

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DENİZ YÜZEYİNDE 5 GHZ FREKANS BANDINDA RADYO DALGASI
PROPAGASYONU

DOKTORA TEZİ

Ekrem EYÜBOĞLU

EKİM 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DENİZ YÜZEYİNDE 5 GHZ FREKANS BANDINDA RADYO DALGASI
PROPAGASYONU**

Ekrem EYÜBOĞLU

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18 / 09 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 14 / 10 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Deniz Yüzeyinde 5 GHz Frekans Bandında Radyo Dalgası Propagasyonu” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR’a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Sayın Prof. Dr. Ercan KÖSE ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Haydar KAYA’ya, eğitim öğretim hayatımda katkısı olan tüm hocalarıma ve ortak olarak çalışmalar yürüttüğümüz ve tez çalışması süresinde de hiçbir yardımdan kaçınmayan arkadaşlarım Prof. Dr. Önder AYDEMİR’e, Dr. Öğr. Üyesi Zeynep Hasırcı TUĞCU’ya, Dr. Öğr. Üyesi İshak ALTINPINAR’a ve Dr. Öğr. Üyesi Kenan KUZULUGİL’e teşekkür ederim.

Tez çalışması sürecinde bana desteklerini esirgemeyen Sürmene Deniz Bilimleri Fakültesi – Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisliği Bölümü’ndeki tüm değerli hocalarıma ve asistan arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, tüm süreçte büyük bir fedakarlıkla desteğini ve yardımını her an hissettiren eşim Ayşegül EYÜBOĞLU’na, hayat boyu her karar ve adımda yanımda olan annem Mediha EYÜBOĞLU ve babam Ali İhsan EYÜBOĞLU’na teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Ekrem EYÜBOĞLU
Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Deniz Yüzeyinde 5 GHz Frekans Bandında Radyo Dalgası Propagasyonu” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, 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. 14/10/2024

Ekrem EYÜBOĞLU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Deniz Ortamı Haberleşme Sistemleri.....	2
1.2. Deniz Ortamı Haberleşme Kanal Karakteristiği	6
1.3. Deniz Yüzeyinin Karakterize Edilmesi	7
1.3.1. RMS Yüzey Yüksekliği	7
1.3.2. Yüzey Korelasyon Uzunluğu.....	8
1.3.3. RMS Yüzey Eğimi.....	10
1.4. Yüzey Pürüzlülüğünün Tanımlanması	11
1.4.1. Rayleigh Pürüzlülük Kriteri.....	11
1.4.2. Fraunhofer Pürüzlülük Kriteri	13
1.5. Deniz Yüzeyinde Elektromanyetik Dalga Propagasyonu Etkileri	13
1.5.1. Yansıma (Reflection).....	14
1.5.2. Pürüzlülük (Roughness).....	15
1.5.3. Kırınım (Diffraction)	17
1.5.4. Iraksaklık (Divergence)	20
1.5.5. Gölgeleme (Shadowing)	23
1.5.6. Yağmur Zayıflatması	25
1.6. Deniz Kanalı Propagasyon Modelleri	26
1.6.1. ITU-R P.1546-2 Yol Kaybı Modeli.....	26
1.6.2. Serbest Uzay Yol Kaybı Modeli.....	27
1.6.3. 2-Işınlı Yol Kaybı Modeli.....	29
1.6.4. Açık Deniz Radyo Propagasyonu İçin Dairesel Dünya Yol Kaybı Modeli.....	33

