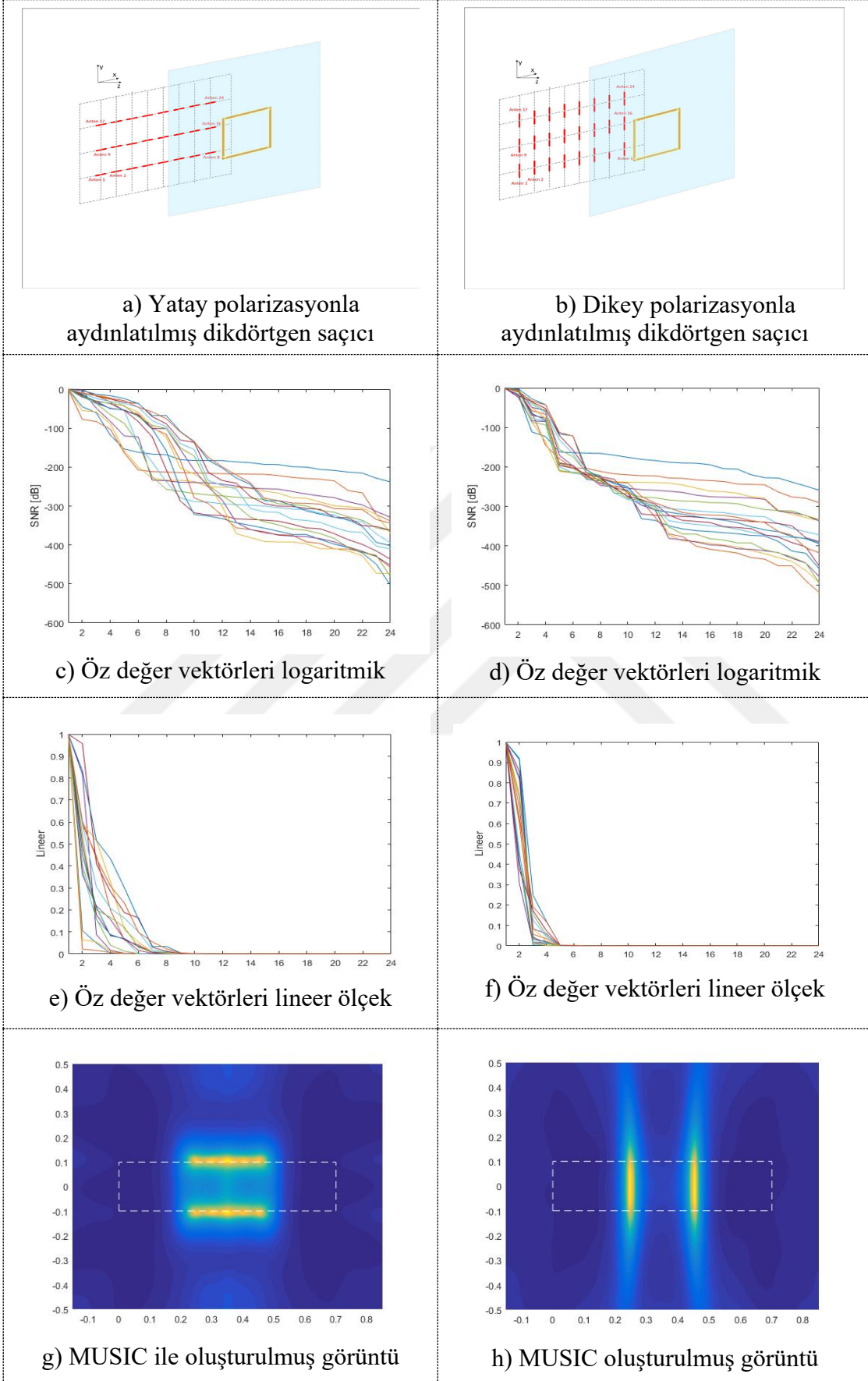
Problemin içerisinde anten polarizasyonu ile uyumlu saçıcı ve/veya saçıcı parçası olması durumunda ise nümerik olarak bu etkiler azalacak ve sadece uygun polarizasyona sahip saçıcı kısımları görüntülenecektir. Bu durum takip eden benzetim çalışmalarında açıkça gösterilmiştir.

Bir sonraki benzetim problemi olarak dikdörtgen formunda şekillendirilmiş bir tel saçıcı cisminin yatay ve dikey polarizasyonda aydınlatılması seçilmiştir. Bu seçimin sebebi ise aynı problem geometrisinde, dikey ve yatay polarizasyona birebir uyan saçıcı parçalarının aynı saçıcı içerisinde bulunması sağlanarak, bunun her iki polarizasyonda yapılacak olan görüntülemeye etkisini incelemektir.

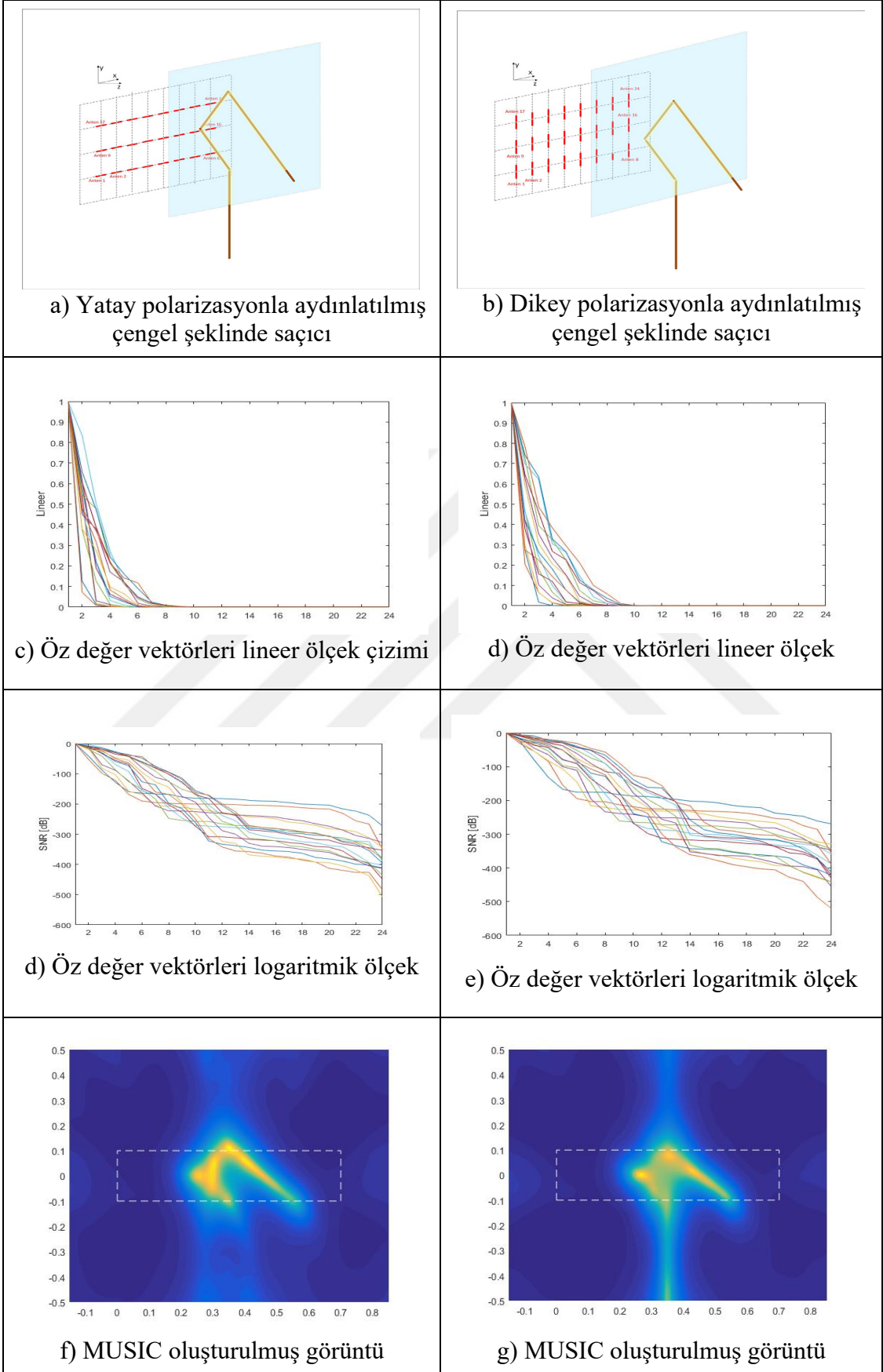
Benzetim sonucunda oluşturulan saçınım matrisini kullanılarak MUSIC yöntemi ile oluşturulmuş görüntüleme sonuçları Şekil 47 de gösterilmiştir. Yatay ve dikey anten platformlu problem geometrisi Şekil 47a ve 47b de, ilgili özdeğer vektör çizimleri ise Şekil 47c, 47d, 47e ve 47f de gösterilmiştir. Şekil 47g de yatay polarizasyon için şekil 47h da ise dikey polarizasyon aydınlatma için, MUSIC yöntemi ile oluşturulmuş görüntüler gösterilmiştir. Şekil 47g ve 47h da gösterilen görüntüler, her bir aydınlatma polarizasyonu için o doğrultudaki saçıcı parçasının görüntülediğini açık bir şekilde göstermektedir. Görüntüler bir önceki benzetim çalışmasında belirtildiği gibi antenlerin oluşturdukları aydınlatıcı alan polarizasyonu ile paralel olan saçıcı kısımlarının görüntüsü oluşturulmuştur. Problemin içerisinde dikey ve yatay polarizasyon ile uyumlu saçıcı parçacıkları olduğu için Şekil 46h da görünen gölgelenme oluşmamıştır. Bunun sebebi nümerik olarak, gölgelenmeyi yaratan saçıcı alanın küçük olması, aynı geometri içinde polarizasyon ile uyumlu saçıcı parçaları bulunduğu için, gölgelenme yerine uygun saçıcı parçalarının gösterilmesidir.

Bir sonraki benzetim problemi olarak çengel formuna sahip bir saçıcının dikey ve yatay polarizasyona sahip antenler ile görüntülenmesi seçilmiştir. Saçıcı çengel formunda olduğu için her iki aydınlatma polarizasyonu ile de uyumlu saçıcı parçalarından oluştuğuna dikkat edilmelidir. Çengel şeklindeki saçıcı ile yapılan benzetim çalışması sonuçlar Şekil48 de gösterilmiştir.





Şekil 47. Dikdörtgen saçıcının dikey ve paralel polarizasyona ile görüntüleme çalışması



Şekil 48. Çengel şeklinde bir tel saçıcının dikey ve paralel polarizasyona sahip antenlerle oluşturulmuş görüntüleme çalışması

Benzetim sonucunda oluşturulan saçının matrisini kullanılarak MUSIC yöntemi ile oluşturulmuş görüntüleme sonuçları Şekil 48 de gösterilmiştir. Problem geometrisi alt şekil 48a ve 48b de özdeğer vektör çizimleri ise şekil 48c, 48d, 48e ve 48f de gösterilmiştir. Yatay polarizasyon ve dikey pozisyon için MUSIC yöntemi ile oluşturulmuş görüntüler şekil 48g ve 48h da gösterilmiştir. Şekil 48g ve 48h da çengel şeklindeki saçının görüntüsünün MUSIC tarafından başarılı bir şekilde oluşturulduğu görülmektedir. Beklendiği üzere, şekil 48f deki oluşan görüntü incelendiğinde çengel şeklindeki saçının yatay polarizasyonla dik konuma sahip sap kısmının görüntülenmediği, şekil 48h da gösterilen görüntüde ise antenler ile paralel polarizasyona sahip olduğu için net bir şekilde görüntülediği açıkça görülmektedir.

## 2.4. Laboratuvar Deney, Ölçme ve Doğrulama Çalışmaları

Bu kısımda benzetim çalışmalarında incelenen problemlerin benzerleri, laboratuvar ortamında ölçülerek, MUSIC yönteminin benzetim çalışmaları ile görünen görüntüleme performansı laboratuvar ölçme deneyleri ile gösterilmiştir.

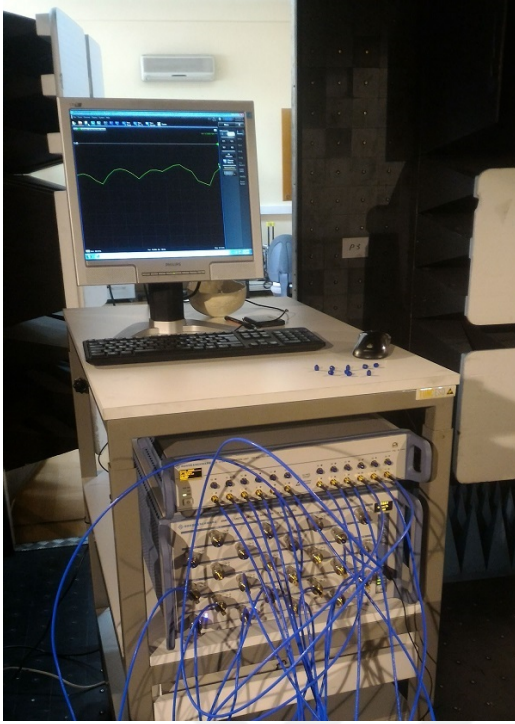
### 2.4.1. MUSIC ile 2 Boyutlu Silindirik Koordinatlar ile Uyumlu Geometriye Sahip Tel saçıcıların Pozisyonlarını Görüntüleme Deneyleri ve Sonuçları

Çalışmanın bu kısmında, MUSIC algoritmasının, silindirik koordinatlara örtüşen geometride yapılmış olan benzetim sonuçları, benzer geometri de kurulmuş olan deney düzeneği ile deneysel olarak doğrulanmıştır. Çalışmanın bu kısmı alt başlık 3.3.1 de anlatılan benzetim çalışmalarının deneysel olarak doğrulanmasıdır. Yapılan deneyler, dış ortamdan gelebilecek etkileri azaltmak amacı ile Elektromanyetik yansız odada gerçekleştirilmiştir.

Deney düzeneği, yapılan benzetim çalışmaları uyumlu olması amacı ile 12 anten kullanılarak düzenlenmiştir. Antenlerin her biri 75cm Çapında bir plastik (Pleksiglas) çember kasnak olacak şekilde 30 derecelik bir açı ile tutturulmuştur.

Ölçüm cihazı olarak 24 port Vektör Şebeke (network) Analizörü olan Rodhe& Schwarz marka ZNBT cihazı kullanılmıştır. Cihazın port 1 den port 12 ye kadar olan ölçme uçlarına eşit uzunluktaki SMA konektörü takılmış RF kablolar ile bağlanmıştır. Kullanılan Kabloların uzunlukları 150 cm dir. Ölçmeler öncesinde kablolar antenlere bağlanmadan aynı firmaya ait 24 port Vektör Şebeke Analizör Kalibratör cihazı ile kablo uçlarında bulunan SMA konektörlere kadar kalibre edilmiştir. Antenler kasnağa SMA dişi adaptörler kullanılarak tutturulmuştur. 12 port otomatik kalibrasyon sırasında bu SMA dişi-dişi adaptörler kullanılmadığı için, bu birimlerin etkisi anten birimlerinin bir parçası olarak düşünülmesi uygundur.

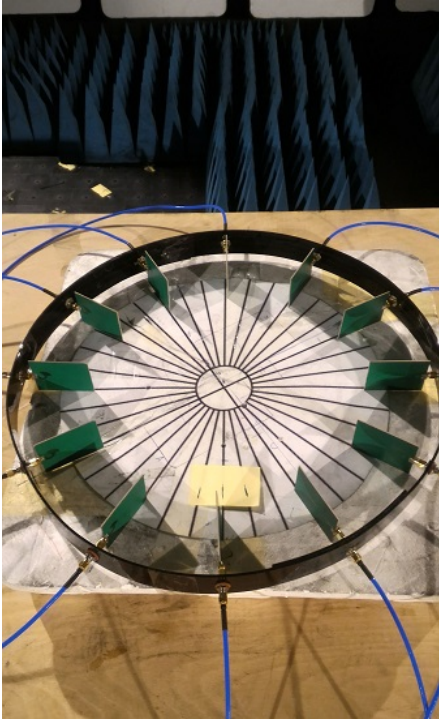
Bu kısımda kullanılan deney düzeneği fotoğrafları Şekil 49 da gösterilmiştir. Kullanılan geniş bantlı Vivaldi antenlerin fotoğrafı Şekil 50 de gösterilmiştir.



a) 24 port vektör Şebeke (Network )  
Analizör ve 24 port otomatik kalibratör



b) 12 adet geniş bantlı Vivaldi anten  
yerleştirilmiş pleksiglas kasnak



c) RF Kablo bağlantıları yapılmış kasnak



d) Üç tel saçıcı yerleştirilmiş üzenek

Şekil 49. İki boyutlu silindirik koordinat eksenine uyumlu saçıcıların pozisyonunun belirlenmesi için hazırlanan ölçme düzeni

Şekil 49 da fotoğrafları verilmiş olan ölçme düzeneği aşağıdaki parçalardan oluşmuştur.

- 24 port vektör network Analizör Rodhe&Schwarz ZNBT
- 24 port Vektör Şebeke Analizörü otomatik kalibrasyon cihazı (Sadece ölçme öncesi kalibrasyon işleminde kullanılmıştır)
- 12 adet geniş bantlı Vivaldi anten [30]
- 12 adet 150cm uzunlukta 2 ucuna SMA konektörü takılmış RF kablo.
- 12 adet SMA dişi-SMA dişi adaptör



Şekil 50. Kullanılan Vivaldi antenlerin ön ve arka yüzleri

Deneyleerde yapılan ölçümler sonucunda vektör network analizör tarafından oluşturulan 12x12 boyutlarındaki çok frekanslı saçınım parametreleri matrisi (Multi Frequency Scattering Parametre Matrisi) elde edilmiştir. MUSIC algoritması ise silindirik koordinat eksenine uygun olarak 2 boyutlu çözüm verebilecek şekilde MATLAB platformu üzerinde kodlanmış ve MATLAB platformu üzerinde çalıştırılmıştır. Music algoritması x-y düzleminde görüntü oluşturmuştur. Bu düzlem saçıcıların pozisyonunu belirleyen düzlemdir.

Antenleri tutan pleksiglas kasnak, üzerinde kâğıttan çizili ölçek bulunan strafor bir plaka üzerindedir. Antenler ve strafor plaka ise ahşap bir sehpa üzerinde yerleştirilmiştir. Ahşap sehpanın üzerinde, strafor levhanın altında, tel saçıcıların sehpanın altında devam edebilmesini sağlamak amacı bir delik bulunmaktadır. Bu sayede ince metal saçıcıların

strafor levha delinerek antenlere z doğrultusunda ortalayacak kadar batırılabilmesi ve shepanın üst düzeyinin altına kadar inebilmesine olanak sağlanmıştır.

Deney düzeneğinin ve kullanılan antenlerin fotoğrafları Şekil 49 da gösterilmiştir.

Deneyde metal iletken tel saçıcı olarak 4mm çapında alüminyum çubuk kullanılmıştır.

Deney düzeneğini oluşturan kablo, ölçme cihazı gibi saçıcıların dışında olan dış etkenlerin etkisinin, deney sonuçlarına etkisini ortadan kaldırmak amacı ile saçıcılar yerleştirilmeden hemen önce bir boş ölçüm alınmıştır. Bu boş ölçüm saçıcılar dışındaki diğer etkenlerin etkisini, deney ölçümünden çıkarılması için kullanılmıştır.

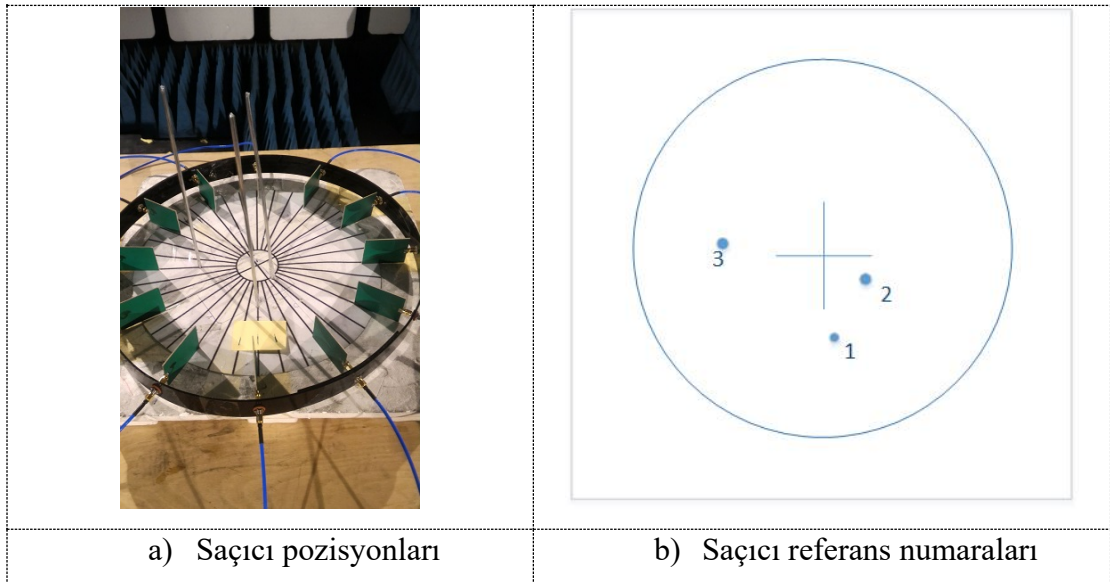
Deney 1, 2 ve 3 saçıcı cisim kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney boş ölçüm dahil olmak üzere, 3 saçıcı cismin ve saçıcılara ait pozisyonların 1 saçıcı cisimli, 2 saçıcı cisimli ve son olarak tüm saçıcıların yerleştirildiği durum olmak üzere 8 ölçme olarak yapılmıştır. Deney sırasında kullanılan Şebeke Analizör ayarları aşağıdadır.