1.6.5. 3-Işınlı Yol Kaybı Modeli.....	34
1.6.6. Log-Distance Yol Kaybı Modeli	37
1.6.7. Dual-Slope Yol Kaybı Modeli.....	38
1.7. Literatür Çalışmaları.....	39
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	48
2.1. Ölçüm Donanımları ve Düzenegi.....	48
2.1.1. Ölçüm Donanımı.....	49
2.1.2. Ölçüm Düzenegi	52
2.2. Ölçüm Senaryoları.....	54
2.2.1. Yağışlı Hava Ölçümleri (M1)	55
2.2.2. Dalgalı Yağışsız Hava Ölçümleri (M2).....	56
2.2.3. Farklı Anten Yükseklikleri İçin Açık Hava Durumu Ölçümleri (M3 ve M4).....	58
2.3. Ölçüm Sonuçları.....	60
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	68
3.1. Serbest Uzay Yol Kaybı Modeli (FSPL) ve Ölçüm Verilerinin Karşılaştırılması.....	73
3.2. 2-ışınlı Yol Kaybı Modeli (2-ray) ve Ölçüm Verilerinin Karşılaştırılması.....	77
3.3. Değiştirilmiş 2-ışınlı Yol Kaybı Modeli (Modified REL) ve Ölçüm Verilerinin Karşılaştırılması	99
3.4. Log-distance Yol Kaybı Modeli ve Ölçüm Verilerinin Karşılaştırılması	103
3.5. Dual-Slope Yol Kaybı Modeli ve Ölçüm Verilerinin Karşılaştırılması.....	106
3.6. 3-ışınlı Yol Kaybı Modeli ve Ölçüm Verilerinin Karşılaştırılması.....	109
3.7. Önerilen Parçalı Yol Kaybı Modeli ve Ölçüm Verilerinin Karşılaştırılması.....	112
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	120
5. KAYNAKLAR	125
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

DENİZ YÜZEYİNDE 5 GHZ FREKANS BANDINDA RADYO DALGASI PROPAGASYONU

Ekrem EYÜBOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR
2024, 130 Sayfa

Deniz haberleşmesinde kullanılan mevcut sistemlere alternatif olarak sunulan 5 GHz Wi-Fi hizmeti, ücretsiz oluşu ve ihtiyaç duyulan genişband veri hizmetini karşılayabilmesi açısından öne çıkmaktadır. Ülkemizde 5 GHz frekans bandı için lisans gerekmeden dış ortamda 1W'a kadar çıkış gücüne sahip Wi-Fi ağlarına izin verilmektedir. Deniz ortamında bu sistemin kullanımı amacıyla deniz haberleşme kanalının belirtilen frekanslar için propagasyon modelinin oluşturulması gerekmektedir. Bunun için öncelikle deniz kanalının tespiti için deniz ölçümleri yapılmıştır. Ardından serbest uzay, 2-ışınlı, 3-ışınlı, log-distance ve dual-slope yol kaybı modellerinin deniz kanalı propagasyonuna uyumu ve başarımı değerlendirilmiştir. Deniz haberleşmesinin yapılacağı konuma bağlı olarak deniz haberleşme kanalını etkileyen faktörler değişmektedir. Deniz ortamı için haberleşme kanalını etkileyen faktörler dikkate alınarak 2-ışınlı model için beş farklı yaklaşımda bulunulmuştur. REL (Round Earth Loss) modeli için alıcı anten yüksekliği ve açığa bağlı anten kazançlarının dahil edilmesiyle başarımlar artışı sağlayan bir geliştirme yapılmıştır. Geliştirilmiş REL ve log-distance modelleri kullanılarak yeni bir parçalı propagasyon modeli önerisinde bulunulmuş ve önerilen modelin en yüksek başarımları gösterdiği başarımlar değerlendirilerek ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Deniz üzeri propagasyon, Deniz haberleşmesi, 2-ışınlı model

PhD. Thesis

SUMMARY

NEAR SEA-SURFACE RADIOWAVE PROPAGATION AT 5 GHZ

Ekrem EYÜBOĞLU

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical and Electronics Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR
2024, 130 Pages

5 GHz Wi-Fi service, which is offered as an alternative to the existing systems used in maritime communication, stands out in terms of being free of charge and being able to meet the required broadband data service. In our country, Wi-Fi networks with output power up to 1W are allowed for outdoor services at the 5 GHz frequency band without requiring a license. In order to use this system in the marine environment, a propagation model must be created for the specified frequencies of the marine communication channel. For this purpose, first of all, sea measurements were made to determine the sea channel. Then, the compatibility and performance of free space, 2-ray, 3-ray, log-distance and dual-slope path loss models in maritime environment were evaluated. Factors affecting the sea communication channel vary depending on the location where the sea communication will take place. Five different approaches have been made for the 2-ray model, taking into account the factors affecting the communication channel for the marine environment. An improvement has been made for the REL (Round Earth Loss) model, which provides increased performance by including receiver antenna height and antenna gains depending on the direct and reflected ray angle. A new piecewise propagation model was proposed using the modified REL and log-distance models. Performance evaluations point that the proposed model showed the highest performance.

Key Words: Over-sea propagation, Marine communication, 2-ray model

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Pürüzlü bir yüzeyin yüzey yüksekliği (Hoerack, 2015)	8
Şekil 2. Dik geliş açısı (Hoerack, 2015)	11
Şekil 3. Eğik gelme açısı (Hoerack, 2015)	12
Şekil 4. Bir elektromanyetik dalganın yansıma ve ortam geçişi	14
Şekil 5. Farklı seviyede yüzey pürüzlülüğüne bağlı saçılma durumları (Hoerack, 2015)	16
Şekil 6. Dünyanın eğriliğinden kaynaklı kırınım	18
Şekil 7. Iraksaklık etkisi (Bansal, 2006)	21
Şekil 8. Pürüzlü yüzeyden kaynaklı gölgeleme etkisi (Hoerack, 2015)	23
Şekil 9. Temel bir kablosuz iletişim bağlantısı (Bansal, 2006)	28
Şekil 10. Direkt ve yansıyan ışınların gösterimi (Jenn, 2012)	30
Şekil 11. REL modelinin geometrik gösterimi (Bansal, 2006)	33
Şekil 12. Kırınıma uğrayan bir radyo dalgasının yansıyan dalgaya benzetimi	36
Şekil 13. Cohda Wireless MK5 OBU Alıcı/Verici ve Anteni	49
Şekil 14. Anten yatay ışıma diyagramı	51
Şekil 15. Anten dikey ışıma diyagramı	51
Şekil 16. Otomobil içi ölçüm cihazı düzeneği (verici)	52
Şekil 17. Otomobil üzerine verici anten yerleşimi (verici)	52
Şekil 18. Tekne üzeri anten yerleşimi (alıcı)	53
Şekil 19. Tekne içi ölçüm cihazı düzeneği (alıcı)	54
Şekil 20. M1 ölçüm senaryosu	56
Şekil 21. M2 ölçüm senaryosu	57
Şekil 22. M2 senaryosu için açık deniz ölçümü	58
Şekil 23. M3 senaryosu için ölçüm ortamı	59
Şekil 24. M4 senaryosu için ölçüm ortamı	60
Şekil 25. M1 ölçüm senaryosu için izlenen rota	61
Şekil 26. M1 senaryosu için gidiş rotasında elde edilen RSSI	62
Şekil 27. M1 senaryosu için dönüş rotasında elde edilen RSSI	62
Şekil 28. M2 ölçüm senaryosu için izlenen rota	63
Şekil 29. M2 senaryosu için gidiş rotasında elde edilen RSSI	63
Şekil 30. M2 senaryosu için dönüş rotasında elde edilen RSSI	64