Frekans Aralığı: 0.8 – 8 GHz

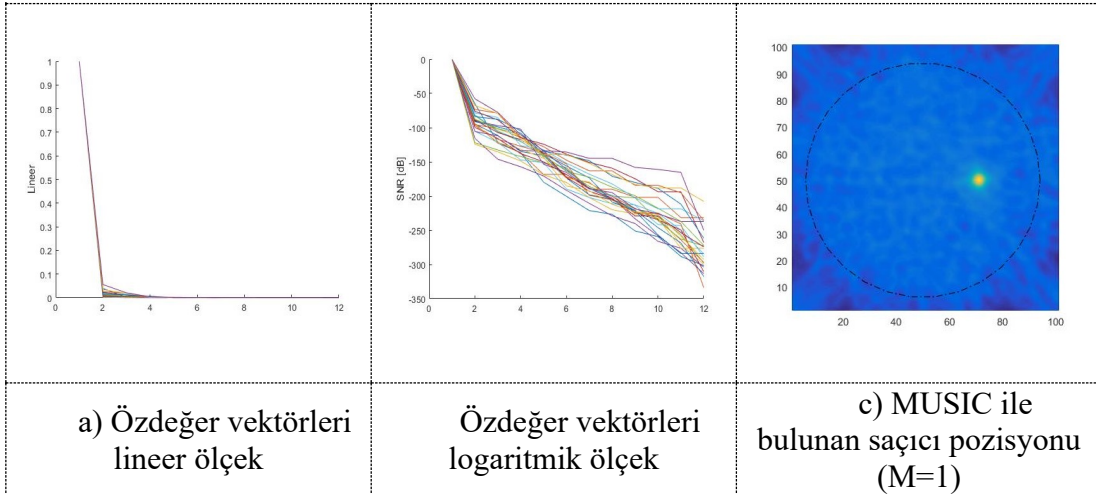
Ara Frekans Filtresi Genişliği: 100Hz

Ölçme Frekans Sayısı: 25

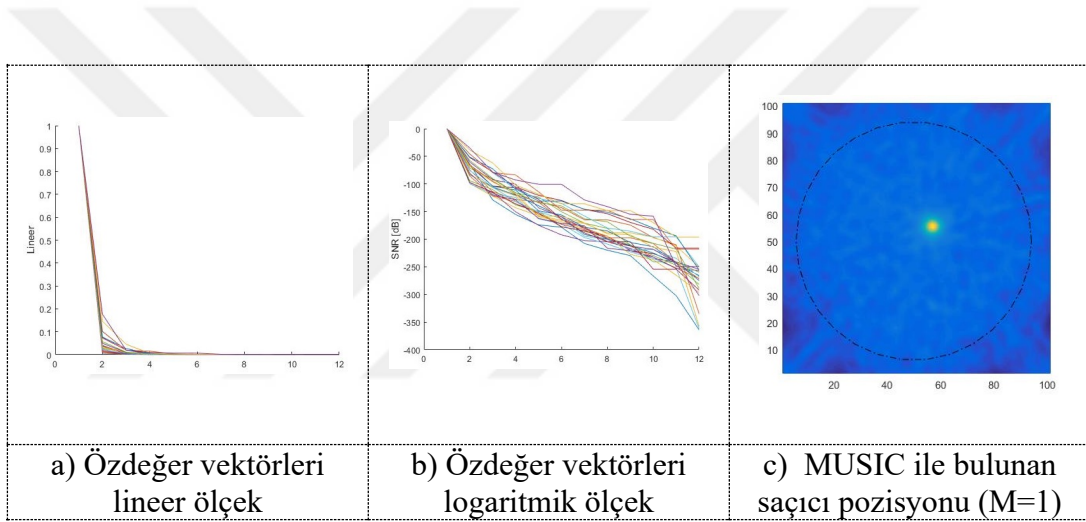
Ölçme sonuçları, MATLAB platformu üzerinde kodlanmış olan MUSIC algoritması kullanılarak saçıcı cisimlerin yerleri bulunmuştur. Yapılan ölçüm varyasyonlarının ve algoritma tarafından bulunan saçıcı pozisyonlarının kolay takibi açısından, saçıcı cisimlere referans numara verilmiştir. Referanslar numaraları şematığı ve saçıcı cisimlerin fotoğrafı şekil 51 de gösterilmiştir.



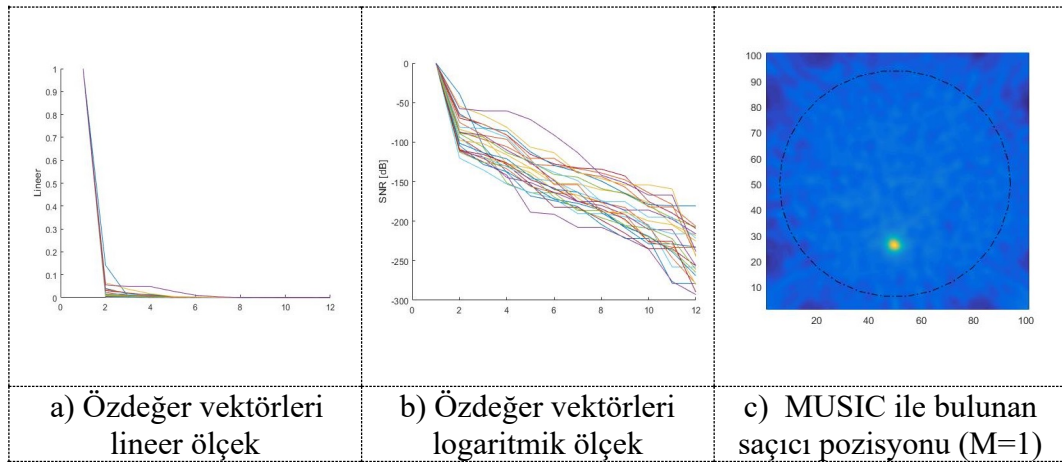
Şekil 51. Deneyde kullanılan saatıcı cisimlere verilen referans numaraları



Şekil 52. (1) Referans numaralı saçıcı için sonuçlar



Şekil 53. (2) Referans numaralı saçıcı için sonuçlar



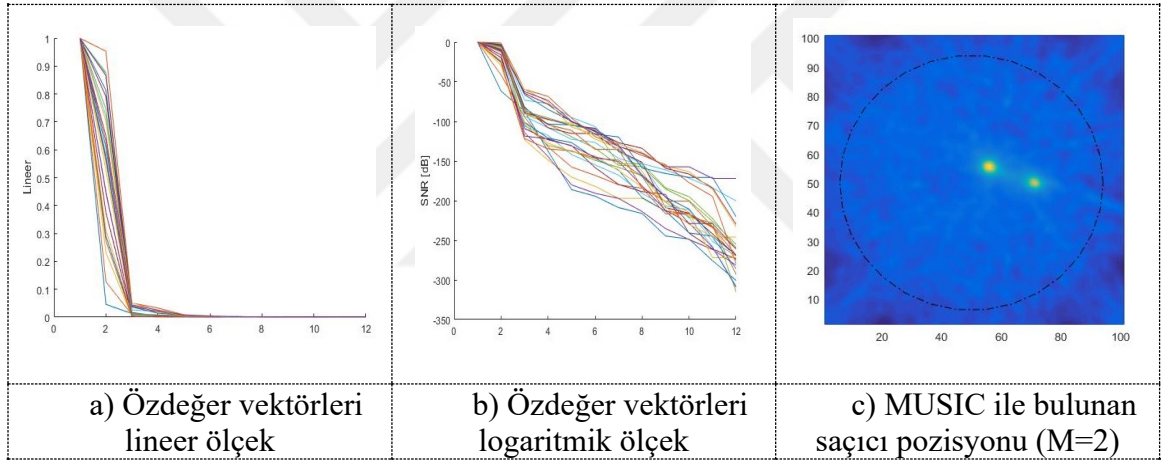
Şekil 54. (3) Referans numaralı saçıcı için sonuçlar



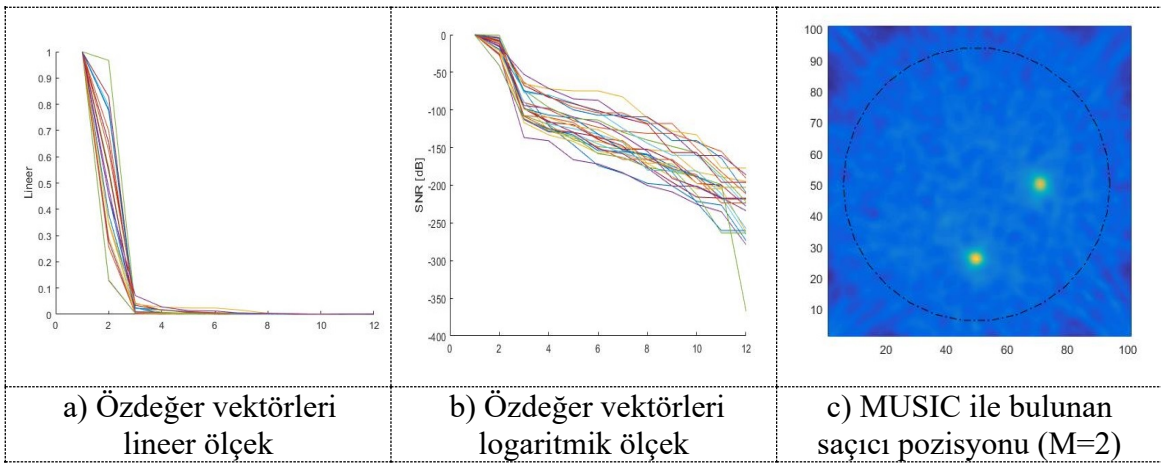
Şekil 52, Şekil 53 ve Şekil 54 de 1 saçıcı cisim kullanan deney ölçümleri sonuçları gösterilmiştir. Şekillerde MUSIC algoritması çıktıları olan saçıcı pozisyon ve öz değer vektörleri büyüklüğü her üç saçıcı cisim pozisyonu için gösterilmiştir. Özdeğer vektör büyüklükleri lineer ve logaritmik ölçekte çizdirilmiş ve görüntüleme sırasında kullanılan, denklem (2.10) tanımlanmış olan,  $M$  parametresi değeri belirtilmiştir.

Öz Değer Vektörleri çiziminde, farklı renklerle gösterilen çizimler farklı frekanslardaki ölçme sonuçlarına karşılık gelen özdeğer vektör büyüklükleri çizimleridir. Aynı renkte çizilmiş olan her bir renk o ölçme frekansı için 12 özdeğer vektör büyüklüğünü içermektedir. Oluşturulan görüntü ise her bir frekansta oluşturulmuş görüntülerin toplamıdır.

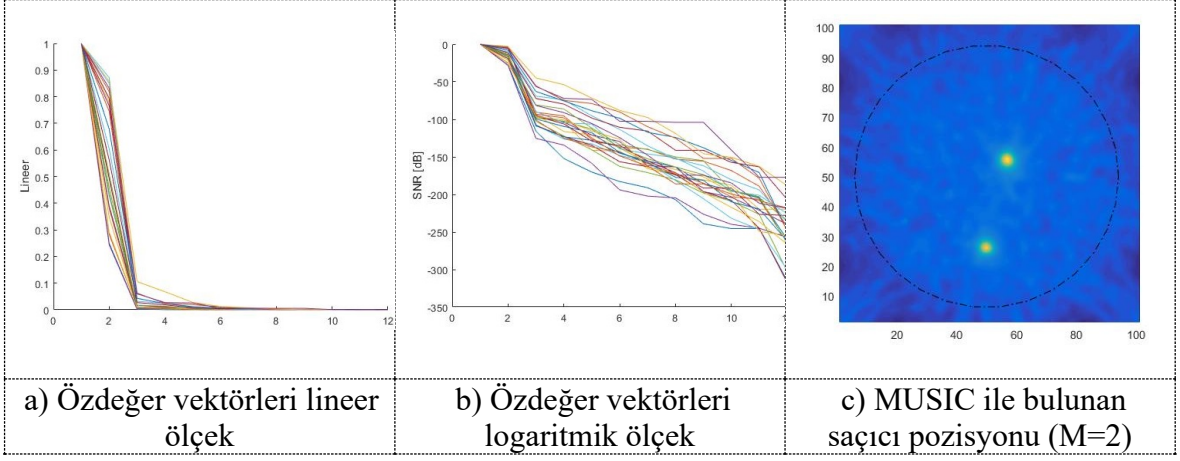
Benzer olarak Şekil 55, 56 ve 57 de 2 saçıcı cisim kullanılan yapılan deney sonuçları gösterilmiştir.



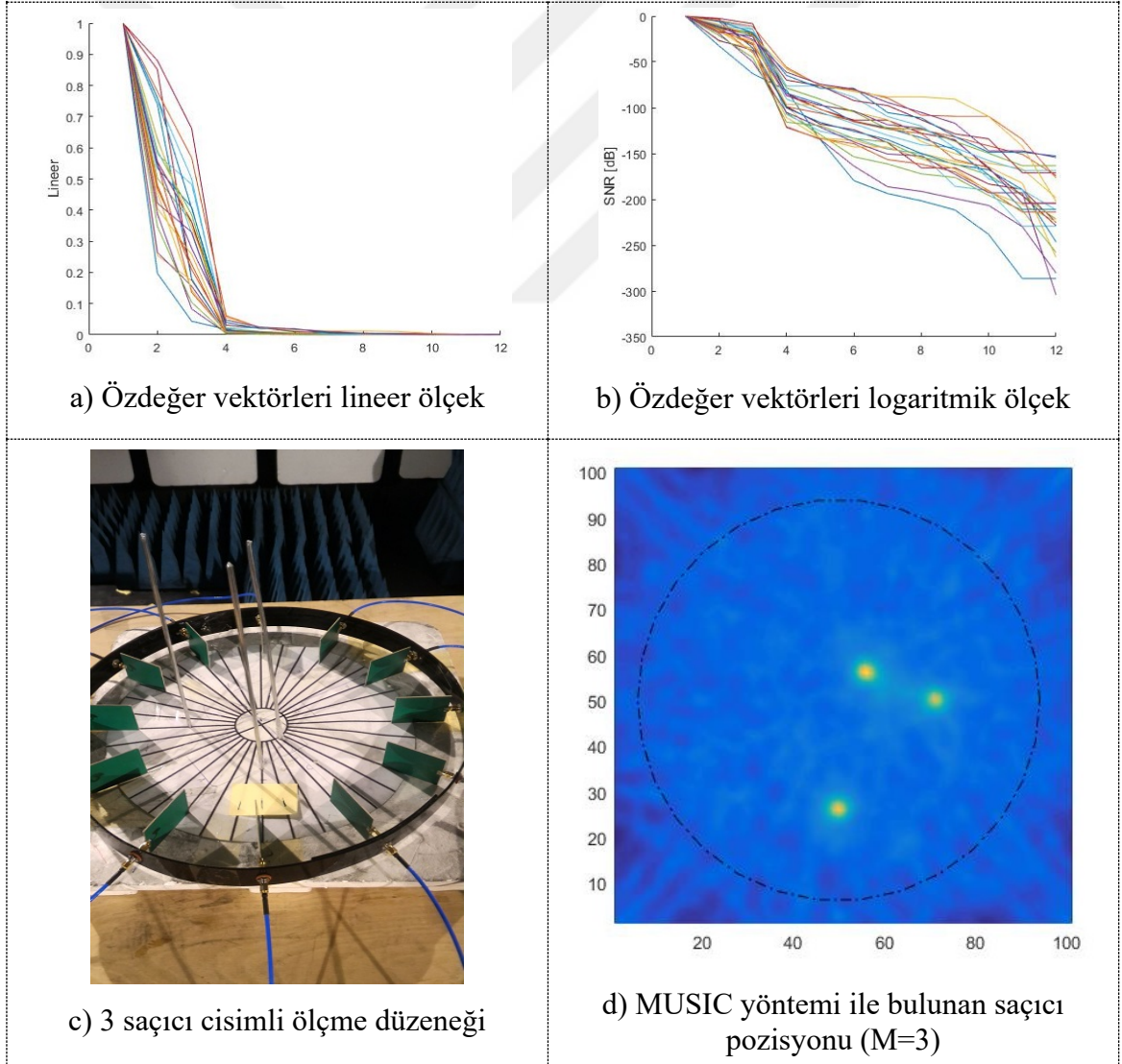
Şekil 55. (1) ve (2) Referans numaralı saçıcı için sonuçlar



Şekil 56. (2) ve (3) Referans numaralı saçıcı için sonuçlar

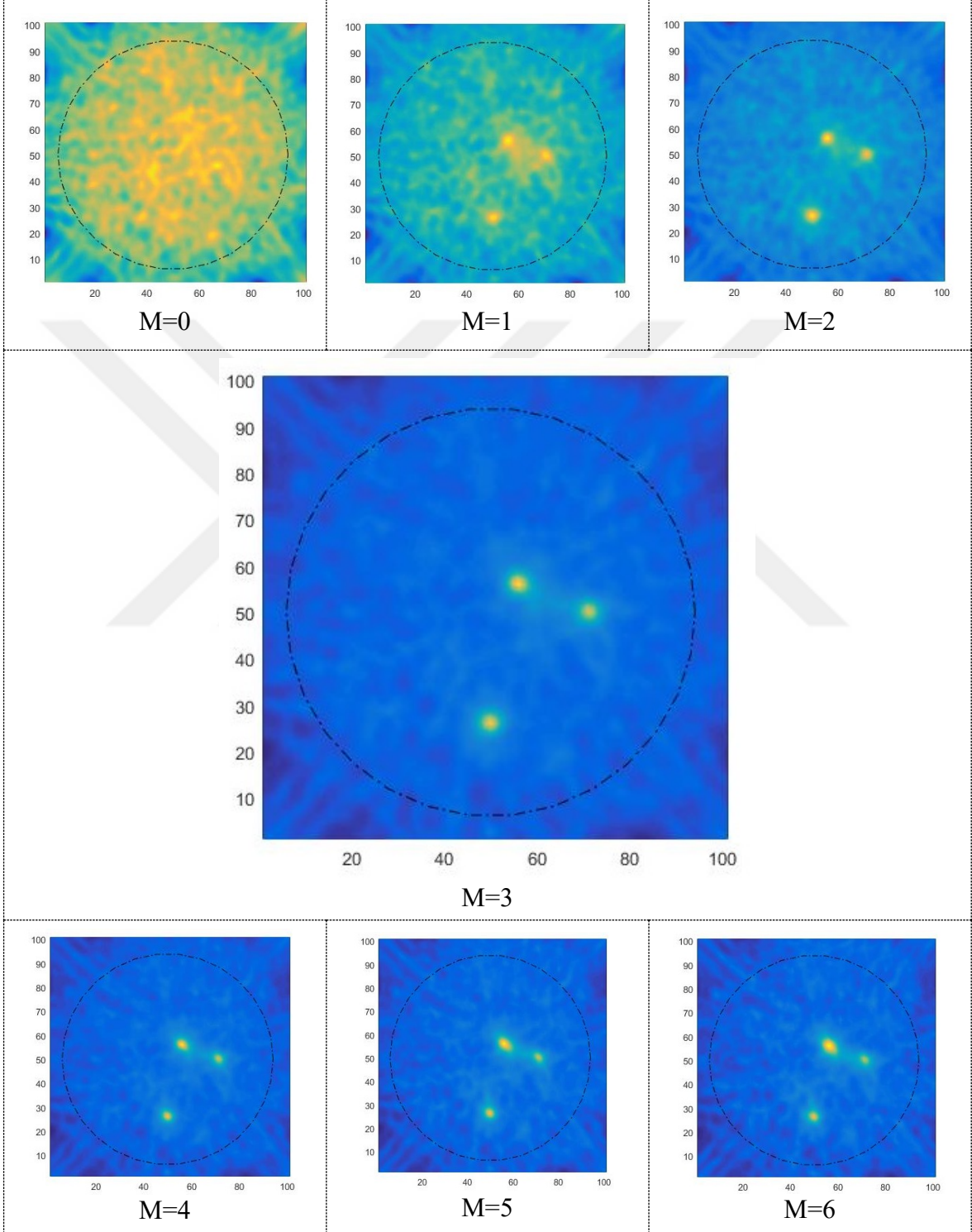


Şekil 57. (1) ve (3) Referans numaralı saçıcı için sonuçlar



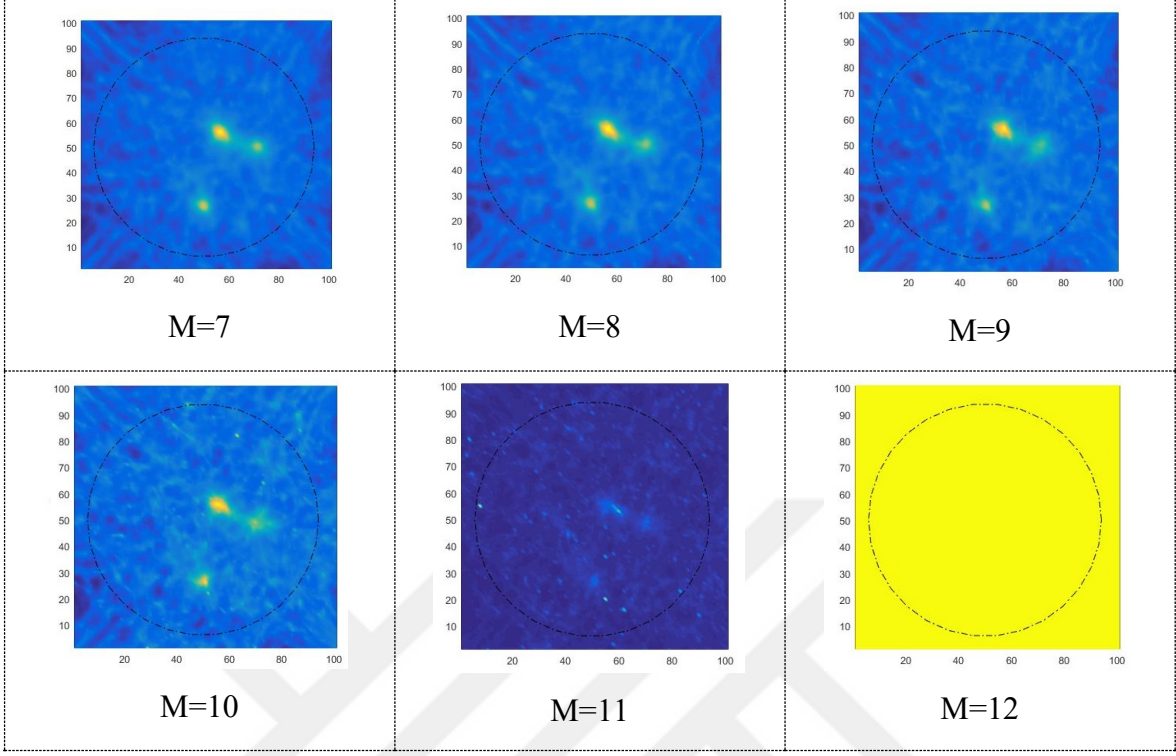
Şekil 58. (1), (2) ve (3) referans numaralı saçıcı cisimlerin deneyi sonuçları

Son olarak Şekil 58 de 3 saçıcı cisim kullanılan 6lçüm ve sonuçları verilmiştir.