Şekil 31. M3 ölçüm senaryosu için izlenen rota.....	64
Şekil 32. M3 senaryosu için gidiş rotasında elde edilen RSSI	65
Şekil 33. M3 senaryosu için dönüş rotasında elde edilen RSSI	65
Şekil 34. M4 ölçüm senaryosu için izlenen rota.....	66
Şekil 35. M4 senaryosu için gidiş rotasında elde edilen RSSI	67
Şekil 36. M4 senaryosu için dönüş rotasında elde edilen RSSI	67
Şekil 37. (a) Doğrusal (b) Logaritmik düzlemde M1 senaryosu için ölçüm verileri ve ayıklanan verilerin karşılaştırılması	69
Şekil 38. (a) Doğrusal (b) Logaritmik düzlemde M2 senaryosu için ölçüm verileri ve ayıklanan verilerin karşılaştırılması	70
Şekil 39. (a) Doğrusal (b) Logaritmik düzlemde M3 senaryosu için ölçüm verileri ve ayıklanan verilerin karşılaştırılması	71
Şekil 40. (a) Doğrusal (b) Logaritmik düzlemde M4 senaryosu için ölçüm verileri ve ayıklanan verilerin karşılaştırılması	72
Şekil 41. M1 senaryosu ölçüm ve FSPL modeli tahmini RSSI değerlerinin karşılaştırılması	74
Şekil 42. M2 senaryosu ölçüm ve FSPL modeli tahmini RSSI değerlerinin karşılaştırılması	75
Şekil 43. M3 senaryosu ölçüm ve FSPL modeli tahmini RSSI değerlerinin karşılaştırılması	75
Şekil 44. M4 senaryosu ölçüm ve FSPL modeli tahmini RSSI değerlerinin karşılaştırılması	76
Şekil 45. M1 senaryosu ölçüm ve RSSI2-ray verilerinin karşılaştırması.....	81
Şekil 46. M1 senaryosu ölçüm ve RSSI2-ray + Γ verilerinin karşılaştırması.....	81
Şekil 47. M1 senaryosu ölçüm ve RSSI2-ray + Γ + $G\theta$ verilerinin karşılaştırması	82
Şekil 48. M1 senaryosu ölçüm ve RSSIREL verilerinin karşılaştırması	83
Şekil 49. M1 senaryosu ölçüm ve RSSIREL + $G\theta$ verilerinin karşılaştırması.....	83
Şekil 50. M1 senaryosu ölçüm ve 2-ışınlı yol kaybı model yaklaşımları verilerinin karşılaştırması	84
Şekil 51. M2 senaryosu ölçüm ve RSSI2-ray verilerinin karşılaştırması.....	85
Şekil 52. M2 senaryosu ölçüm ve RSSI2-ray + Γ verilerinin karşılaştırması.....	86
Şekil 53. M2 senaryosu ölçüm ve RSSI2-ray + Γ + $G\theta$ verilerinin karşılaştırması	86
Şekil 54. M2 senaryosu ölçüm ve RSSIREL verilerinin karşılaştırması	87
Şekil 55. M2 senaryosu ölçüm ve RSSIREL + $G\theta$ verilerinin karşılaştırması.....	88
Şekil 56. M2 senaryosu ölçüm ve 2-ışınlı yol kaybı model yaklaşımları verilerinin karşılaştırması	89
Şekil 57. M3 senaryosu ölçüm ve RSSI2-ray verilerinin karşılaştırması.....	90
Şekil 58. M3 senaryosu ölçüm ve RSSI2-ray + Γ verilerinin karşılaştırması.....	90