Şekil 59.  $M$  Sınır değer seçiminin MUSIC yönteminin oluşturduğu görüntüye etkisi

Şekil 59'un devamı



Deneysel sonuçlar, alt başlık 3.3.1 kısmında Şekil 32 gösterilen benzetim sonuçları ile karşılaştırıldığında, deneysel ölçümler sonucunda elde edilen veri kullanılarak yapılan MUSIC yöntemi ile saçıcı pozisyonu belirlenmesinin başarılı olduğu görülmektedir.

MUSIC teorik formülasyonu ile uyumlu olarak, öz değerlerin büyüklüğü nü gösteren çıktılar saçıcı cisim sayısını açık olarak içinde barındırmaktadır. Tek saçıcı cisimli sonuçlarda, 12 öz vektörden sadece 1 tanesi gürültü düzeyinin üzerinde kalmıştır. Benzer olarak 2 saçıcı cisimli sonuçlarda 2 öz değer, 3 saçıcı cisimli ölçmelerde ise 3 öz değer vektör büyüklüğü gürültü seviyesi üzerindedir. MUSIC teorisi ile uyumlu olarak, öz değer vektörlerinden bir kısmının sinyal uzayını, kalanların ise gürültü uzayını ifade ettiği açıkça görülmektedir.

Bu çalışmanın sonuçları, alt başlık 3.3.1 Şekil 33 gösterildiği gibi, Şekil 59 de 3 satıcılı ölçüm için M faktörünün 0 dan 12 ye kadar değiştirildiği parametre ayarları için deneysel ölçmeler için, MUSIC yönteminin oluşturduğu görüntülere etkisi gösterilmiştir.

Şekil 59 de gösterilen sonuçların, Bu çalışmanın alt başlık 3.3.1 Şekil 33 gösterilen benzetim sonuçları ile uyumlu olduğu görülmektedir.

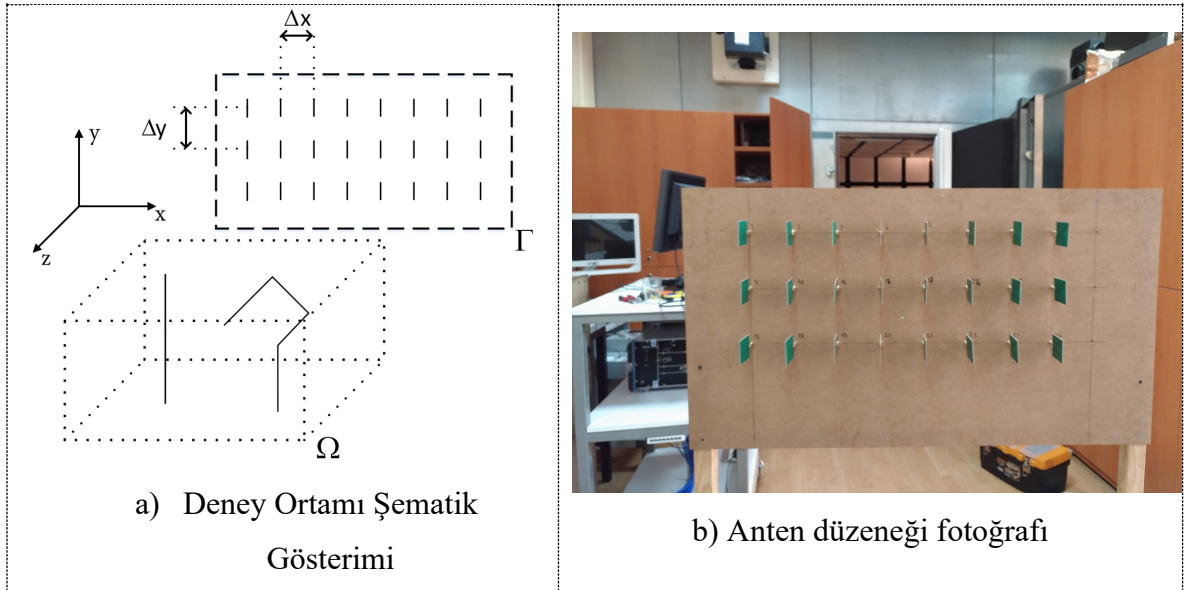
Çalışmanın bu kısmındaki sonuçlardan bir kısmı yayınlanmıştır [23].

### 2.4.2. MUSIC ile 3 Boyutlu Kartezyen Koordinatlar ile Uyumlu Geometriye Sahip Tel Saçıcıların Şekillerinin Belirlenmesi ve Görüntülemesi Deney ve Sonuçları

Çalışmanın bu kısmında, MUSIC algoritmasının, Kartezyen koordinatlara örtüşen geometride yapılmış olan benzetim sonuçları, benzer geometri de kurulmuş olan deney düzeneği ile deneysel olarak doğrulanmıştır. Çalışmanın bu kısmı alt başlık 3.3.2 de anlatılan benzetim çalışmalarının deneysel olarak doğrulanmasıdır. Bu kısımda yapılan deneyler, yansız oda içerisinde değil, laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir.

Benzetim çalışmalarına paralel olarak, Bu laboratuvar ölçmelerinde Kartezyen koordinatlarda bir yüzey üzerine 3 sıra ve 8 er adet olarak yerleştirilmiş 24 anten ile ölçmeler yapılmıştır. Antenler ahşap bir platform üzerine 3 sıra olacak şekilde 3x8=24 adet olacak şekilde dizilmiştir. Anten platformunun şematik gösterimi ve fotoğrafı Şekil 60 da gösterilmiştir.

Deney düzeneği, yapılan benzetim çalışmaları uyumlu olması amacı ile 24 anten kullanılarak düzenlenmiştir. Antenlerin ahşap bir platforma, Satırların arası 13cm, sütunların arası 10cm olacak şekilde 3 satır 8 sütun olacak şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 60. Kartezyen koordinatlarda tel saçıcı cisimlerin şeklinin belirlenmesi deneylerinde kullanılan düzenek



Şekil 61. Kartezyen koordinatlarda tel saçıcı cisimlerin şeklinin belirlenmesi deneylerinde kullanılan anten platformu, ölçme cihazı ve ölçme düzeneği fotoğrafları

Ölçüm cihazı olarak 24 port Vektör Şebeke (network) Analizörü olan Rodhe&Schwarz marka ZNBT cihazı kullanılmıştır. Cihazın port 1 den port 24 ye kadar olan ölçme uçlarına eşit uzunluktaki SMA konektörü takılmış RF kablolar ile bağlanmıştır. Kullanılan Kabloların uzunlukları 150 cm dir. Ölçmeler öncesinde kablolar antenlere bağlanmadan aynı firmaya ait 24 port Vektör Şebeke Analizör Kalibratör cihazı ile kablo uçlarında bulunan SMA konektörlere kadar kalibre edilmiştir. Antenler anten platformunu oluşturan ahşap levhaya, SMA dişi-dişi adaptörler kullanılarak tutturulmuştur. 24 port otomatik kalibrasyon sırasında bu SMA dişi-dişi adaptörler kullanılmadığı için, bu birimlerin etkisi anten birimlerinin bir parçası olarak düşünülmesi uygundur.

Deney düzeneği ile ilgili diğer fotoğraflar Şekil 61 de gösterilmiştir.

Şekil 61 da fotoğrafları verilmiş olan ölçme düzeneği aşağıdaki parçalardan oluşmuştur.

- 24 port vektör network Analizör Rodhe&Schwarz ZNBT
- 24 port Vektör Şebeke Analizörü otomatik kalibrasyon cihazı (Sadece ölçme öncesi kalibrasyon işleminde kullanılmıştır)
- 24 adet geniş bantlı Vivaldi anten [30]
- 24 adet 150cm uzunlukta 2 ucuna SMA konektörü takılmış RF kablo.
- 24 adet SMA dişi- dişi adaptör

Deneylerde yapılan ölçümler sonucunda vektör network analizör tarafından oluşturulan 24x24 boyutlarındaki çok frekanslı saçınım parametreleri matrisi (Multi Frequency Scattering Parametre Matrisi) elde edilmiştir. MUSIC algoritması ise Kartezyen koordinat eksenine uygun olarak 3 boyutlu çözüm verebilecek şekilde MATLAB platformunda kodlanmış ve MATLAB platformu üzerinde çalıştırılmıştır. Algoritma şekil 60a da gösterilen  $\Omega$  çözüm uzayında istenen kesitlerin oluşturduğu düzlemsel alanda görüntü oluşturmuştur. Aksi belirtilmedikçe görüntüler şekilde gösterilen  $\Omega$  uzayında z koordinatı değiştirilerek, belirtilen z koordinatında bulunan x-y kesitinin oluşturduğu düzlemsel yüzeyde oluşturulmuştur.

Deney sırasında kullanılan Şebeke Analizör ayarları aşağıdadır.

Frekans Aralığı: 0.5 – 6 GHz

Ara Frekans Filtresi Genişliği: 100Hz

Ölçme Frekans Sayısı: 56

### 2.4.2.1.MUSIC Yöntemi ile Tel Saçıcıların Şeklini Görüntüleyebilme Ölçme ve Deneyleri

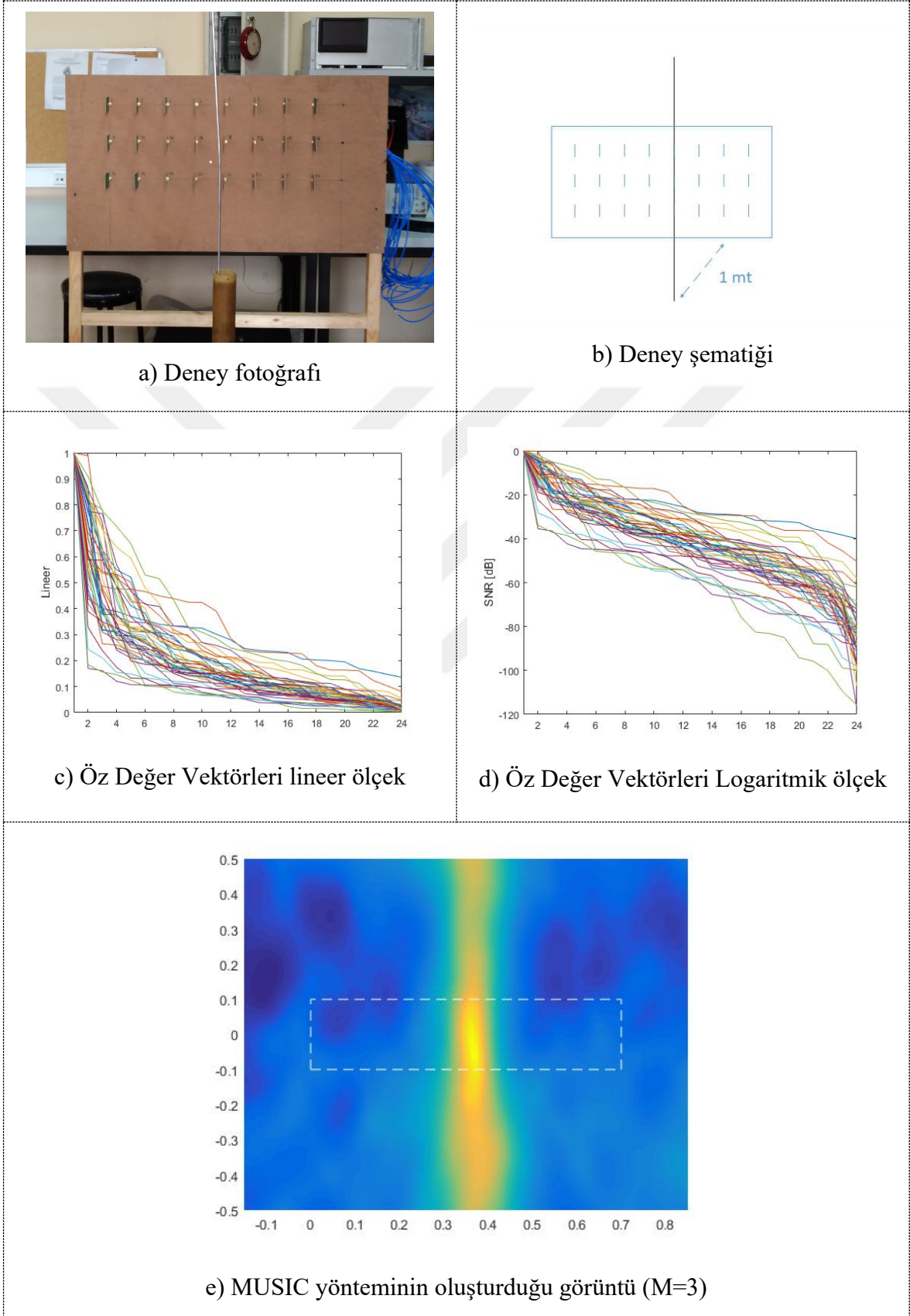
Bu ölçmelerde MUSIC Algoritmasının belirli bir uzaklıktaki saçıcıları görüntüleyebilip görüntüleyemediğini göstermek amacı ile çeşitli şekillerdeki saçıcılar anten platformunun yerleştirilmiş ve saçıcı şekillerinin algoritma ile görüntülenmesi sağlanmıştır. Ölçmelerde düz dikey yerleştirilmiş tel saçıcı, Düz eğik yerleştirilmiş saçıcı tel ve V şeklinde eğilmiş tel şeklindeki saçıcılar kullanılmıştır. Bu kısımdaki sonuçlar, çalışmanın 3.3.2.1 alt başlığında gösterilmiş olan benzetim çalışması sonuçları ile karşılaştırılabilir.

Şekil 62 de düz dikey yerleştirilmiş tel saçıcı sonucu gösterilmiştir. Saçıcının anten platformuna olan uzaklığı 1 metredir. Görüntüleme yüzey kesiti olarak  $\Omega$  çözüm uzayında  $z=1$  mt olan x-y kesitindeki düzlem kullanılmıştır.

Öz Değer Vektörleri çiziminde, farklı renklerle gösterilen çizimler farklı frekanslardaki ölçme sonuçlarına karşılık gelen özdeğer vektör büyüklükleri çizimleridir. Aynı renkte çizilmiş olan her bir renk o ölçme frekansı için 24 özdeğer vektör büyüklüğünü içermektedir. Oluşturulan görüntü ise her bir frekansta oluşturulmuş görüntülerin toplamıdır.

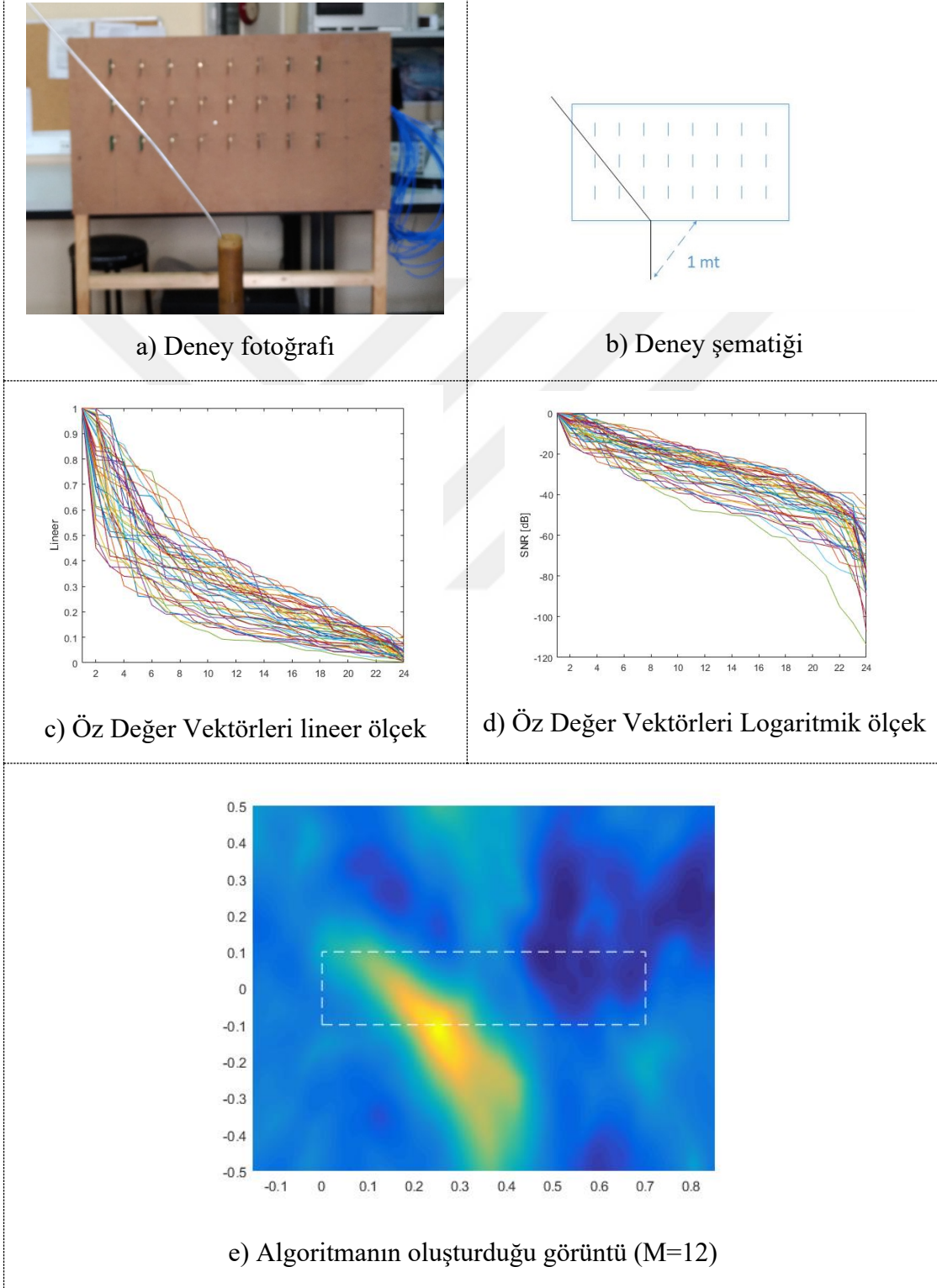
Şekil 62c öz değerler lineer ölçek çiziminde öz değerlerin büyüklüklerindeki hızlı düşüş görülmektedir. Şekil 62d görülen görüntü oluşturulurken, öz değer numarası 3 den büyük olanlar gürültü uzayında olduğu düşünülmüş ve yöntem bu ayar değeri ile çalıştırılmıştır. Şekil 62d deki görüntü gürültü uzayını kapsayan, büyüklükleri en küçük 23 özdeğer vektörü kullanılarak çıkarılmıştır. Öz değerlerdeki bu hızlı düşme MUSIC algoritmasının noktasal saçıcılara verdiği davranış ile uyumludur. Anten platformundaki yerleştirilmiş antenlerin oluşturduğu elektrik alanı, tel saçıcı yönüyle paralel konuşlandırılmıştır. Bu durumda anten platformunun önünde yerleştirilmiş olan tel saçıcı  $\Omega$  çözüm uzayında 2 boyutlu x-z düzleminde yerleştirilmiş bir noktasal saçıcı olarak düşünülebilir. Tek bir noktasal saçıcı için, teorik olarak, MUSIC algoritmasının sonucunda oluşan matris işleminin sahip olduğu 24 adet öz değer vektörünün sadece ilk değerleri çözüm uzayında bulunmakta, kalan 23 değer ise gürültü uzayını temsil etmektedir. Deney sonucu teorik beklenti ile uyuşmuştur. Algoritmanın ürettiği görüntü ise anten platformunun önüne yerleştirilmiş olan saçıcıyı doğru bir biçimde görüntülemiştir. Ölçme anten platformunun, oluşturulan görüntüdeki pozisyonu alt şekil d) de beyaz kesikli çizgiler ile gösterilmiştir. Şekil 62 deki sonuçlar, bu çalışmanın, 3.3.2.1 alt başlığı Şekil 36 da gösterilmiş olan benzer problemin benzetim sonuçları ile örtüşmektedir.





Şekil 62. Anten platformuna 1 mt uzaklıkta yerleştirilmiş düz Tel Saçıcı Ölçümü

Bir sonraki deney olarak ise tel saçıcı dik olarak değil açılı bir şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 63 de eğimli olarak yerleştirilmiş tel saçıcı deneyi ölçme fotoğrafı, ölçme şematığı ve algoritma sonucunda çıkan öz vektörler ve görüntüleme sonucu gösterilmiştir.



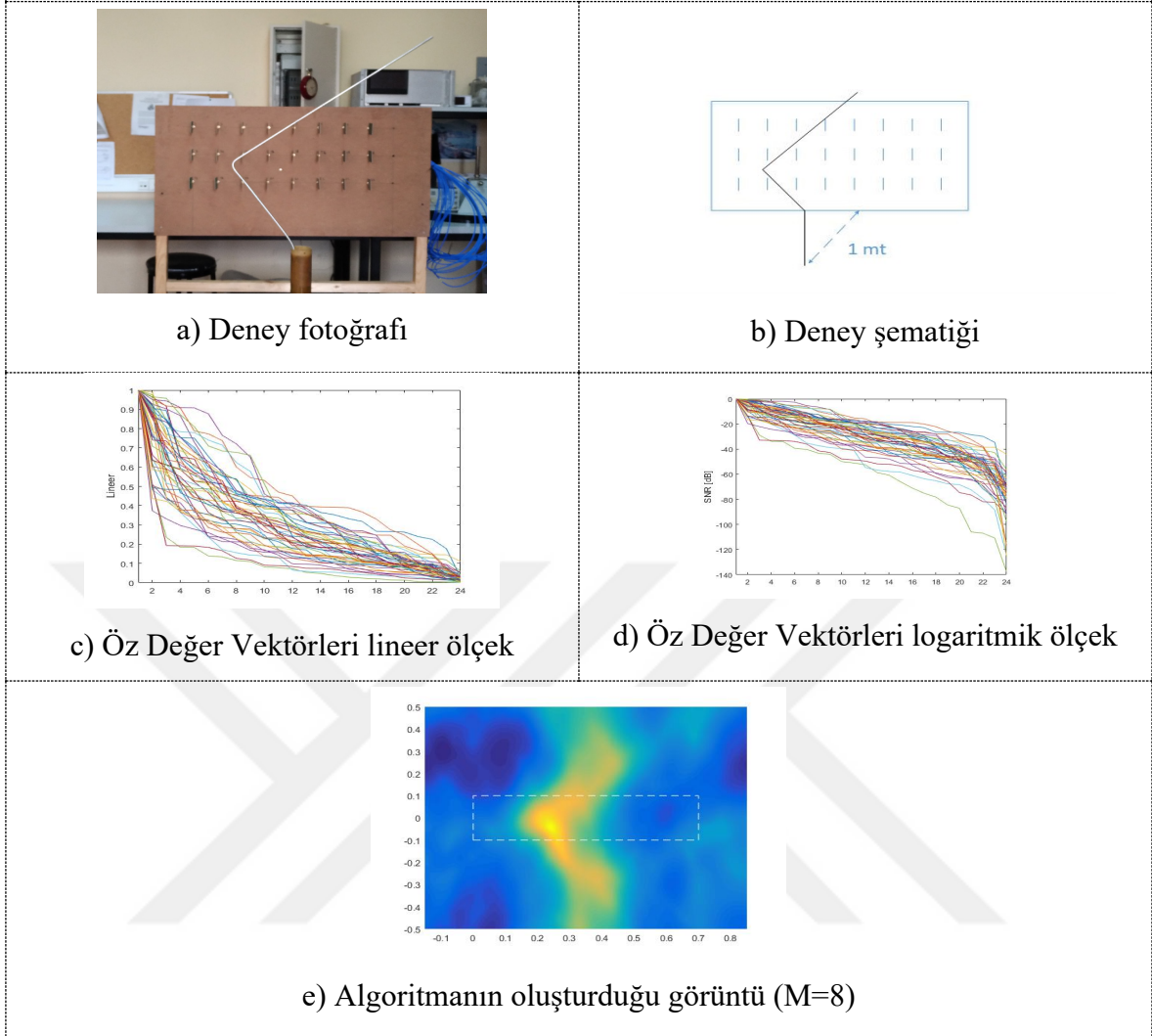
Şekil 63. Anten platformuna 1 mt uzaklıkta yerleştirilmiş eğimli düz tel saçıcı ölçümü

Şekil 63c ve 63d de gösterilmiş, öz değer vektör çizimlerinden, anten platformu önünde olan tel saçıcının eğik yerleştirilmesinin, saçıcının noktasal saçıcı gibi davranmaktan uzaklaştırdığını ve bu durumun sonucunda öz değer vektörlerinin dağılımının, sonuçları şekil 62 de verilmiş olan bir önceki ölçmeye göre değişmiş olduğu gözlemlenmektedir. Bu sebeple görüntü oluşturulurken, öz değer numarası 12 den büyük olanlar gürültü uzayında olduğu düşünülmüş ve yöntem  $M=12$  ayar değeri ile çalıştırılmıştır.  $M$  parametresi 12 olarak seçilirken yöntemin oluşturduğu görüntünün, problem geometrisine en benzer görüntüyü verecek şekilde olması da dikkate alınmıştır. MUSIC algoritmasının oluşturduğu görüntü şekil 63e gösterilmiştir. Anten platformunun önüne yerleştirilmiş olan eğik saçıcı cismin yöntem tarafından doğru bir biçimde görüntülediği görülmektedir.

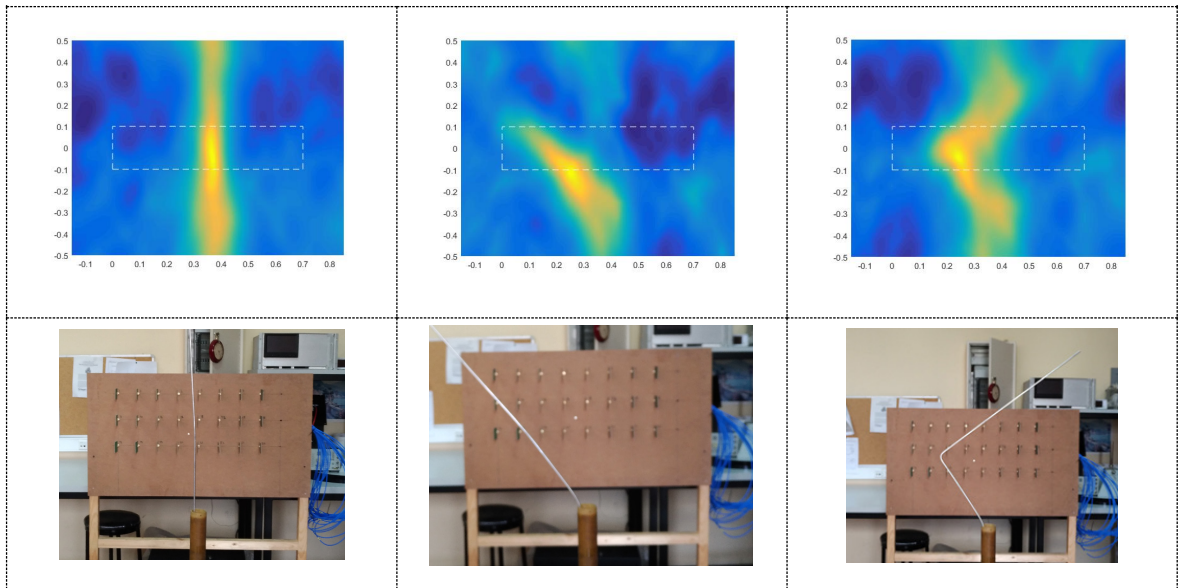
Şekil 63 deki sonuçlar, bu çalışmanın, 3.3.2.1 alt başlığı Şekil 37 de gösterilmiş olan benzer problemin benzetim sonuçları ile örtüşmektedir. Şekil 37 deki problemde saçıcı cismin eğik yerleştirilmiş düz bir tel olmasına dikkat edilmelidir. Şekil 37b ve şekil 63b karşılaştırıldığında saçıcı şekil farkı görülebilir. Bu faktör ve deneysel ölçüm sırasında ortaya çıkan gürültülü veri sebebi ile yöntemin çalıştırıldığı  $M$  değerinin farklı seçilmesini (Şekil 37 benzetim için  $M=3$ , Şekil 63 ölçme deneyi için  $M=12$ ) gerektirdiği değerlendirilmiştir.

Bir sonraki ölçümde ise saçıcı cisim olarak daha karışık şekilli bir tel kullanılmıştır. Şekil 64'de bu ölçüm için deneyi fotoğrafı, ölçme şematığı, yöntem sonucunda çıkan öz vektörler ve görüntüleme sonucu gösterilmiştir. Bu ölçüme de, eğik tel saçıcıda olduğu gibi, saçıcının noktasal saçıcı gibi davranmaktan uzaklaştığını ve bu durumun sonucunda öz değer vektörlerinin dağılımının, şekil 62 deki önceki ölçmeye göre değişik bir davranış sergilemiş olduğunu göstermiştir. Öz vektör çizimine bakılarak, öz değer numarası 8 den büyük olanlar gürültü uzayında olduğu düşünülmüş ve algoritma bu ayar değeri ile çalıştırılmıştır. MUSIC algoritmasının oluşturduğu görüntü şekil 64e de gösterilmiştir. Anten platformunun önüne yerleştirilmiş olan saçıcı doğru bir biçimde görüntülenmiştir.

Şekil 64 deki sonuçlar, bu çalışmanın, 3.3.2.1 alt başlığı Şekil 38 de gösterilmiş olan benzer problemin benzetim sonuçları ile örtüşmektedir. Şekil 38 deki problemde saçıcı cismin tek noktadan V şekli verilecek biçimde kırılmış düz bir tel olduğuna, Şekil 64a kullanılan saçıcının ise iki noktasından kırılarak oluşturulmuş bir saçıcı cisim olduğuna dikkat edilmelidir. Şekil 64e de gösterilen yöntemin oluşturduğu görüntüde saçıcının bu ekstra şekli de görüntülenmektedir.



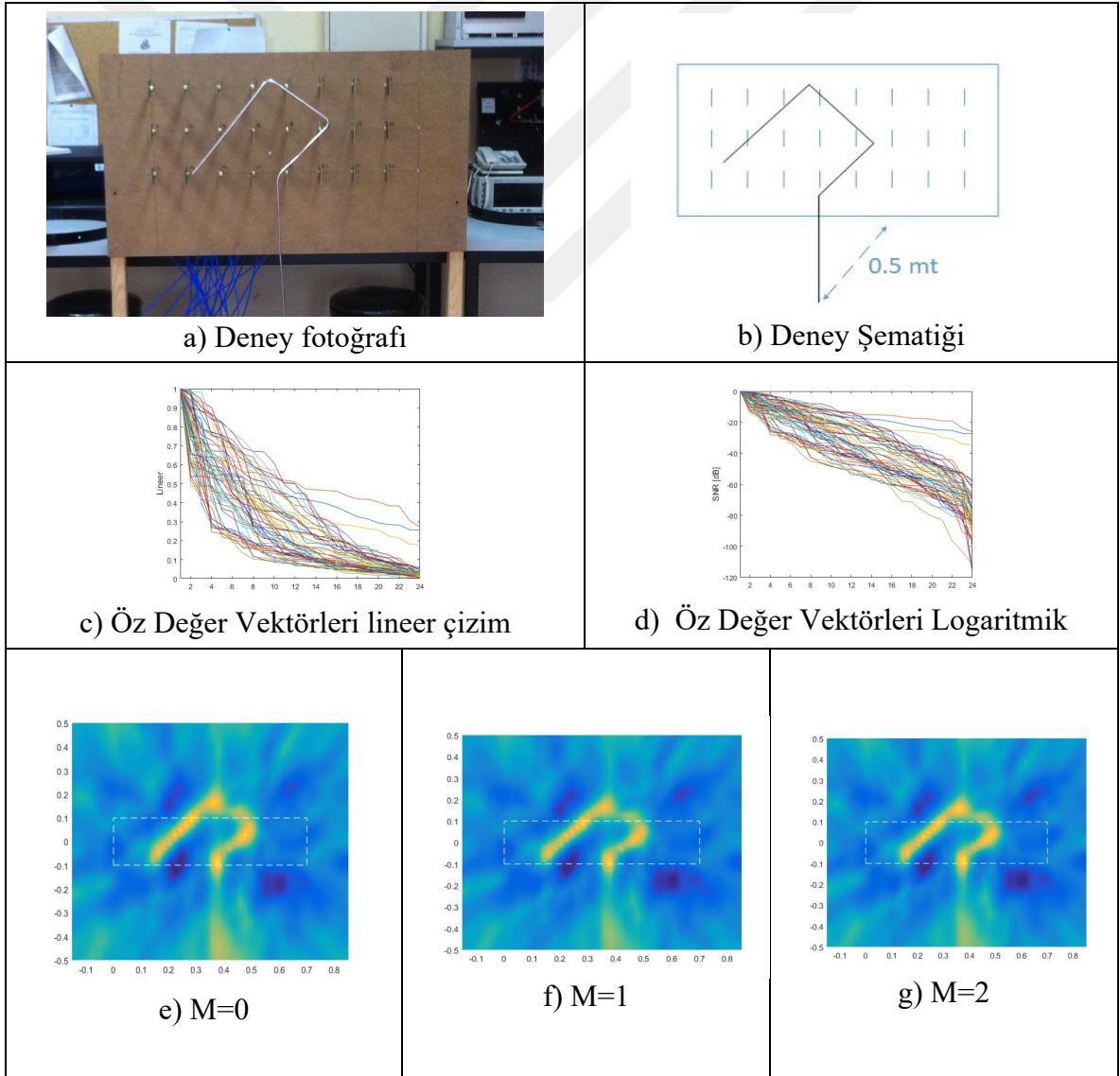
Şekil 64. Anten platformuna 1 mt uzaklıkta yerleştirilmiş karışık şekilli saçıcı ölçümü



Şekil 65. Üç deneyin birlikte değerlendirilmesi

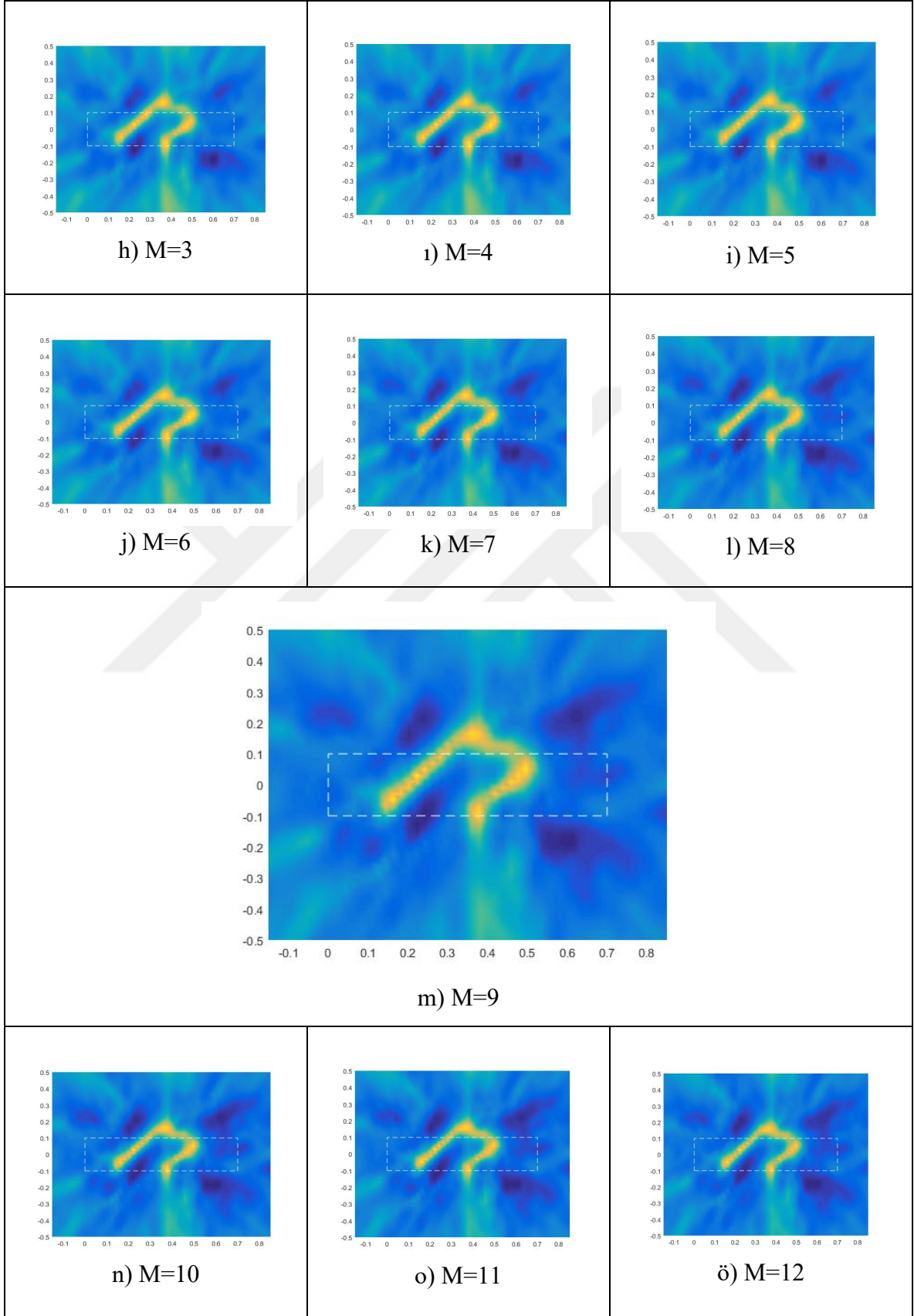
Şekil 65 de her üç deneyin fotoğraf ve MUSIC algoritması ile oluşturulan görüntüleri birlikte olarak gösterilmiştir. Şekil 64 den görüldüğü gibi MUSIC algoritması anten platformuna 1 metre uzaklıkta yerleştirilmiş olan çeşitli şekillerdeki tel saçıcıları başarılı olarak görüntülemiştir.

Bir sonraki deney olarak ise bu çalışmadaki alt başlık 3.3.2.1 benzetim çalışmaları ile paralel olarak çengel şeklinde ki bir saçıcı incelenmiştir. Bu kısımda ayrıca, alt başlık 3.3.2.1 şekil 39 da benzetim sonuçları görülen, MUSIC algoritması çalıştırılırken en önemli parametrelerden birisi olan, en yüksek kaç tane öz vektörün sinyal uzayını temsil ettiğini belirleyen  $M$  parametresi değiştirilerek, MUSIC yönteminin çıktısının görsel olarak nasıl değiştiği gösterilmiştir. Şekil 66 da sonuçlar görülebilir.

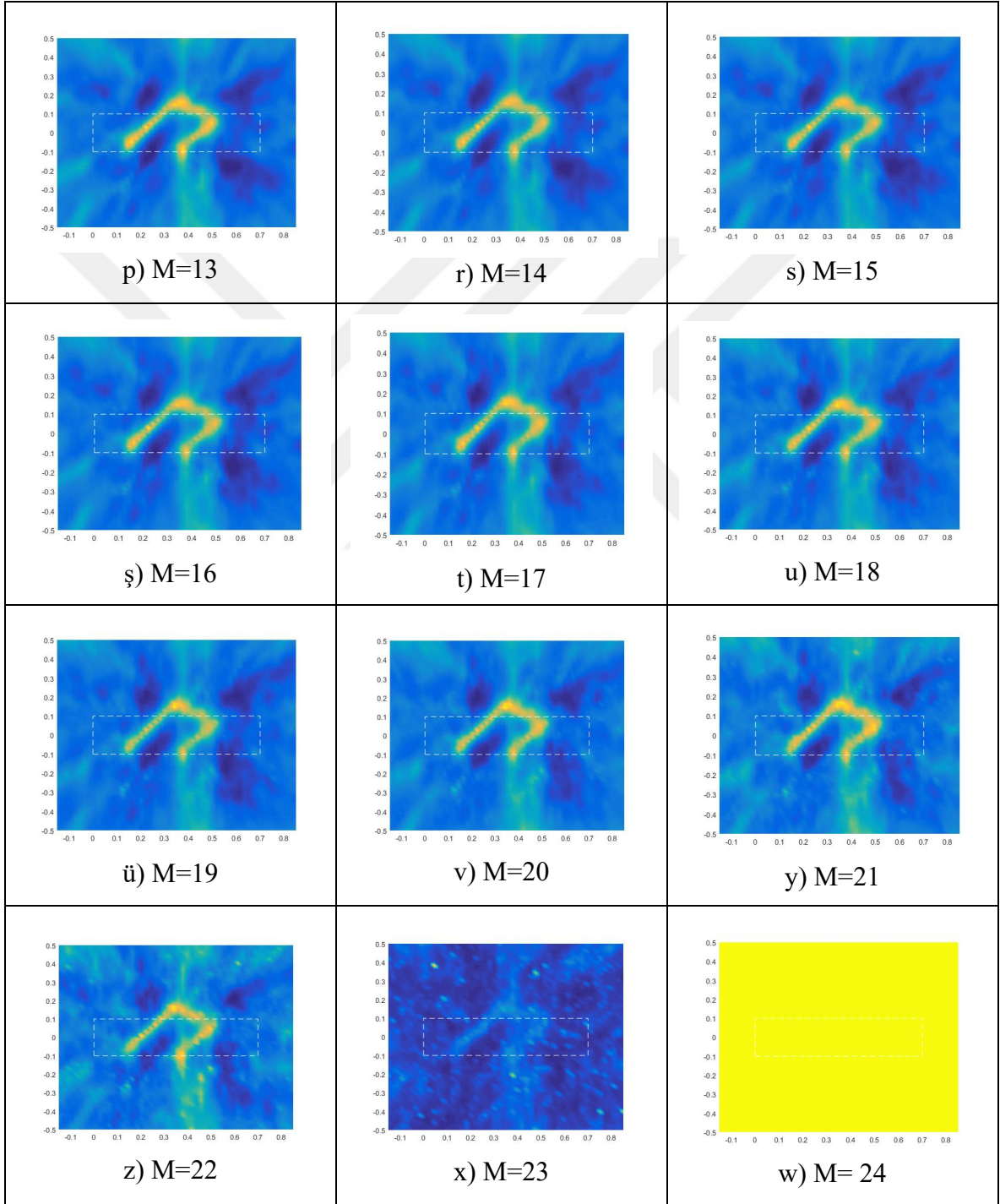


Şekil 66. Çengel şeklindeki saçıcı deneyi ve  $M$  parametresinin oluşan üzerine etkisi

Şekil 66'nın devamı



Şekil 66'nın devamı



Şekil 39 da gösterilen benzer geometrinin benzetim sonuçları ile Şekil 66 da gösterilen deneysel ölçme performansı karşılaştırıldığında M faktörünün etkisinin benzetim sonuçlarında daha fazla görüldüğü, deneysel çalışmada ise daha az etkili olduğu görülebilir. Dikkate değer en büyük fark ise küçük M faktörleri seçimi içindir. Şekil 39e, 39f ve 39g ile Şekil 66e, 66f ve 66g karşılaştırıldığı zaman bu davranış net olarak görülmektedir. Benzetim çalışmaları sonuçlarında küçük M faktörleri için görüntünün doğru oluşmadığı, deneysel doğrulamada ise görüntünün oluştuğu görülmektedir. Deneysel çalışmada, şekil 66e de gösterilen ve  $M=0$  değeri için görüntü oluşması dikekte değerdir. Bilinildiği gibi,  $M=0$  seçimi tüm özdeğer vektörlerinin gürültü uzayını temsil ettiği anlamın gelmektedir. Bu davranışın sebebi benzetim çalışmasında ortamın teorik ideale yakın olması ve gürültü olmaması, deneysel çalışmada ise idealden daha uzak bir deney ortamı olmasıdır. Şekil 66c de görüldüğü gibi deneysel çalışmada sinyal uzayı ile gürültü uzayını temsil eden öz vektörlerini sınırı belirli değildir. Bu yargıya her iki durumda ortaya çıkan bir nevi sistemin sinyal gürültü oranı olarak ifade edilebilecek, özdeğer vektörlerinin logaritmik ölçekteki çizimlerine bakılarak karar verilmiştir. Benzetim çalışmasının logaritmik ölçekte çizimi şekil şekil 39c de, deneysel ölçme sonucunda çıkan sonuçlar ise Şekil 66d de görülebilir. Her iki durumdaki sinyal gürültü oranındaki fark bu iki izimde görülmektedir. Şekil 39c deki logaritmik ölçek 100 dB iken Şekil 66d de ise 20 dB dir. Bu deneysel ölçmenin içerdiği gürültünün benzetim platformuna göre daha yüksek olduğunun direk göstergesidir. Gürültü seviyesinin yüksekliğinden dolayı M faktörü seçiminin görüntü kalitesine etkisi deneysel çalışmada daha az belirgindir.