Şekil 59. M3 senaryosu ölçüm ve RSSI2-ray + Γ + $G\theta$ verilerinin karşılaştırması	91
Şekil 60. M3 senaryosu ölçüm ve RSSIREL verilerinin karşılaştırması	91
Şekil 61. M3 senaryosu ölçüm ve RSSIREL + $G\theta$ verilerinin karşılaştırması	92
Şekil 62. M3 senaryosu ölçüm ve 2-ışınlı yol kaybı model yaklaşımları verilerinin karşılaştırması	93
Şekil 63. M4 senaryosu ölçüm ve RSSI2-ray verilerinin karşılaştırması	94
Şekil 64. M4 senaryosu ölçüm ve RSSI2-ray + Γ verilerinin karşılaştırması	94
Şekil 65. M4 senaryosu ölçüm ve RSSI2-ray + Γ + $G\theta$ verilerinin karşılaştırması	95
Şekil 66. M4 senaryosu ölçüm ve RSSIREL verilerinin karşılaştırması	96
Şekil 67. M4 senaryosu ölçüm ve RSSIREL + $G\theta$ verilerinin karşılaştırması	97
Şekil 68. M4 senaryosu ölçüm ve 2-ışınlı yol kaybı model yaklaşımları verilerinin karşılaştırması	98
Şekil 69. M1 senaryosu ölçüm, hr ve best_hr için RSSIREL + $G\theta$ karşılaştırması	100
Şekil 70. M2 senaryosu ölçüm, hr ve best_hr için RSSIREL + $G\theta$ karşılaştırması	100
Şekil 71. M3 senaryosu ölçüm, hr ve best_hr için RSSIREL + $G\theta$ karşılaştırması	101
Şekil 72. M4 senaryosu ölçüm, hr ve best_hr için RSSIREL + $G\theta$ karşılaştırması	102
Şekil 73. M1 senaryosu ölçüm ve RSSIlogd karşılaştırması	104
Şekil 74. M2 senaryosu ölçüm ve RSSIlogd karşılaştırması	104
Şekil 75. M3 senaryosu ölçüm ve RSSIlogd karşılaştırması	105
Şekil 76. M4 senaryosu ölçüm ve RSSIlogd karşılaştırması	105
Şekil 77. M1 senaryosu ölçüm ve RSSIdual karşılaştırması	107
Şekil 78. M2 senaryosu ölçüm ve RSSIdual karşılaştırması	107
Şekil 79. M3 senaryosu ölçüm ve RSSIdual karşılaştırması	108
Şekil 80. M4 senaryosu ölçüm ve RSSIdual karşılaştırması	108
Şekil 81. M1 senaryosu ölçüm ve RSSI3-ray karşılaştırması	110
Şekil 82. M2 senaryosu ölçüm ve RSSI3-ray karşılaştırması	110
Şekil 83. M3 senaryosu ölçüm ve RSSI3-ray karşılaştırması	111
Şekil 84. M4 senaryosu ölçüm ve RSSI3-ray karşılaştırması	112
Şekil 85. M1 senaryosu ölçüm, RSSIProposed ve RSSIModified REL karşılaştırması	115
Şekil 86. M2 senaryosu ölçüm, RSSIProposed ve RSSIModified REL karşılaştırması	116
Şekil 87. M3 senaryosu ölçüm, RSSIProposed ve RSSIModified REL karşılaştırması	117
Şekil 88. M4 senaryosu ölçüm, RSSIProposed ve RSSIModified REL karşılaştırması	118