Çalışmanın bu kısmında ortaya çıkan sonuçlar, alt başlık 3.3.2.1 de gösterilmiş olan benzetim çalışmaları sonuçları gibi, MUSIC yönteminin çengel şekli verilmiş tel saçıcının şeklini başarılı bir şekilde oluşturduğunu göstermektedir.

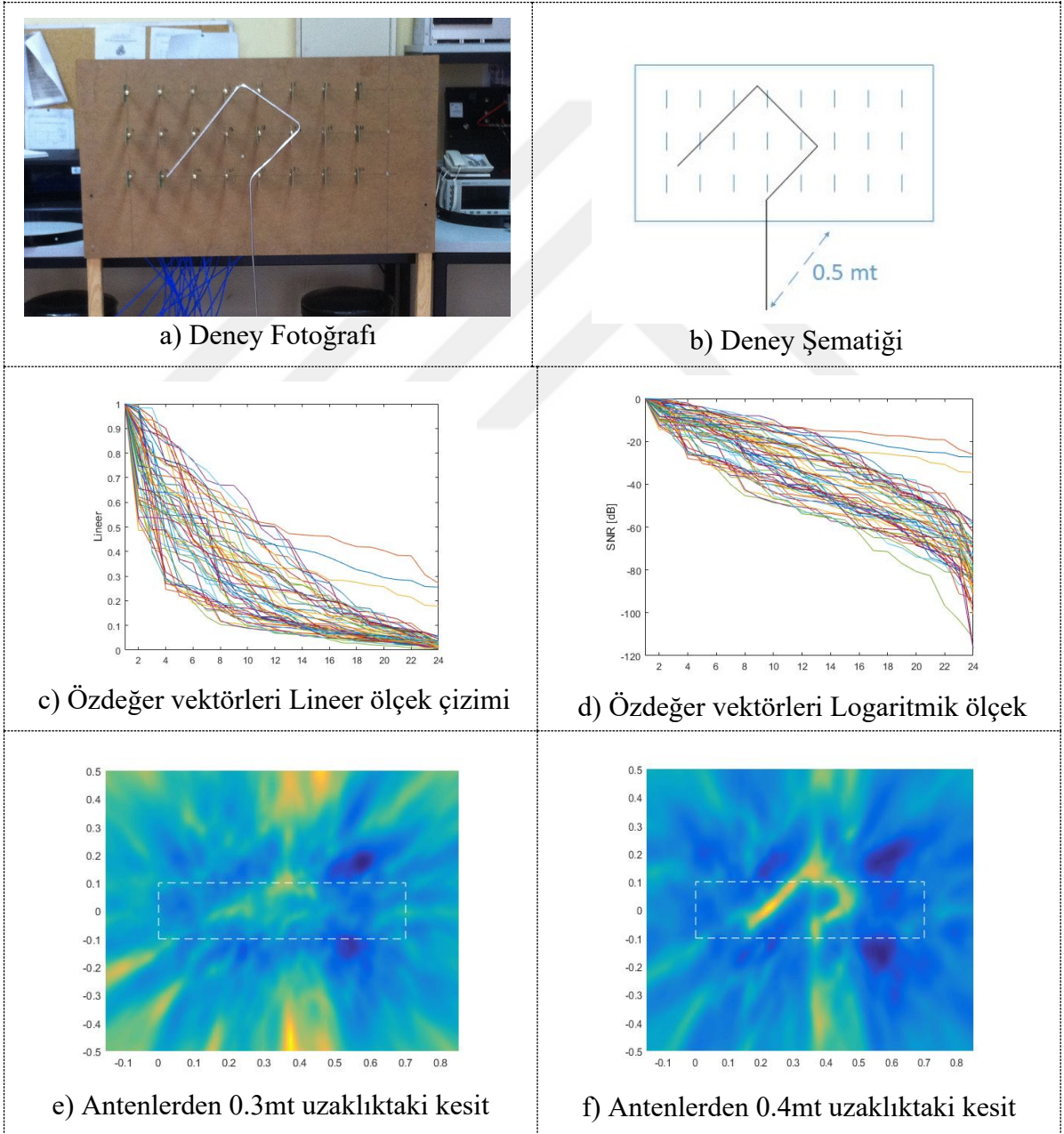
#### **2.4.2.2. MUSIC Yöntemi ile Tel Saçıcıların Şeklini Anten platformuna Çeşitli Uzaklıktaki Kesit Yüzeyindeki Görüntüleyebilme ve Şekil Belirlenmesi Ölçme ve Deneyleri**

Çalışmanın bu kısmında MUSIC algoritmasının üç boyutlu görüntü oluşturma performansı araştırılmıştır. Bu amaçla çengel şekli verilmiş tel saçıcı olarak anten platformundan 0.5 metre uzağa yerleştirilmiştir. Ölçme bir defa alınarak çoklu frekanslı 24x24 saçınım parametreleri vektör şebeke analizör cihazı ile ölçülmüştür. MUSIC



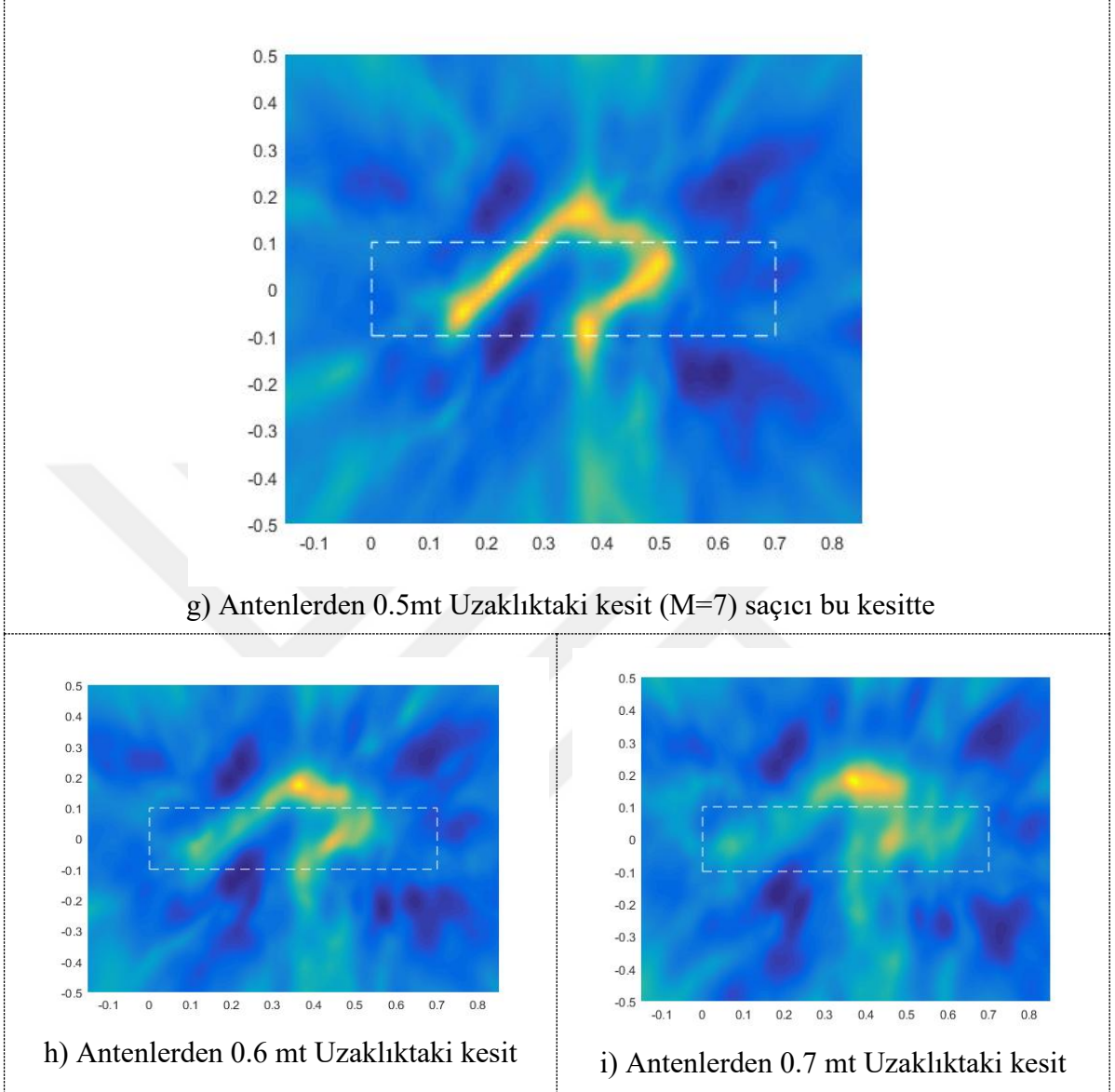
yönteminin ise şekil 60a de gösterilmiş olan  $\Omega$  çözüm uzayında  $z=0.3$ metreden başlayarak,  $z=0.7$  Metreye kadar  $0.1\text{mt}$  aralıklar ile 5 kesit için yöntemin görüntü oluşturması sağlanmıştır. Şekil Kar5 de deney düzeneği fotoğrafı, ölçme şematığı, öz vektörler ve 5 ayrı kesit için 5 ayrı görüntü gösterilmiştir.

Bu kısımda yapılan deney, sonuçlarının karşılaştırılabilmesi amacı ile bu çalışmanın alt başlık 3.3.2.2 de gösterilmiş olan ve sonuçları şekil 40 da verilmiş olan benzetim problemi ile uyumlu olacak bir geometride planlanmıştır.



Şekil 67. Üç boyutlu anten platformuna çeşitli uzaklıktaki kesitlerde görüntü oluşturma ölçme ve deneyi

Şekil 67'nin devamı



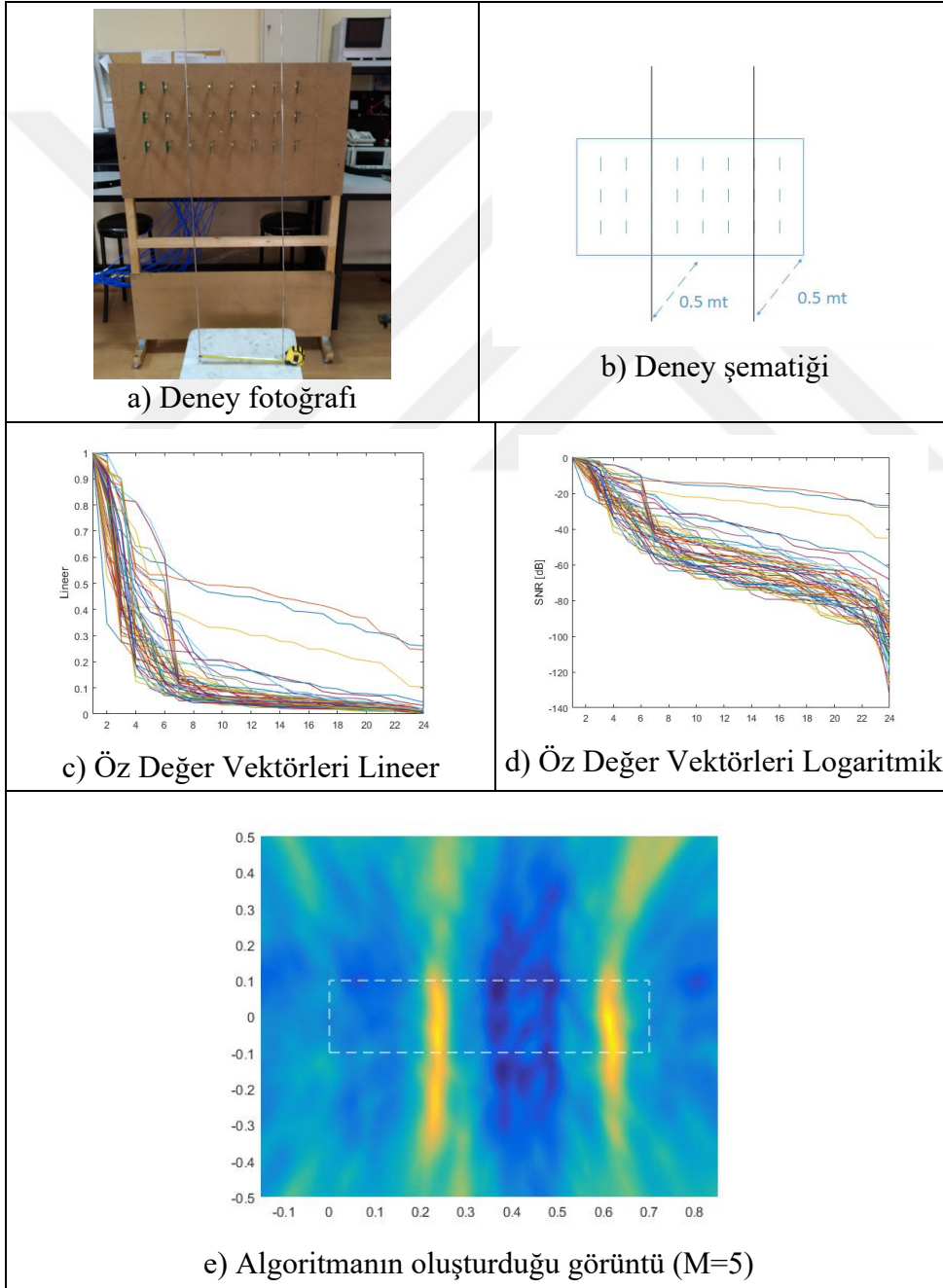
Şekil 67 de görüldüğü üzere yöntem anten platformundan çeşitli uzaklıklardaki kesitte görüntüleme yapmak üzere çalıştırılmıştır. Şekil 67g de gösterildiği gibi, saçıcının bulunduğu kesitte saçıcı şekli oldukça net olarak görülmektedir. Görüntüleme kesiti saçıcının bulunduğu düzlemden uzaklaştıkça, saçıcının şekli bulanıklaştığı şekil 67 alt şekillerinde görülmektedir.

Şekil 67 de gösterilmiş olan sonuçların, Benzer benzetim sonuçlarının gösterildiği Şekil 40 ile örtüştüğü görülmektedir.

### 2.4.2.3. MUSIC Yöntemi ile Birden Fazla Tel Saçıcı Cismini 3 Boyutlu Ayırt Edebilme, Görüntüleyebilme ve Şekillerinin Belirlenmesi Ölçme ve Deneyleri

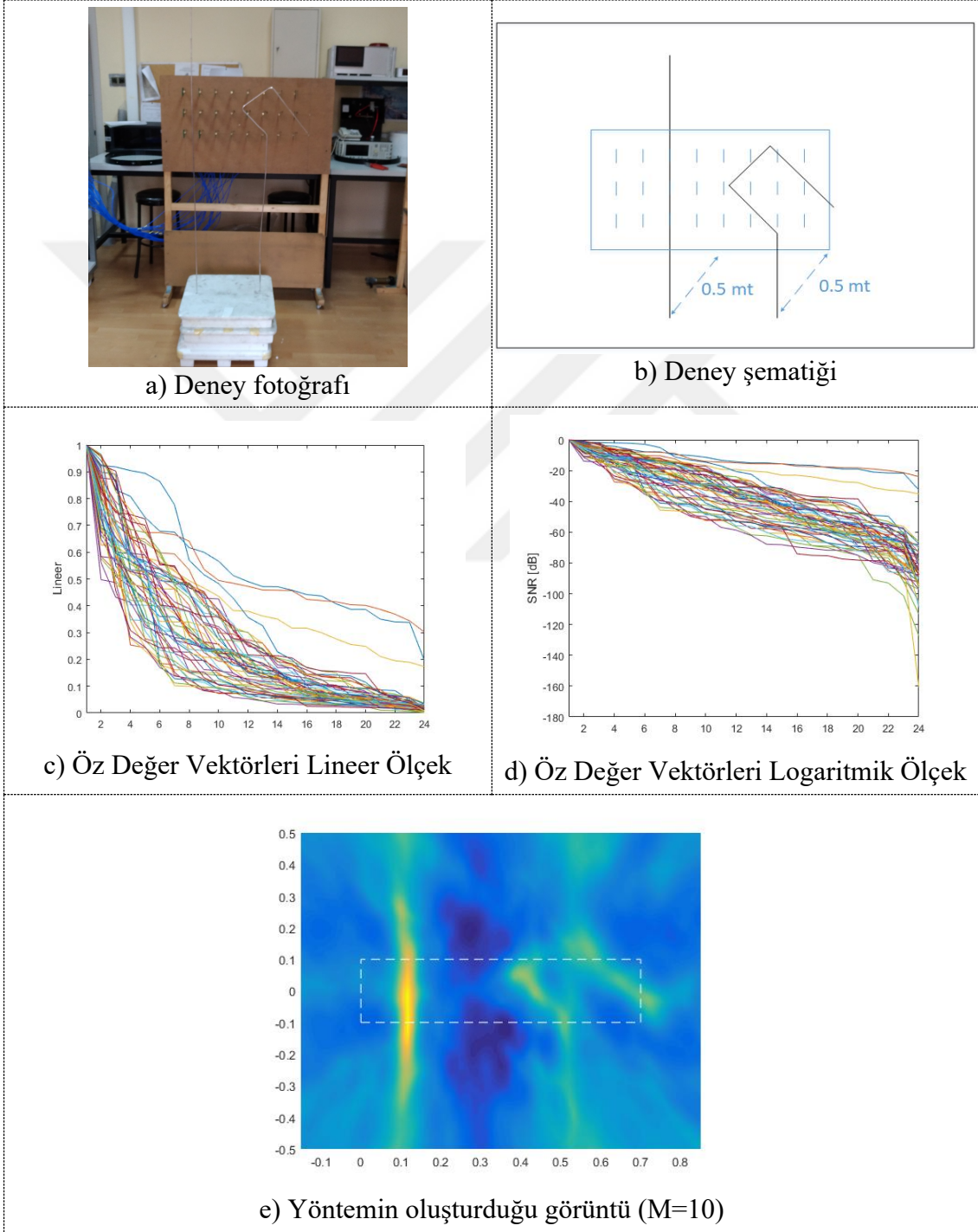
Çalışmanın bu kısmında MUSIC yönteminin üç boyutlu görüntüleme performansının yanı sıra birden fazla saçıcıyı ayırt edebilme özelliği deneysel ölçmelerle araştırılmıştır.

İlk deneyde iki adet düz tel saçıcı kullanılmıştır. Bu iki saçıcı da anten platformundan 0.5 metre uzağa yerleştirilmiştir. Şekil 68 de ölçüm düzeneği ve sonuçlar gösterilmiştir.



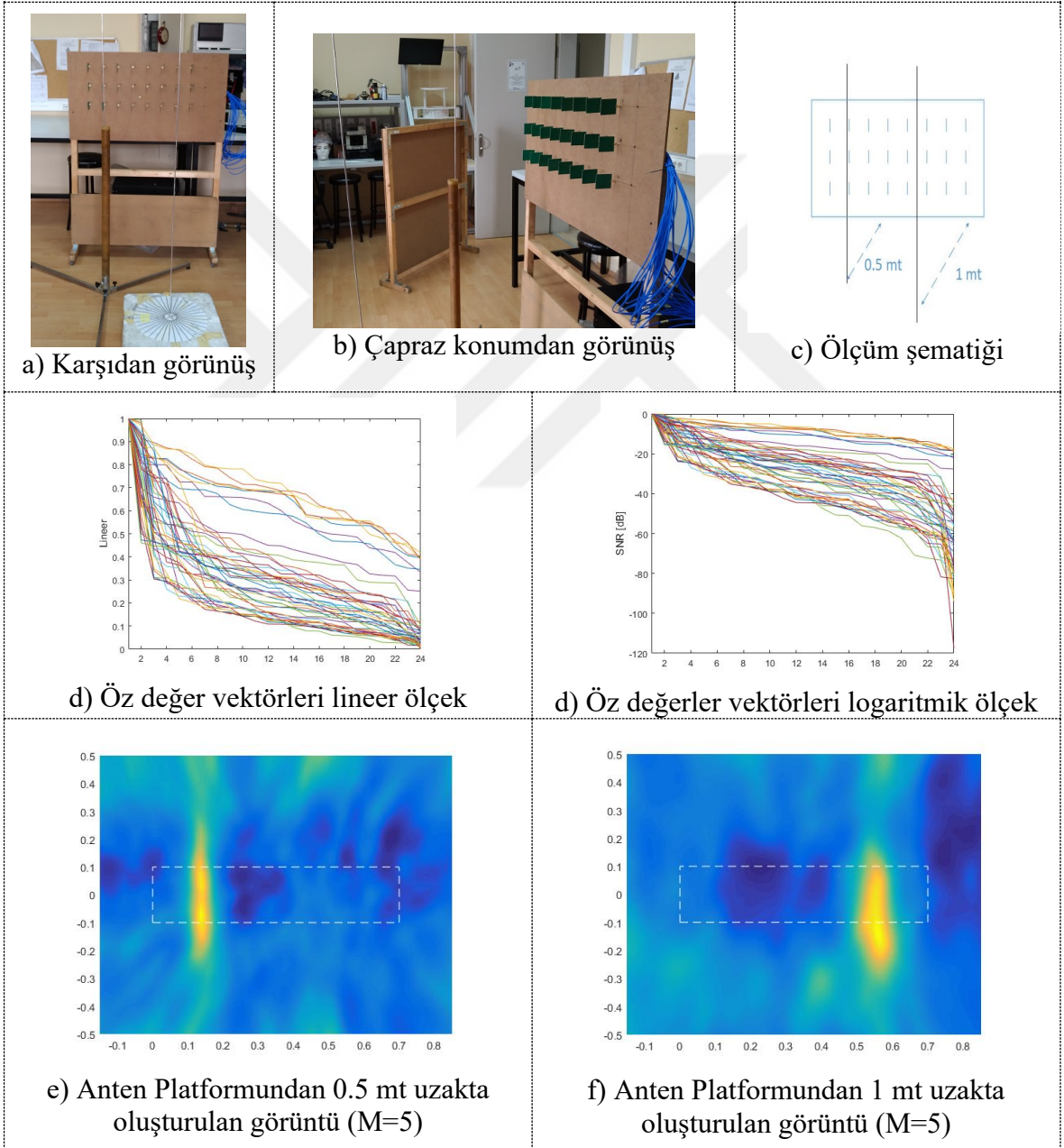
Şekil 68. Anten platformundan eşit uzaklıkta iki düz tel saçıcı

Şekil 68 de görüldüğü üzere yöntem iki ayrı tel saçıcıyı başarılı bir şekilde görüntülemiştir. Bir sonraki ölçümde ise ölçüm bir düz saçıcı bir adet ise çengel şekli verilmiş saçıcı kullanılarak tekrarlanmıştır. Ölçüm düzeneği, deney fotoğrafı ve sonuçları Şekil 69 da verilmiştir.



Şekil 69. Anten platformundan eşit uzaklıkta yerleştirilmiş düz tel ve çengel şekli verilmiş tel saçıcı

Şekil 69 da görüldüğü üzere yöntem iki farklı şekle sahip saçıcıyı ayırt edebilmiş ve saçıcı şekillerini göstermiştir. Şekil 69 da gösterilmiş olan sonuçlar, Sonuçları Şekil 42 de gösterilmiş olan benzer geometrinin benzetim sonuçları ile örtüştüğü görülmektedir. Benzetim ve Deneysel ortamının sinyal gürültü oranına yönelik farklılık Şekil 69 (ölçek 20dB) ve Şekil 42 (ölçek 100dB) görülmektedir. Benzetim sisteminin sinyal gürültü oranının deney ortamına göre daha düşük olduğu görülmektedir.



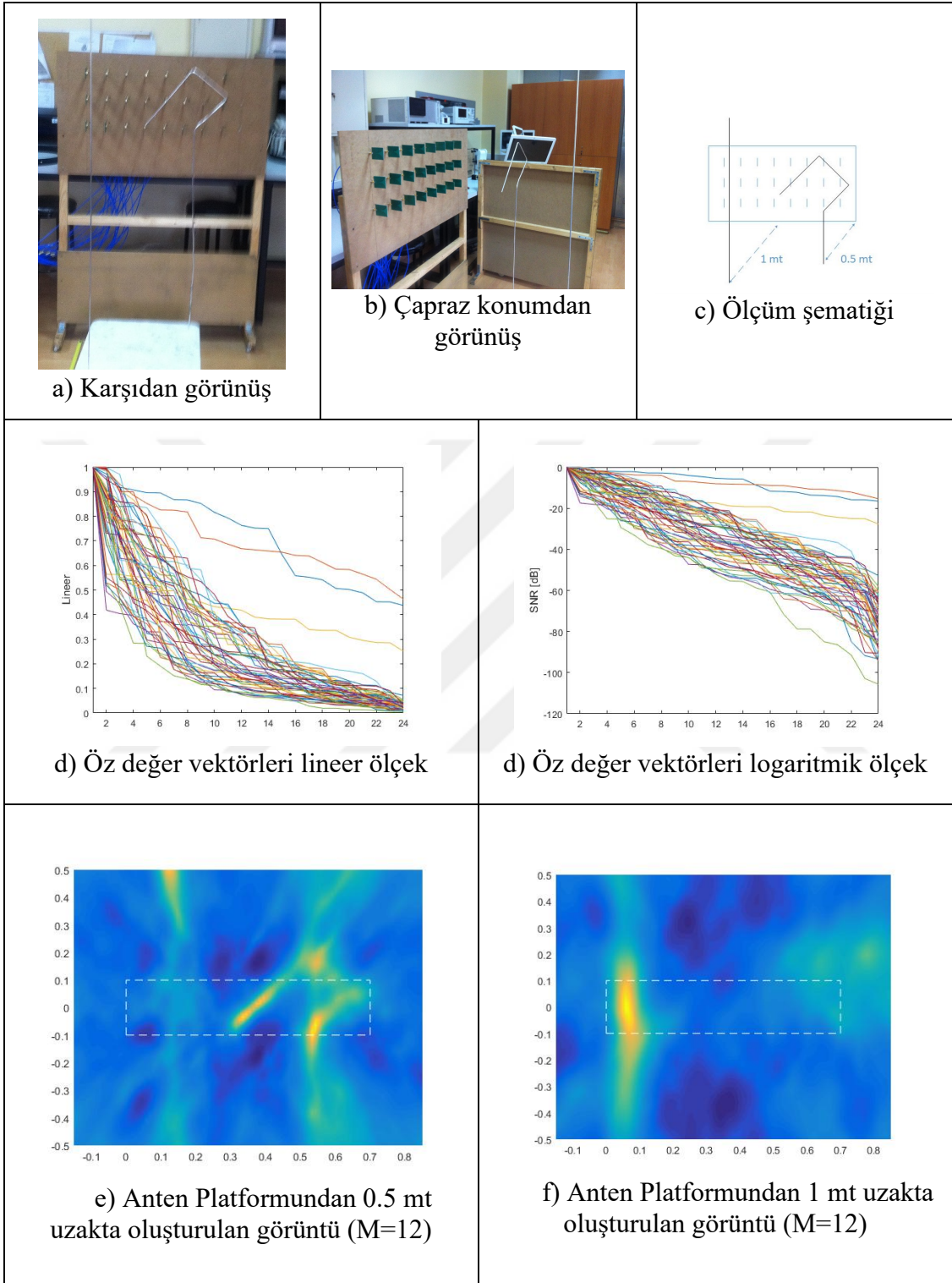
Şekil 70. Anten Platformuna farklı uzaklıkta yerleştirilmiş iki ayrı saçıcı ölçme ve deneyi

Bir sonraki deney olarak, anten platformuna farklı uzaklıkta yerleştirilmiş birden fazla saçıcı cisim ile ölçme yapılmıştır. Bu deney yöntemin birden fazla saçıcı cismin 3 boyutlu olarak ayırt edebilme performansını gösterebilmek için seçilmiştir. Deney düzeneği fotoğrafları, şematik gösterimi ve görüntüleme sonuçları Şekil 70 de verilmiştir.

Şekil 70e de yöntem anten platformundan 0.5 metre uzakta bulunan düzlemsel kesit te görüntü oluşturacak şekilde çalıştırılmıştır. Benzer şekilde 70f de ise 1mt uzaklıkta ki yüzeysel kesitte çalıştırılmıştır. Şekil 70e ve 70f de yöntemin iki ayrı saçıcıyı bulunduğu koordinatlarda görüntülediği gösterilmiştir.

Bir sonraki deney olarak, anten platformuna farklı uzaklıkta yerleştirilmiş birden fazla ve farklı şekle sahip saçıcı cisim ile ölçme yapılmıştır. Bu deneyin sonuçları Şekil 43 de gösterilmiş olan benzer geometriye sahip benzetim çalışması ile karşılaştırılabilir. Şekil 71 da deney fotoğrafları, şematiği ve yöntem tarafından oluşturulan saçıcı şekil sonuçları gösterilmiştir.

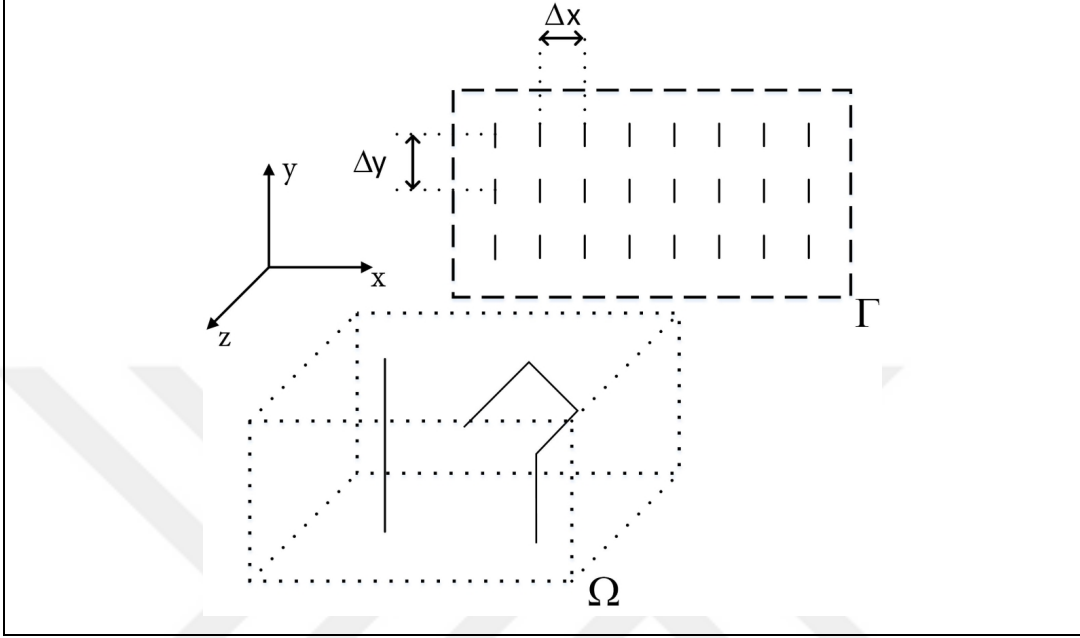
Şekil 71e de yöntem anten platformundan 0.5 metre uzakta bulunan düzlemsel kesit te görüntü oluşturacak şekilde çalıştırılmıştır. Benzer olarak şekilde 71f de ise 1mt uzaklıkta ki yüzeysel kesitte çalıştırılmıştır. 71e ve 71f de yöntemin iki ayrı saçıcıyı bulunduğu koordinatlarda görüntülediği ve şekillerini de doğru şekilde oluşturulduğu görülmüştür. Şekil 71 de gösterilen sonuçlar, Şekil 43 gösterilen benzer geometrinin benzetim sonuçları ile örtüşmektedir.



Şekil 71. Anten Platformuna farklı uzaklıkta yerleştirilmiş farklı iki şekle sahip saçıcı ölçümleri

#### 2.4.2.4. Anten Platform Düzlemine Dik Düzlemde Yapılan Görüntüleme

Kartezyen koordinat sistemi ile örtüşen ölçmelerin yapıldığı, deney şematığı ve görüntüleme yapılan  $\Omega$  ölçme uzayı şekil 72 da gösterilmiştir.



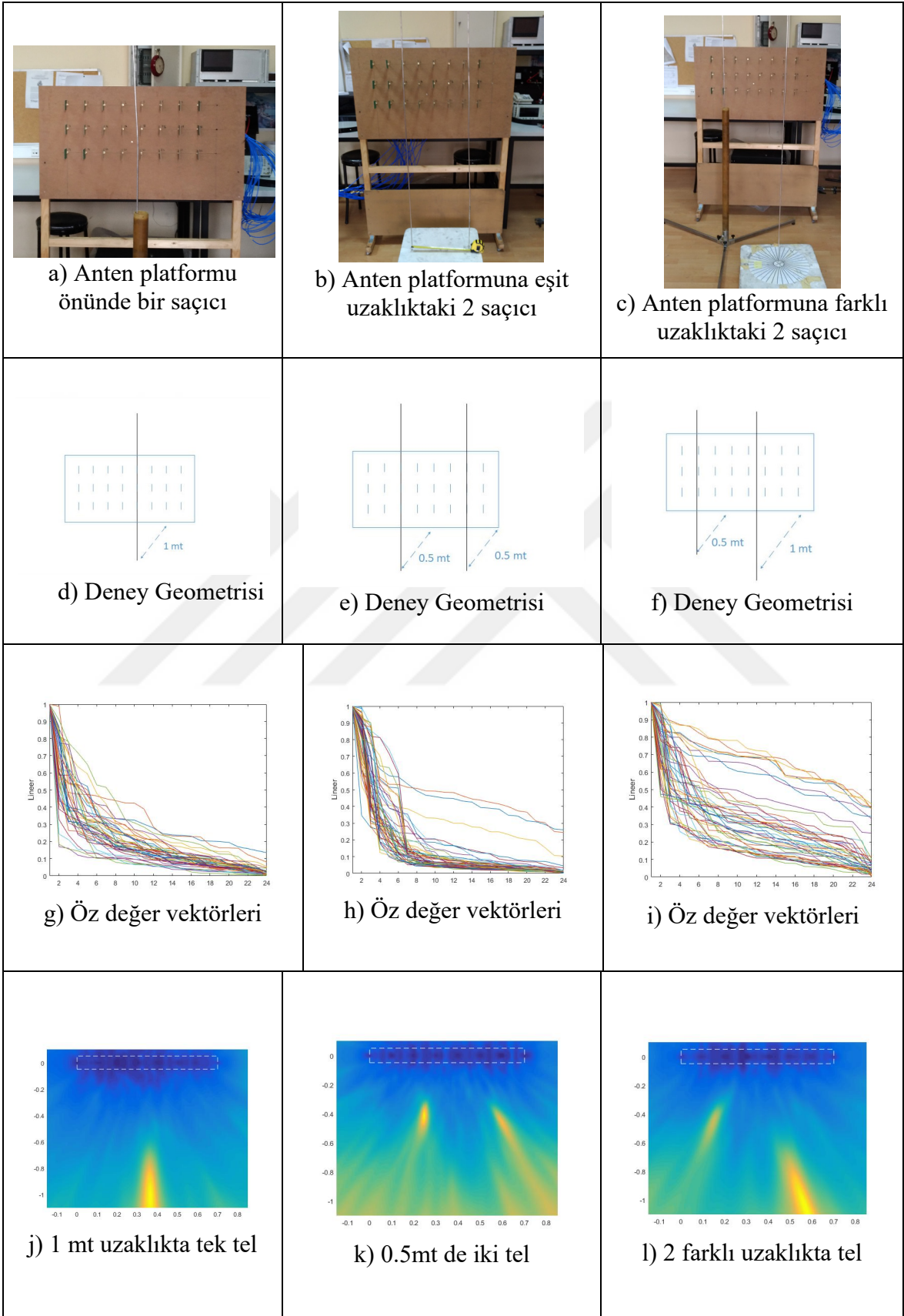
Şekil 72. Anten Düzlemine dik görüntüleme için koordinat referansları ve problem geometrisi

3.4.2 alt başlığı içerisinde bu alt başlığa kadar olan tüm görüntülemeler şekil 72 da görülen  $\Omega$  ölçme uzayında gösterilmiş olan x-y düzleminde seçilen çeşitli kesitlerde gösterilmiştir. Bu kısımda ise, yöntem x-z düzleminde çalıştırılarak, anten platformu önünde bulunan saçıcıların anten platformuna olan uzaklığının yöntem tarafından bulunup bulunamadığı kontrol incelenecektir.

Şekil 73 de bu kısma yapılan 3 ölçme için deney fotoğrafları, geometrisi, özdeğer vektörleri ve MUSIC ile oluşturulmuş görüntüler gösterilmiştir. Şekil 73 deki görüntüler  $\Omega$  ölçme uzayında gösterilmiş olan x-z düzleminde oluşturulmuş ve düzlemin y kesiti ise  $y=0$  olarak alınmıştır. Görüntülerin üzerine anten platformunun olduğu yerler işaretlenmiştir.

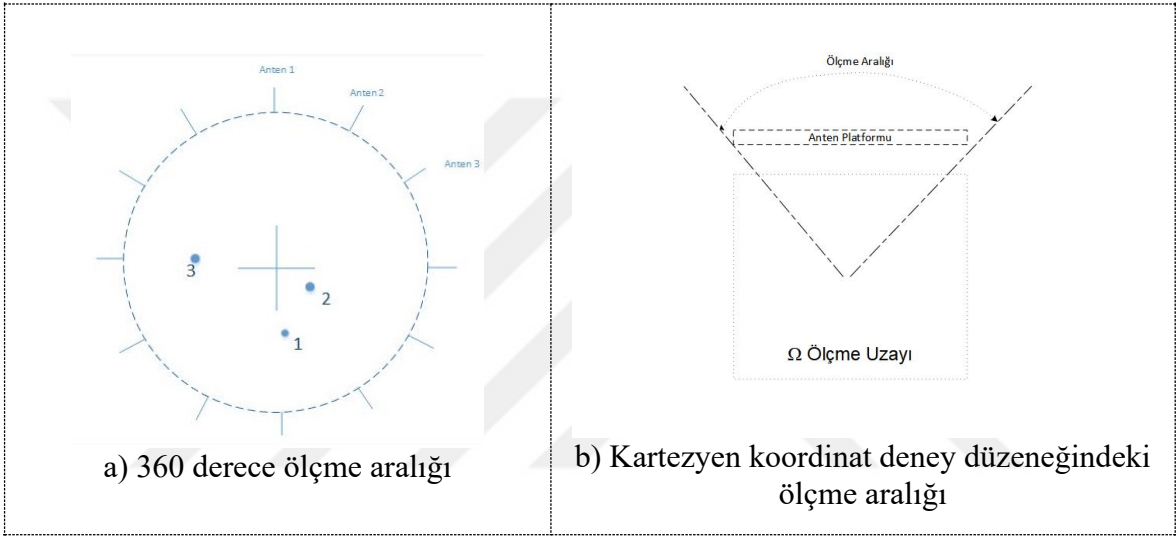
Şekil 73j, 73k ve 73l de ki görüntüler incelendiğinde, yöntemin saçıcıların bulunduğu noktanın anten platformuna yakın olan noktayı bulduğu, saçıcıları nokta halinde değil levha şeklinde görüntülediği görülmüştür. Bu etkinin sebebi, antenlerin saçıcıların çevresindeki 360 derecelik, tam ölçme aralığına yerleştirilmemiş olmasıdır. Ölçme aralığının (aperture) kısıtlı olduğu için bu beklenen bir durumdur.





Şekil 73. Anten Platformuna dik düzlemde görüntüleme

3.4.1 alt başlığı altında şekil 51 den şekil 58 e kadar olan şekillerde gösterilmiş olan silindirik koordinat sistemleri ile uyumlu ölçümlerde, ölçme uzayının tüm çevresini çevreleyen, tam ölçme aralığını kapsayan, 12 adet anten kullanılmıştır. 3.4.1 deki sonuçlarda açıkça saçıcıların koordinatlarının belirsizlik olmadan bulunduğu görülmüştür. Şekil 74 de 3.4.1 deki ve 3.4.2 deki ölçmelerde kullanılan ölçme aralığı arasındaki fark şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 74. Silindirik ve Kartezyen koordinatlara uygun ölçümler için ölçme aralığı karşılaştırması

Şekil 74a da gösterilen 3.4.1 alt başlığı altında kullanılmış olan ölçme düzeneğinde antenlerin yerleşimi 360 derecelik bir ölçme aralığı sağlamaktadır. Şekil 74b de ise  $3 \times 8 = 24$  adet antenin kullanıldığı düzenekte kullanılan ölçme aralığının çizimlerin anten platformundan uzaklığı ile değişen bir ölçme aralığına sahip olduğu gösterilmiştir. Benzer benzetim çalışmasının, ölçme aralığını (measurement aperture) farkının anlatan Şekil 45 de gösterilen şematik çizim çalışmanın bütünlüğü açısından Şekil 74 olarak tekrar gösterilmiştir. Şekil 74b den teorik olarak cisim anten platformuna yaklaştıkça ölçme Aralığı 180 dereceye yakınsamakta, cisim uzaklaştıkça ise uzaklığa bağlı olarak 180 dereceden sonsuz uzaklık için 0 dereceye doğru limit değer (asimptotic) olarak azalmaktadır.