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Deniz haberleşme teknolojilerinin mevcut durumu	3
Tablo 2. Frekans değerine bağlı G_a , E_a , G_b ve E_b katsayılar tablosu.....	26
Tablo 3. Farklı ortamlar için üstel yol kaybı katsayısı değerleri	38
Tablo 4. Cohda Wireless MK5 OBU teknik özellikler	50
Tablo 5. M1 senaryosu için hava ve deniz durumu bilgileri	55
Tablo 6. M2 senaryosu için hava ve deniz durumu bilgileri	56
Tablo 7. M3 ve M4 senaryoları için hava ve deniz durumu bilgileri	59
Tablo 8. Ortak sistem parametreleri	73
Tablo 9. Ölçüm senaryoları ve $RSSIFSPL$ verileri başarımlı değerlendirilmesi.....	76
Tablo 10. 2-ışınlı model ve kullanılan parametrelere göre adlandırılması.....	77
Tablo 11. Ölçüm senaryoları için menzıl ve $D06$ mesafeleri.....	79
Tablo 12. Gölgeleme ve pürüzlülük katsayılarının belirlenmesinde kullanılan parametreler	79
Tablo 13. M1 senaryosu ve 2-ışınlı yol kaybı modeli başarımlı verileri.....	84
Tablo 14. M2 senaryosu ve 2-ışınlı yol kaybı modeli başarımlı verileri.....	89
Tablo 15. M3 senaryosu ve 2-ışınlı yol kaybı modeli başarımlı verileri.....	93
Tablo 16. M4 senaryosu ve 2-ışınlı yol kaybı modeli başarımlı verileri.....	98
Tablo 17. hr ve $best_hr$ için hesaplanan $RSSIREL + G\theta$ başarımlı sonuçları.....	102
Tablo 18. d_0 ve n değerlerine karşılık hesaplanan $RSSI_{Logd}$ başarımlı sonuçları.....	106
Tablo 19. d_0 , n_1 , n_2 ve $dbreak$ değerlerine karşılık hesaplanan $RSSI_{dual}$ başarımlı sonuçları	109
Tablo 20. he değerlerine karşılık hesaplanan $RSSI_3 - ray$ başarımlı sonuçları.....	112
Tablo 21. Hesaplanan ve kestirilen $dbreak$ için $RSSI_{Proposed}$ ve $RSSI_{Modified REL}$ başarımlı sonuçları	119
Tablo 22. M1 senaryosu için incelenen yöntemlere ait tahmin başarımlıları.....	122
Tablo 23. M2 senaryosu için incelenen yöntemlere ait tahmin başarımlıları.....	123
Tablo 24. M3 senaryosu için incelenen yöntemlere ait tahmin başarımlıları.....	123
Tablo 25. M4 senaryosu için incelenen yöntemlere ait tahmin başarımlıları.....	123

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

BPSK	: Phase-shift keying
dBm	: Decibel-milliwatts
Deniz mili	: 1852m
EIRP	: Effective isotropic radiated power
HF	: High frequency
Knot	:18.52 km/h
LoS	: Line of sight
NLoS	: None line of sight
PDF	: Probability density function
QAM	: Quadrature amplitude modulation
QPSK	: Quadrature phase-shift keying
RHCP	: Right-handed circular polarization
RMS	: Root mean square
RSSI	: Received signal strength indicator
UAV	: Unmanned air vehicle
USV	: Unmanned surface vehicle
VHF	: Very high frequency
Wi-Fi	: Wireless fidelity
Wi-MAX	: Worldwide interoperability for microwave access

1. GENEL BİLGİLER

Günümüzde gerçekleşen ekonomik, askeri, ulaşım, güvenlik, enerji ve çevresel faaliyetlerin odak noktası olan deniz ortamının, bu faaliyetlerin tamamı için vazgeçilmez olan kablosuz iletişim açısından incelenmesi ilgi gören bir konudur. Haberleşme sistemlerinin temelini oluşturan radyo dalgası propagasyon modellerinin deniz ortamı için başarımlarının belirlenmesi ve geliştirilmesi amacıyla birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalar sonucunda ortaya koyulacak gelişmeler çok geniş bir alanda fayda sağlayacaktır.

Devletlerin ekonomik faaliyetler gösterebildikleri münhasır ekonomik bölge, istisnai durumlar göz ardı edildiğinde 200 deniz milidir ve bu bölgede düşük ücretli genişband haberleşme ihtiyacı vardır (Yang vd., 2013). Petrol ve doğalgaz arama faaliyetleri, yük ve yolcu taşıma amaçlı deniz ulaşımı, balık çiftlikleri gibi faaliyetler için deniz haberleşmesi çok önemlidir (Yang vd., 2011). Münhasır ekonomik bölgede gerçekleşen faaliyetlerin çoğunda otonom sistemlere dönülmesine yönelik eğilim sonucunda uzaktan kontrol ve bunun gerçekleştirilebilmesi için sağlıklı deniz haberleşme sisteminin sağlanması son yıllarda çokça ilgi görmektedir (Yang vd., 2018).