Şekil 74 deki görüntüleme sonuçlarında, düşük ölçme aralığında yapılan ölçüm sebebi ile oluşan belirsizlik görülmektedir. Cisimler anten platformundan uzaklaştıkça, uzaklık bilgisi belirsizleşmekte ve gözlemlenen nitelik daha çok cismin anten platformuna göre olan

açısı olmaktadır. Şekil 74 de gösterilen sonuçlar, sonuçları şekil 44 gösterilen benzer geometrinin benzetim sonuçları ile örtüşmektedir.

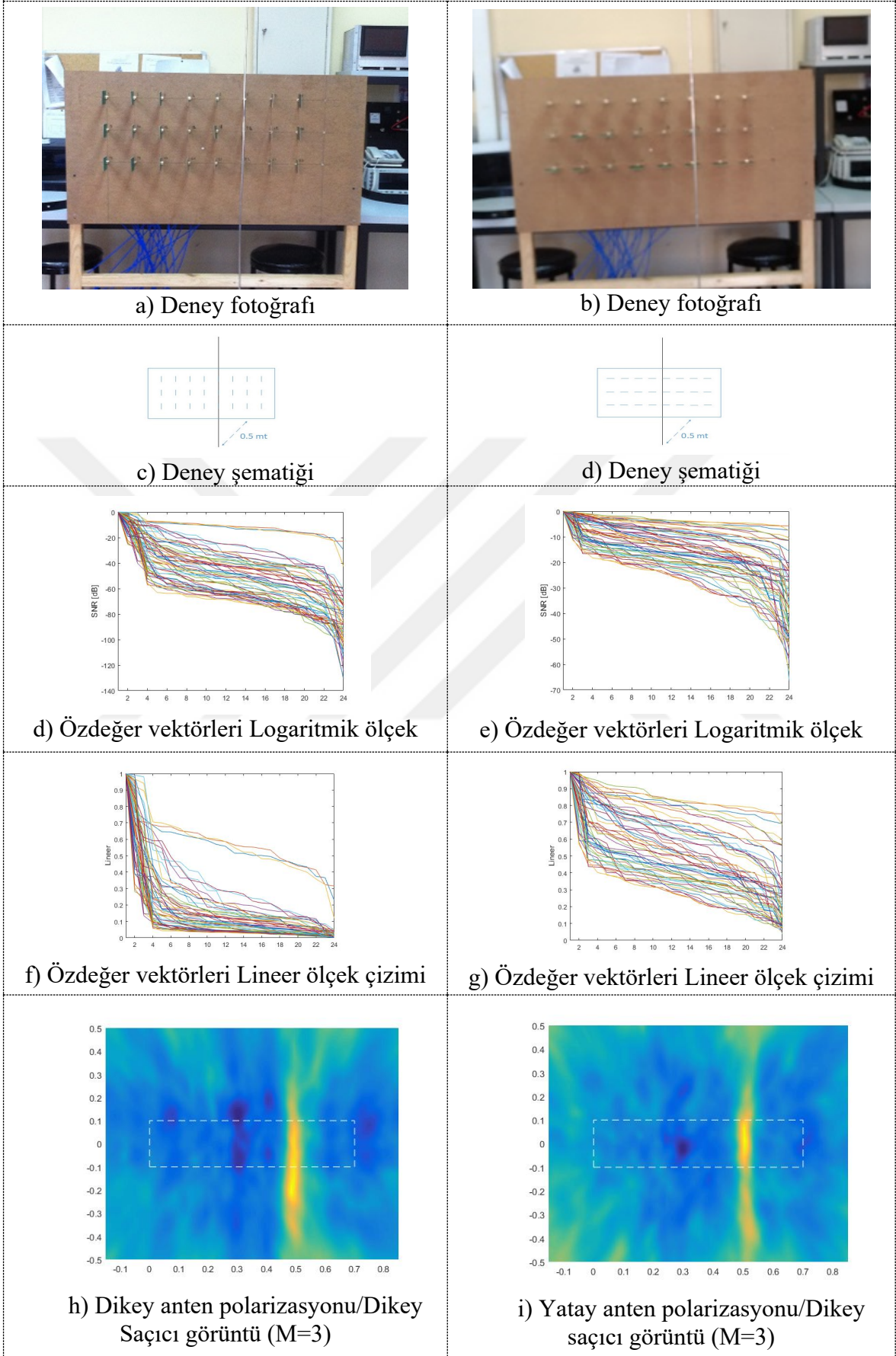
Şekil 74 deki görüntüler saçıcıların yerinin belirlenmesinde, yöntemin kısıtlı bir ölçme alanı kullanıldığında, özellikle platforma yakın olan cisimler için başarılı olduğunu göstermektedir.

#### **2.4.2.5. MUSIC Yöntemi ile Aydınlatma Elektrik Alanı Yönü ve Tel Saçıcı Doğrultusu ile Olan Polarizasyon Açısının, Saçıcı Şekil, Pozisyon ve Görüntüleme Performansına Etkisi Deney ve Ölçmeleri**

Bu kısımda çalışmanın 3.3.2.5 alt başlığında sonuçları verilen benzer benzetim çalışması ile paralel olarak, aydınlatıcı elektrik alanının yönü ile tel saçıcı ve saçıcı parçalarının yönü arasında olan polarizasyon açısının, yöntemin şekil belirlenmesine etkisi deneysel ölçmelerle gösterilmiştir.

İlk olarak, Sonuçları Şekil 46 da gösterilmiş olan benzer geometrinin benzetim sonuçları ile karşılaştırma amaç ile şekil 75a ve 75b de fotoğrafları görülen deney düzeneği kurulmuştur. Şekil 75a, 75c, 75e ve 75h Saçıcı doğrultusu ile paralel aydınlatıcı anten (dikey polarizasyon) kullanılan deneyle ilgili bilgi ve sonuçları (Dikey anten polarizasyonu/Dikey Saçıcı), Şekil 75b, 75d, 75f ve 75i ise Saçıcı doğrultusu ile dik aydınlatıcı anten kullanılan (Yatay anten polarizasyonu/Dikey Saçıcı) deney ile ilgili deney ve sonuçları göstermektedir.

Şekil 75 de aynı deney düzeneğinin hem yatay hem de dikey polarizasyon anten kullanarak yapılan ölçme sonuçları verilmiştir. Multi frekans Saçının matrisinin özdeğer vektörleri Lineer ölçek ve Logaritmik ölçekte Şekil 75d, 75e, 75f ve 75g de gösterilmiştir. Dikey polarizasyon/Dikey saçıcı Lineer ölçek çizimleri (Şekil 75f) incelendiğinde, MUSIC yöntem teorisi uyumlu şekilde 24 öz vektörden az sayıda olanın kabaca 3 âdetinin sinyal uzayını temsil ettiği görülmektedir. Yatay polarizasyon/ dikey Saçıcı deneyinde ise (şekil 75g) durumunda ise bu sayının çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumun sebebi daha öncede çeşitli noktalarda açıklandığı üzere aydınlatıcı alan polarizasyonu ile tel saçıcı şeklinin paralel olması durumunda saçıcının tek bir 2 boyutlu noktasal kaynak (3 boyutta 1 doğru olacak şekilde) olarak davranmasıdır.



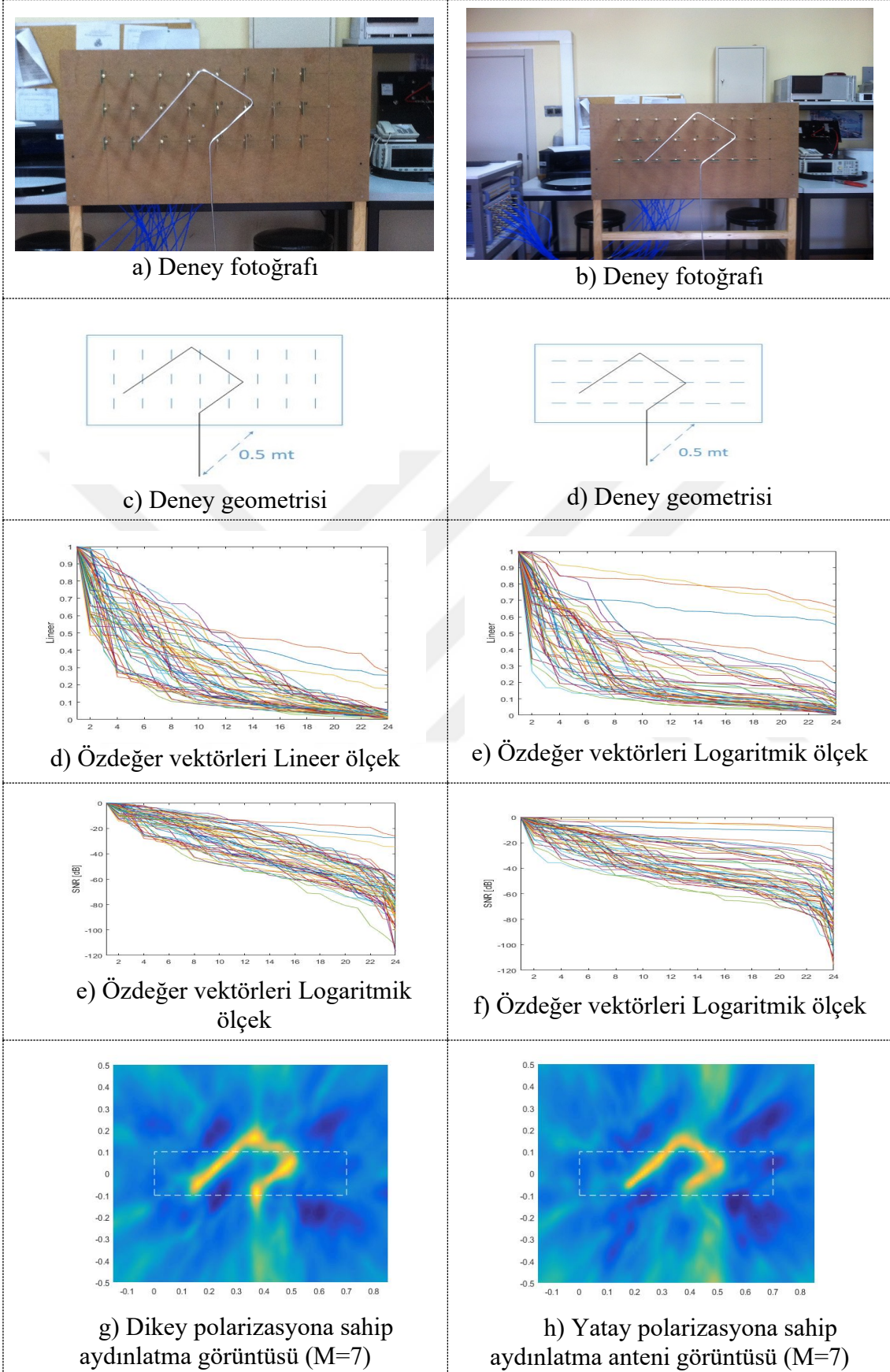
Şekil 75. Aydınlatma Anten Polarizasyonunun saçıcı görüntülenmesine etkisi

Özdeğer Logaritmik çizimlerinden (Şekil 75d (birim ölçek 20dB) ve 75e (birim ölçek 10dB)), şekil 75a deneyindeki ölçme düzeneğinin sinyal gürültü düzeyinin, şekil 75b deney düzeneğine göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Her iki durum için yöntemin oluşturduğu, görüntü Şekil 75h ve 75i de gösterilmiştir. Bu sonuç Şekil 46g ve 46h de gösterilmiş olan görüntüleme ile kıyaslandığında, deneysel ölçmenin her iki durumda da saçıcıyı görüntüleyebildiği görülmektedir. Benzetim sonuçlarında da ise yatay Anten/Dikey Saçıcı benzetim sonucunda (şekil 46h) saçıcının değil ilgili kısımda da detaylı yorumlanmış olan benzetim ortamının teorik ideal ortamdaki farklarından kaynaklanana gölgesi görüntülenmiştir. Deneysel doğrulamada, her iki durumda da görüntülenmesinin sebebi ise deney ortamının, benzetim ortamına göre teorik ideal durumdan çok daha uzak olması şeklinde açıklanabilir. Bu yorumu Şekil 46e ve 46f de çizilmiş olan Saçıcının Matrisi öz vektörleri ölçme düzeneğinin sinyal gürültü düzeyinin benzerinin Deneysel ortam için olan karşılıkları ile (Şekil 75d ve 75e) birlikte değerlendirildiğinde desteklediği görülmektedir. Sonuçları şekil 75 de verilen, ölçme ve deney ile ilgili olarak ayrıca, sinyal uzayını temsil eden öz vektör sayısındaki değişiklik MUSIC yönteminin teorisi ile uyumu olduğu sonucu çıkarılmıştır. Saçıcı polarizasyonu ile anten polarizasyonu örtüştüğü zaman, saçıcı noktasal kaynak olarak davrandığı için sinyal uzayını temsil eden öz değerlerin sayısı daha az olmakta, diğer durumda ise sinyal uzayı çok daha fazla öz değer vektörü ile kapsamaktadır.

Bir sonraki deney olarak ise, benzer geometrinin benzetim sonuçlarının Şekil 48 gösterilen, yatay veya dikey anten polarizasyonları ile birebir örtüşmeyen bir saçıcı şekli olan çengel şeklindeki saçıcı kullanılarak yapılmış deney sonuçları şekil 76 da verilmiştir. Şekil 76 da gösterilen sonuçların, şekil 48 benzer geometrinin benzetim sonuçlarının gösterildiği sonuçlar ile örtüştüğü gözlenmektedir. Benzetim sonuçları ile örtüşen bir şekilde, Şekil 76g deki oluşan görüntü incelendiğinde çengel şeklindeki saçıcının yatay polarizasyonla dik konuma sahip sap kısmının görüntülendiği, şekil 76h de ise antenler ile paralel polarizasyona sahip olduğu için görüntülenmediği açıkça görülmektedir.

Çalışmanın bu kısmındaki sonuçlardan bir kısmı yayınlanmıştır [29].



Şekil 76. Çengel şeklinde bir tel saçıcının dikey ve paralel polarizasyona sahip antenlerle oluşturulmuş görüntüleme çalışması

### **3. SONUÇLAR**

Bu çalışmada Elektromanyetik Ters saçınım problemlerinin, saçıcıların iletken tellerden oluştuğu bir alt kümesinde, tel saçıcıların varlığının tespiti ve konum, sayı ve şekillerinin belirlenmesi araştırılmış, benzetim ve deneysel ölçmelerle sonuçları gösterilmiştir. Tel saçıcı alt kümesinin seçilme motivasyonu ise teröristlerin el yapımı patlayıcıları (EYP) araziye döşenmiş teller ile tetiklemeleri ve alçaktan uçan helikopterler için uçuş tehlikesi yaratan yüksek gerilim telleri olmuştur.

Bu çalışmanın temel amaçlarından birisi, yukarıdaki paragrafta anlatılan problemlerin çözümleri için ileride yapılacak ürün geliştirme çalışmalarına temel sağlayacak, teorik altyapı, benzetim çözümleri ve deneysel ölçme ve sonuçların sağlanması şeklinde belirlenmiştir. Pratikte beklenen tel saçıcı tespit ve uyarı menzili, helikopter uygulamaları için en az 50mt, tel tuzaklamalı EYP için ise en az 20mt dir. Tel şekil ve sayı ve görüntüleme uygulaması sadece araziye döşeli tellerin kullanıldığı EYP düzenekleri için uygundur ve sistemin uzaktan kumandalı bir robot araç tarafından taşınması durumunda, ihtiyaç duyulan menzil 3mt dir.

Tel saçıcıları tespiti ve pozisyon, şekil ve sayılarının bulunması, iki ayrı yöntem olarak çalışılmıştır.

#### **3.1. Tel Saıcıların Varlığının Tespiti Çalışması**

Tel saçıcıların varlığının tespiti, aydınlatıcı elektrik alan ve saçıcının yönü ile arasında bulunan polarizasyon açısının, saçınan alanın etkisi kullanılarak, tel saçıcıların diğer saçıcılardan ayırt edilmesi yöntemi kullanılarak çalışılmıştır. Bu amaçla, elektromanyetik yansımatsız oda içerisinde, çeşitli tel saçıcılar kullanılarak, teorik altyapısı verilen polarizasyon farkını kullanarak tel saçıcıların varlığının tespiti için önerilen yöntem deneysel olarak doğrulanmıştır. Sonuçlar önerilen yöntemin tel saçıcılarının varlığının tespitine olanak sağladığını elektromanyetik yansımatsız oda içerisinde yapılan ölçme ve gösterimlerle göstermektedir.

Çalışmanın bu kısmında kullanılan donanım, laboratuvar test cihazı ve kalibrasyonlu laboratuvar antenleridir. Kullanılan elektromanyetik yansız odanın boyutları ve test donanımının sağlayabildiği RF çıkış gücü limitleri sebebi ile deney ve ölçmeler 2mt tespit menzili kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlar önerilen yöntemin teorisi ile bire bir örtüşmüş ve tel şeklindeki saçıcının varlığının tespit edilebildiği görülmüştür.

Ürün geliştirme çalışmalarında, daha yüksek RF güçlü göndermeç ve alma hassasiyet ve gürültü seviyesi hassas RF almaç ve tel saçıcı boyut ve problem geometrisine uygun tasarlanmış ölçme antenleri ile menzilin artması mümkündür. Tespit performansının hava şartlarından etkilenmesi beklenmemektedir. Ancak, ürün geliştirme aşamasında, menzil dışında, geliştirilecek ürünün tespit performansının çevre etkenlerinden az etkilenmesi ve özellikle helikopter uygulaması için ölçme hızını artırılması son olarak ürünün helikopteri uyarması ve helikopterin hızlı tepki göstermesi için oto pilot ile etkileşimin geliştirilmesinin ana iş yükünü oluşturacağı değerlendirilmiştir.

### **3.2. Tel Saçıcıların Pozisyon, Sayı ve Şekillerinin Görüntülenmesi Çalışması**

Çalışmanın bu alt kısmında, orijinalinde bir sinyal işleme yöntemi olan ancak daha sonra çeşitli yayınlarla niteliksel elektromanyetik ters görüntüleme yöntemi olarak kullanılabileceği önerilen MUSIC yöntemi derinlemesine incelenmiştir.

Yöntemin 2 boyutlu silindirik koordinatlarda uygulandığında, 360 derece ölçme genişliğinde, tel saçıcıların pozisyonunun bulunabileceğini ve 3 boyutlu Kartezyen koordinatlarda limitli ölçme açıklığı ile uygulandığında ise tel saçıcıların 3 boyutlu olarak şekil, sayı ve pozisyonlarını bulacağı bu çalışmada önerilmiştir.

Bu doğrultuda, yöntem 2 boyutlu silindirik ve 3 boyutlu Kartezyen koordinat eksenlerinde çalışacak şekilde MATLAB platformunda kodlanmıştır. Yapılacak deneysel çalışmalara temel teşkil etmek üzere öncelikli olarak seçilen benzetim platformu kullanılarak öngörülen 2 ve 3 boyutlu ölçme ve deney düzenekleri ile uyumlu benzetim ortamı hazırlanmıştır. Kurulan benzetim ortamının, ölçme ve deney düzeneğine en yakın benzetim yapabilmesi için, aydınlatıcı alan antenleri de benzetim ortamının içerisinde iletken tel parçaları kullanılarak modellenmiştir. Her iki problem geometrisi için, benzetim ortamı çoklu frekanslı Saçıcının matrisini oluşturmakta kullanılmış ve bu matris yöntemin MATLAB platformunda çalışması için girdi oluşturmuştur. Yöntem bu girdiyi kullanarak, 2 boyutlu



geometri için saçıcı cisimlerin pozisyonunu, 3 boyutlu geometri için ise, 3 boyutlu olarak pozisyon, sayı ve tel saçıcı şekillerinin oluşturulması için çalıştırılmıştır.

2 boyutlu silindirik geometriye uygun benzetim sonuçları, 360 derece tam ölçme açıklığı kullanılarak çalışılmış ve önerildiği gibi saçıcıların konumlarını başarılı olarak bulduğu gösterilmiştir. Bu sonuçlar ile MUSIC yönteminin, yayınlarda önerildiği gibi sinyal işleme yöntemi dışında elektromanyetik ters görüntüleme yöntemi olarak kullanılabileceğinin, bu çalışma kapsamında yapılan benzetim ortamı ile doğrulanmasıdır.

2 boyutlu benzetim çalışmalarında kullanılan problem geometrisi, laboratuvar test cihazları ve geniş bantlı Vivaldi antenler kullanılarak, elektromanyetik yansımaz oda içerisinde kurulmuş ve benzetim ile doğrulanmış sonuçlar deneysel olarak çalışılmıştır. Deneysel çalışmalarda benzetim çalışmaları tarafından oluşturulan çoklu frekanslı Saçının matrisi, 12 ölçme ucuna (port) sahip vektör şebeke analizörü ve Vivaldi antenler kullanılarak ölçülmüş ve ölçülen bu matris, MATLAB platformunda 2 boyutlu geometri için kodlanmış MUSIC yöntemine girdi olarak verilmiştir. MUSIC yöntemi ilgi alanı içerisinde bulunan saçıcıların 2 boyutlu pozisyonlarını benzetim sonuçları ile paralel olarak başarılı olarak görüntülemiştir.