Yine madencilik, tarımsal ve askeri alanlar gibi otonom sistemler ve kablosuz algılayıcı ağlardan oluşan hem deniz hem de kara ortamlarında yürütülen faaliyetler için radyo propagasyon çalışmaları yapılmaktadır (Yılmaz vd., 2017). Son yıllarda çokça üzerinde durulan çevre kirliliği konusunda deniz ve tatlı su ortamları için çevresel izleme ve koruma sistemleri geliştirilmektedir. Ayrıca şamandıralar, gemiler, insansız yüzey taşıtları (unmanned surface vehicle – USV), denizdeki ekipmanların uzaktan kontrolü ve bilgi toplamak için kıyıya ve limanlara yerleştirilecek donanımlarla güvenilir iletişim sağlanabilmesi açısından deniz ortamında elektromanyetik dalga propagasyonu çalışmaları önemini arttırmaktadır (Gaitán vd., 2020). Özellikle 5G gezgin iletişimin kullanılmaya başlandığı bu günlerde deniz kıyı alanlarını da kapsayacak bir kablosuz ağ oluşturabilmek için deniz ortamı iletişiminin ayrıntılı incelenmesi ve modellerin ortaya koyulması gerekir (Gao vd., 2020).

Deniz araçları ve kıyı istasyonları arasında güvenilir bir iletişim bağlantısının sağlanabilmesi amacıyla sistem tasarımcıları için deniz yüzeyinde radyo dalgası propagasyonunun tüm parametrelerinin ortaya koyulması ve incelenmesi çok önemlidir. Deniz ortamında faaliyet gösteren anti-terörist gözlem sistemleri için güvenilirlik kavramı

hayati önem taşımaktadır (Lee vd., 2014). Deniz üzeri rüzgâr enerjisi çiftliklerinin uzaktan kontrolü ve gözlemlenmesi, taşkın uyarı sistemleri ve su kalitesinin tespiti gibi alanlarda kurulan kablosuz algılayıcı ağları için de kesintisiz bir haberleşme sistemi vazgeçilmezdir (Gaitán vd., 2019). Denizde arama-kurtarma faaliyetleri, mercan kayalıklarının gözlemlenmesi ve denizde afet müdahale sistemleri için başarıyı yüksek radyo propagasyonu modellerinin kullanımı elzemdir (Yamamoto, 2019). Kurulacak kablosuz ağlar, kara ile açık deniz arasında bir köprü vazifesi görerek deniz altı haberleşme sistemlerine de katkı sağlayacaktır (Lopes, 2014).

Belirtilen tüm bu faaliyetin gerçekleştirilmesi için farklı frekanslarda propagasyon modeli araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Bunlar arasında 5 GHz frekans bandı öne çıkmaktadır. Bundaki ana sebep; uluslararası düzenlemelerin, diğer serbest bandlara nazaran bu frekans bandı için daha yüksek iletim gücüne izin vermesi ve bu durumun radyo menzilini artırma avantajı sağlamasıdır (Lopes, 2014). Yine bu frekans bandının ücretsiz ve yaygın oluşu deniz iletişimi çalışmaları için tercih edilme nedenleri arasındadır (Mehrnia & Ozdemir, 2018). ETSI (European Telecommunications Standard Institute) iş birliği ile CEPT (The European Conference of Postal and Telecommunications Administrations) konferansında 5–8 GHz gibi geniş bir frekans spektrumu, deniz genişband radyo iletişimi için yakın gelecekte önerilmek üzere tanımlanmıştır (Wang vd., 2017).

Gemilerde gelecekte kullanılabilecek haberleşme ve seyir sistemleri için yeni çözümler geliştirmek amacıyla deniz yüzeyi saçılımının propagasyon karakteristiğinin anlaşılması gerekmektedir. Kablosuz propagasyon kanalı hakkında bilgi edinmenin olası yollarında biri kanal ölçüm çalışmaları yapmaktır (Wang vd., 2015).