Benzetim ortamı ve deneysel ortam arasındaki gözlemlenen en önemli fark, Çoklu Statik Etki (Multi Static Response) matrisinin saçıcıları içinde olduğu sinyal uzayını ve gürültü uzayını kapsayan özdeğer vektörlerinin büyüklükleri arasındaki göreceli fark olmuştur. Benzetim ortamında sisteme gürültü eklenmediği için, sinyal uzayını kapsayan öz değerlerin büyüklükleri ile gürültü uzayını kapsayan öz değerlerin büyüklükleri arasındaki fark olmuştur. Benzetim ortamı ve deneysel ortamın sinyal gürültü oranı olarak yorumlanabilecek bu ifade, kurulan benzetim ortamının, deneysel ortama göre çok daha az gürültü içerdiğini göstermiştir. Aradaki bu gürültü farkına rağmen MUSIC yönteminin deneysel doğrulamalarda, benzetim doğrulamalarında olduğu gibi başarılı bir şekilde saçıcı pozisyonlarını belirleyebildiği sonuçlarda gösterilmiştir.

Çalışmanın diğer kısmında, 3 boyutlu Kartezyen koordinatlar ile örtüşen problem geometrisi için, sınırlı ölçme aralığına sahip bir benzetim ve deney ortamı çalışılmıştır. Bu kapsamda, deneysel olarak ölçülebilecek bir deneysel ortam planlanmış ve ortam kurulmadan önce aynı ortamın benzeri, seçilen benzetim platformunda oluşturulmuştur. Ölçme anten paneli olarak,  $3 \times 8 = 24$  adet antenin düz bir yüzey üzerine yerleştirildiği, ölçme anten geometrisi seçilmiştir. 24 adet anten sayısı deneysel doğrulamalarda kullanılması planlanan vektör şebeke analizörü ölçme ucu sayısı düşünülerek seçilmiştir. 2 boyutlu

geometri çalışmalarına paralel olarak, benzetim ortamı ve deneysel ölçme ve doğrulama çalışmaları yapılmıştır. 3 boyutlu Kartezyen problem geometrisi çalışmasında, yöntem istenen iki boyutlu yüzey kesitlerinde görüntü oluşturabilecek şekilde MATLAB platformunda kodlanmıştır. Çalışmada sonuçları gösterilen, yöntemin çıkardığı görüntüler 2 boyutta gösterilmiştir. Ancak yöntem, Saçıcıların bulunduğu 3 boyutlu bölgede tanımlanacak, her hangi bir yüzeysel kesitte görüntü çıkarabilecek şekilde kodlanmış ve kullanılmıştır. Böylece yöntemin 3 boyutlu görüntülüne performansının doğrulanması sağlanmıştır.

3 boyutlu benzetim ve deneysel doğrulama çalışmalarında, planlama, yöntemin tel saçıcıların:

- Şeklini Görüntüleyebilme
- Anten platformuna Çeşitli uzaklıktaki kesit yüzeylerindeki Görüntüleyebilme
- Birden fazla Tel saçıcı cismi 3 boyutlu Ayırt Edebilme, Görüntüleyebilme ve Şekillerinin belirlenmesi
- Anten Platformu Düzlemine dik düzlemde yapılan Görüntüleme
- Aydınlatma Elektrik alanı yönü ve tel saçıcı doğrultusu ile olan polarizasyon açısının, Saçıcı şekil, pozisyon ve Görüntüleme

Performansının benzetim ve deneysel olarak doğrulanması yapılmıştır. Benzetim ve deneysel ortamın 2 boyutlu doğrulamasında gözlemlenen, her iki ortamın Çoklu Statik Etki (Multi Static Response) matrisinin saçıcıları içinde olduğu sinyal uzayını ve gürültü uzayını kapsayan özdeğer vektörlerinin büyüklükleri arasındaki fark 3 boyutlu ortamda da aynen gözlemlenmiştir.

Saçıcıların şeklinin görüntülenmesi benzetim ve deneysel doğrulama çalışmalarında, Benzetim ve deneysel doğrulama sonuçların paralel sonuç verdiği ve benzer şekilde yöntemin tel saçıcıların şekillerini başarılı bir şekilde belirleyebildiği görülmüştür. Benzetim ortamı sonuçları ile deneysel doğrulama sonuçlarının detaylı değerlendirmesi sırasında, MUSIC yönteminde çok önemli olan ve sinyal uzayını temsil eden özdeğer vektörleri ile gürültü uzayını temsil eden özdeğer ayısı sınır değeri olarak açıklanacak M sayısına yöntem tarafından oluşturulan görüntünün niteliksel kalitesinin davranışı olmuştur. Deneysel doğrulama durumunda M sayısına görüntü kalitesinin daha az bağlı görülmüştür. Benzetim ortamında ise M sayısının seçiminin görüntü kalitesin daha fazla değiştirmektedir. Bu

benzetim ortamının gürültü seviyesinin daha az olmasını getirdiği bir sonuç olarak değerlendirilmiştir.

Yöntemin Anten platformuna Çeşitli uzaklıktaki kesit yüzeylerindeki görüntüleyebilme performansı doğrulamasında, benzetim ortamı sonuçları ile deneysel doğrulama sonuçları paralel sonuç göstermiştir. Bu doğrulama, yöntemin anten ölçme yüzeyine paralel kesitlerde görüntü üretmeye çalışması durumunda cismin bulunduğu kesitte daha keskin bir görüntü çıkardığını, diğer kesitlerde ise görüntünün bulanıklaşıp belirsizleştiğini göstermektedir.

Yöntemin bir sonraki performans gösterimi, Birden fazla Tel saçıcı cisim 3 boyutlu Ayırt Edebilme, Görüntüleyebilme ve Şekillerinin belirlenmesi şeklinde çalışılmıştır. Sonuçlar benzetim ve deneysel doğrulama çalışmalarında paralel çıktığı görülmüştür. Yöntem anten platformundan çeşitli uzaklıktaki birden fazla saçıcıyı 3 boyutlu olarak başarılı bir şekilde ayırt edebilmiş pozisyon ve şekillerini belirleyebilmiştir.

Yöntemin 3 boyutlu görüntü üretebilme performansını, diğer yüzeylerde de başarabildiğini gösterilmesi amacı ile Anten Platformu Düzlemine dik düzlemde yapılan Görüntüleme doğrulamaları yapılmıştır. Bu kısımda yöntem anten platformuna dik bir düzlemde görüntü oluşturacak şekilde çalıştırılmış ve yöntemin 2 boyutlu silindirik koordinat eksenini çalışmasında olduğu gibi saçıcıların pozisyonunun görüntüleme performansı gösterilmiştir. Benzetim ve deneysel doğrulama çalışmaları paralel sonuçlar vermiştir. Bu kısımda gözlenen en önemli sonuç, sınırlı ölçme aralığı kullanıldığı için yansıtıcı cisimlerin anten platformundan uzaklaştıkça efektif ölçme aralığı azaldığı için, pozisyon belirsizliklerini arttığı ve saçıcı cismin pozisyonunu açısal olarak belirlemeye devam ettiği ancak anten platformuna uzaklığındaki belirsizliğin arttığı gözlemlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında yöntemin, Aydınlatma Elektrik alanı yönü ve tel saçıcı doğrultusu ile olan polarizasyon açısının, Saçıcı şekil, pozisyon ve Görüntüleme performansına etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmanın seçilme sebebi, tel saçıcıların varlığının tespiti için çalışmanın ilk kısmında önerilen polarizasyon etkisi kullanılmasının, MUSIC yöntemi ile görüntüleme çalışmaları ile doğrulanmasıdır. Bu amaçla benzetim ve deneysel ölçme çalışmalarında anten platformuna diğer çalışmalarda dikey olarak yerleştirilmiş olan antenlerin polarizasyonu yataya çevrilerek benzer benzetim ve ölçme yapılmıştır. Benzetim çalışma sonuçları öngörülen sonuçları net bir şekilde göstermiştir. Deneysel ölçme ve doğrulamalar ise benzetimsel sonuçlara karşılaştırıldığında benzer sonuçlar göstermesine rağmen, polarizasyon etkisinin daha az belirgin görüldüğü şeklinde sonuçlanmıştır. Bu

benzetimsel platformun teorik ideale daha yakın ortam oluşturması, deneysel ortamın ise gerçek antenlerin yerleşiminin tam mükemmel yatay polarizasyon olamaması, yansıtıcı cisimlerin pozisyonlamasının tam yatay polarizasyona uygun yerleştirilememiş olması sebepleri ile açıklanmıştır. Ancak görüntülemenin en uygun olduğu önerilen dikey anten / dikey saçıcı ve karışık Şekilli saçıcı kullanıldığı durumda, benzetim ve deneysel sonuçlar paralel sonuçlar göstermiştir.



#### 4. ÖNERİLER

Bu çalışma tabip edecek ürün geliştirme çalışmalarına teorik, benzetimsel ve deneysel doğrulama olarak bir alt yapı olacak şekilde planlanmış ve çalışılmıştır.

Çalışmanın tel saçıcı tespit sistemi ile ilgili ürün geliştirme çalışmalarında aşağıdaki noktaların dikkate alınması önerilebilir.

- Menzil arttırmaya yönelik olarak aydınlatma çıkış gücünün artırılması ve daha düşük gürültülü, yüksek hassasiyetli alma RF devresi tasarımı
- Problem geometrisi ve tel saçıcıların uzunluğuna dikkat edilerek, bu amaçla özel anten tasarlanması
- Anten tasarımı yapılırken alma / gönderme izolasyon değeri düşük anten tasarımı
- Simetrik anten tasarımı kullanılarak dikey ve yatay polarizasyon izolasyon değerlerinin yakın anten sistemi tasarımı
- Elektronik polarizasyon anahtarlama opsiyonlarının değerlendirilmesi
- Anten tasarımı yapılırken, her iki hedef uygulamada da polarizasyon yenerlerinden biri ile paralel diğeri ile dik olacağını düşünülerek, bu etkini nasıl bir kalibrasyon prosedürü ile ortadan kaldırılacağını çalışılması.
- Helikopter uygulaması için yüksek ölçme hızı önemli olduğu için ölçme ayarlarının, ölçme hızını arttıracak şekilde optimize edilmesi
- Helikopterin uygulamasında yeterince hızlı olarak, pilot refleksinden bağımsız olarak tepki verilebilmesi açısından, oto pilot ile haberleşecek uygun bir arayüz bulunması

Çalışmanın tel saçıcıların konum, şekil ve görüntülemesi sistemi ile ilgili ürün geliştirme çalışmalarında aşağıdaki noktaların dikkate alınması önerilebilir

- Vektör Şebeke analizörü kullanılarak yapılan saçınım matrisi ölçmelerinin daha yüksek güç ve daha düşük gürültülü iyi almaç hassasiyetli yapılabilmesi için test cihazı yerine özel tasarlanmış donanım ile gerçekleştirilmesi
- Antenlerin saçıcı uzunlukları doğrultusunda, optimize edilerek tasarlanması

- Anten ölçme aralığının arttırılması için sistem hareket ederken, adım adım ölçme yapılması ve önceki ölçümlerin sonraki ölçmelerle birleştirilerek, anten platformu ölçme aralığını sentetik olarak genişletilmesi
- Uzaktan kumandalı robot araç ile kullanım durumunda, olası bir patlamanın robot araca vereceği maddi zararı azaltmak için robot araca sadece anten sisteminin yerleştirilmesi ve pahalı diğer ekipmanın patlamadan etkilenmemesi için ölçme donanımının araçtan uzakta konuşlandırılması



## 5. KAYNAKLAR

1. Calconi, F., Colton, D. ve Monk, P., 2011. The linear sampling method in inverse electromagnetic scattering, SIAM, 2011.
2. Colton, D. ve Kress, R., Inverse Acoustic and Electromagnetic Scattering Theory. Springer-Verlag, Berlin, 1998.
3. Kirsch, A. ve Colton, A., 1996. A simple method for solving inverse scattering problems in the resonance region. IOP Science Inverse Problems, 12,4, (1989).
4. Harrington, R., Time-Harmonic Electromagnetic Fields, IEEE Press., Piscataway, NJ, 2001.
5. Balanis, C., 1989. Advanced Engineering Electromagnetics, John Wiley & Sons, New York, 1989.
6. Devaney, A. J., Current research topics in diffraction tomography, in Inverse Problems in Scattering and Imaging, Adam Hilger, Bristol, 1992.
7. Bertero M. ve Boccacci, P., Introduction to Inverse Problems in Imaging, IOP Publishing, Bristol, 1998.
8. Simonetti, F., Huang, L., Duric N. ve Rama, O. Imaging beyond the Born approximation: An experimental investigation with an ultrasonic ring array, Physical Rev., cilt E, (2007), 76-78.
9. Chew, I. W. ve Wang, Y., Reconstruction of two-dimensional permittivity distribution using the distorted Born iterative method, IEEE Trans. Med. Imaging., no. 9, (1990), 47-58.
10. Colton, D., Piana, M. ve Potthast, R., A simple method using Morozov's discrepancy principle for solving the inverse scattering problem, IOP Science Inverse Problems, 13, 6, (1997), 1477- 1493.
11. Arens, T., Why linear sampling works, IOP Science Inverse Problems, 20, 1, (2004), 163-173.
12. Kirsch, A. ve Grinberg, N., The Factorization Method for Inverse Problems, Clarendon Press, Oxford, 2008.
13. Colton, D., Giebermann, K. ve Monk, P., A regularized sampling method for solving three-dimensional inverse scattering problems, SIAM Journal on Scientific Computing, 21, 6,(2000), 2316-2330.
14. Li, J., Liu, H. ve Zou, J., Multilevel linear sampling method for inverse scattering problems. SIAM Journal on Scientific Computing, 30, 3, (2008), 1228–1250.
15. Li, J., Liu, H. ve Zou, J., Strengthened linear sampling method with a reference ball. SIAM Journal on Scientific Computing, 31, 6, (2009), 4013-4040.
16. Brignone, M. B. G., Aramini, R., Pastorino, M. ve Piana, M., A fully no-sampling formulation of the linear sampling method for three-dimensional inverse electromagnetic scattering problems., IOP Science Inverse Problems, 25, 1, (2009)

17. Kirsch, A., *An Introduction to the Mathematical Theory of Inverse Problems*. Springer, New York, 1996.
18. Kirsch, A., Characterization of the shape of a scattering obstacle using the spectral data of the far field operator, *IOP Science Inverse Problems*, 14, (1981), 489–1512.
19. Therrien, C. W., *Discrete Random Signals and Statistical Signal Processing*, Prentice Hall, Englewood Cliffs NJ, 1992.
20. Devaney, A. J., *Super-Resolution Processing of Multi-Static Data Using Time Reversal and MUSIC*.: Northeastern Univ, Boston, 2000.
21. Ciunzio, D. R. a. S. R.,. Performance Analysis of Time-Reversal MUSIC, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 10, 63, (2015), 2650–2662.
22. Cheney, M.. The Linear Sampling Method and the MUSIC Algorithm. *IOP Science Inverse Problems*, 17, 4, (2001), 591-595.
23. Kurtoglu, I. ve Cavdar, I., Electromagnetic Imaging of Discrete Wire Scatterers via MUSIC Algorithm: Preliminary Experimental Results. International Conference on Digital Information Processing and Communications, Trabzon, 2019, Bildiriler Kitabı, 5 - 7.
24. Devaney, A. J., Time reversal imaging of obscured targets from multistatic data, *IEEE Antennas and Propagation*, 53, 5, (2005), 1600-1610.
25. Fazli, R., Nakhkash, M. & Heidari, A., Alleviating the Practical Restrictions for MUSIC Algorithm in Actual Microwave Imaging Systems: Experimental Assessment,. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 6, 62, (2014), 3108-3118.
26. Hossain, M. & Mohan, A., Cancer Detection in Highly Dense Breasts Using Coherently Focused Time-Reversal Microwave Imaging, *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 3, 4, (2017), 928–939.
27. Yoon, Y. & Amin, M., High-Resolution Through-the-Wall Radar Imaging Using BeamSpace MUSIC, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 6, 56, (2008), 1763–1774.
28. Zhang, S., Zhu, Y. & Kuang, G., Imaging of Downward-Looking Linear Array Three-Dimensional SAR Based on FFT-MUSIC, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 4, 12, (2015), 885-889.
29. Kurtoglu, I., Cayoren, M. & Cavdar, I., Microwave Imaging of Electrical Wires With MUSIC Algorithm, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 16, 5, (2019), 707-711.
30. Abbak, M., Akinci, M., Çayören, M. & Akduman, I., Experimental microwave imaging with a novel corrugated Vivaldi antenna, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 65, 6, (2017), 1431-1436.
31. Devaney, A. J., *Super-Resolution Processing of Multi-Static Data Using Time Reversal and MUSIC*, Northeastern Univ, Boston, 2000.
32. Chen, X. ve Agarwal, K., MUSIC Algorithm for Two-Dimensional Inverse Problems With Special Characteristics of Cylinders, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 6, 56, (2008), 1808-1812.



33. Kirsch, A., The MUSIC-algorithm and the factorization method in inverse scattering theory for inhomogeneous media. Inverse Problems, 4, 18, (2002), 1025-1040.
34. Vasquez, J. A. T., Vipiana, F. ve G., D., Experimental results on the use of the MUSIC algorithm for early breast cancer detection, International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, 2015, Italy, Turin, 1084-1085.
35. Abubakar, A. & Van Den Berg, P., Iterative forward and inverse algorithms based on domain integral equations for three-dimensional electric magnetic objects, Journal of Computational Physics, 1, 195, (2004), 236-262.
36. Biegler, L. T., Coleman, T. F., ve Santosa, F., Large-Scale Optimization and Applications Part I: Optimization in Inverse Problems and Design, Springer, New York, 1997.
37. Catapano, I., Crocco, L. & Isernia, T., On simple methods for shape reconstruction of unknown scatterers, IEEE Trans. Antennas Propagat, 55, 5, (2007), 1431–1436.
38. Colton, D. ve Kress, R., Inverse Acoustic and Electromagnetic Scattering Theory. Springer-Verlag, Berlin, 2009.
39. Colton, D., Coyle, J. & Monk, P., Recent developments in inverse acoustic scattering theory, SIAM Review, 42, (2000), 369–414.
40. Hohage, T., Fast numerical solution of the electromagnetic medium scattering problem and applications to the inverse problem, Journal of Computational Physics, 214, 1, (2006), 224-238.
41. Kleinman, R. ve Van Den Berg, P., A modified gradient method for two dimensional problems in tomography, Journal of Computational and Applied Mathematics, 42, 1, (1992), 17-35.
42. Kress, R. ve Rundell, W., Inverse scattering for shape and impedance, IOP Science Inverse Problems, 17, 4, (2001), 1075–1785.
43. Luke, D., Multifrequency inverse obstacle scattering, The point source method and generalized filtered backprojection, Mathematics and Computers in Simulation, 66, 4 -5, (2004), 297-314.
44. Potthas, R., Fréchet differentiability of boundary integral operators in inverse acoustic scattering, IOP Science Inverse Problems, 10, 2, (1994), 431- 447.
45. Agarwal, K. ve Chen, X., Applicability of MUSIC-Type Imaging in Two-Dimensional Electromagnetic Inverse Problems, IEEE Transactions on Antennas and Propagation,, 10, 6, (2008), 3217–3223.
46. Dorn, O., Bertete, A. H., Berryman, J. ve Papanicolaou, G., A nonlinear inversion method for 3D electromagnetic imaging using adjoint fields, IOP Science Inverse Problems, 15, (1999) 1523 – 1558.
47. Tabbara, W., Diffraction tomography: Contributions to the analysis of some applications in microwaves and ultrasonics, IOP Science Inverse Problems, 4, 2, (1998), 305 – 331.

## ÖZGEÇMİŞ

İlköğretim öğrenimini Kalaba ilkökulu'nda, orta öğrenimini Hüseyin Güllüoğlu ortaokulu ve İzmir Altındağ orta Okulu'nda, lise öğrenimini ise İzmir Atatürk Erkek Lisesi'nde tamamlamıştır. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nü kazanmıştır. 1982-1983 eğitim öğretim yılında bir sene İngilizce hazırlık eğitiminin ardından 1987 yılında mezun olmuştur. Aynı yıl ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başlamış ve 1990 yılında mezun olmuştur. 1990 yılında aynı üniversite ve bölümde doktora çalışmasına başlamış ve 1992 yılında bu doktora çalışmasına ara vermiş ve 2011 yılında doktora çalışmasına Orta Doğu Teknik Üniversitesinde devam etmeye başlamış ve 2012 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim dalına yatay geçiş yapmıştır.

1986 -1990 yılları arasında ASELSAN A.Ş. de, 1990-1991 yılları arasında Hema Elektronik A.Ş. de, 1993-1994 yılları arasında Marconi telekomünikasyon A.Ş. de, 1995-1999 yılları arasında İnter Mühendislik A.Ş. de, 2000-2004 yılları arasında Ericsson Microelectronic A.B. de, 2005-2010 yılları arasında Gate Elektronik A.Ş. , 2010- yılından beri Mitos Medikal Teknolojiler A.Ş de çalışmaktadır.

Evli ve bir kız çocuğu babasıdır.

### **Uluslararası hakemli dergilerde yayınlanan makaleler (SCI/SCI-E)**

1. Kurtoglu, I., Cayoren, M. ve Cavdar, I. H. Microwave Imaging of Electrical Wires With MUSIC Algorithm, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Volume: 16, Issue: 5, May 2019
2. Kurtoglu, I., ve Cavdar, I. H. Electromagnetic Imaging of Discrete Wire Scatterers via MUSIC Algorithm: Preliminary Experimental Results, 2019 Seventh International Conference on Digital Information Processing and Communications (ICDIPC), 2-4 May 2019