1.1. Deniz Ortamı Haberleşme Sistemleri

Denizcilik haberleşmesi, her birinin odaklı olduğu tek bir konu olan birbirinden farklı sistemler tarafından sağlanmaktadır (Wang vd., 2015). Gemilerde ve diğer deniz taşıtlarında kullanılan haberleşme sistemleri incelendiğinde uydu erişimi, hücresel ağlar veya HF/VHF veri radyoları vasıtasıyla internet erişiminin mümkün olduğu görülmektedir. Tablo 1'de bu mevcut haberleşme sistemlerinin genel avantaj ve dezavantajları sıralanmaktadır (Lopes, 2014).

Tablo 1. Deniz haberleşme teknolojilerinin mevcut durumu

Hizmet türü	Avantaj	Dezavantaj
Uydu Erişimi	Geniş kapsama alanı ve genişband erişimi	Yüksek kurulum maliyeti ve yüksek aylık ücret
Hücresel Ağ erişimi	Genişband erişim	Kıyıya yakın kapsama alanı, hizmet kullanım ücreti
HF ve VHF Radyolar	Geniş kapsama alanı, ücretsiz erişim	Darband erişim

Uydu sistemleri düşünüldüğünde (INMARSAT, VSAT vb.) veri gönderim ve alımı yer yüzeyinden yaklaşık 36000km yukarıdaki sabit yörüngeli uydular vasıtasıyla yapıldığı için; VoIP çağrıları, uzaktan kontrol cihazları ve uzaktan kontrollü hayat destek sistemleri gibi gecikmelere karşı hassas sistemlerin kullanımı, iki kara istasyonunun uydu kullandığı düşünüldüğünde oluşan yaklaşık 275ms'lik propagasyon gecikmesi yüzünden verimsiz olmaktadır (Lopes, 2014). Wi-Fi haberleşme ile karşılaştırıldığında uydu sistemleri için düşük bandgenişliği ve düşük kapasite, ayrıca yüksek hizmet bedelleri dezavantajlardır (Reyes-Guerrero vd., 2011). Hizmet bedelinin yüksek olması; yörüngeye uyduların yerleştirilmesindeki yüksek maliyetlerden ve deniz ortamı için kurulacak istasyonun uyduya yönlendirilmesinde ihtiyaç duyacağı stabilizasyon donanımının maliyetlerinden kaynaklanmaktadır (Bekkadal, 2009). Her ne kadar açık deniz için kapsama alanı açısından uygun olsa da güncelleme ve bakım maliyetleri de uydu sistemleri için olumsuzluklar arasındadır (Ren vd., 2014).

Hücresel ağların (GSM, UMTS vb.) kullanımında ise hizmet ücretinin yanı sıra kapsama alanı düzenlemelerinde karaların öncelikli olmasından kaynaklı denizde sınırlı menzile sahip olunması dezavantajları oluşturmaktadır (Lopes, 2014). Sınırlı kapsama alanının yanında uydu sistemlerinde olduğu gibi Wi-Fi haberleşmeye göre düşük bandgenişliği ve düşük kapasite bu haberleşme sistemleri için de yetersizliklerdendir (Reyes-Guerrero vd., 2011).

Ultra-kısa dalga interkomlar ve VHF frekansında tek yanband kısa dalga radyo yayını yapan VHF radyo telefonlar, gemiden gemiye ya da gemiden karaya kısa menzilli (20 deniz milinden küçük) ses haberleşmesi için kullanılmaktadır (Ren vd., 2014). VHF radyolar ve uydu sistemleri açık denizde yani mobil şebeke kapsama alanı dışına çıkıldığında devreye girmektedir. Yine bahsi geçen VHF/UHF sistemler sahip oldukları düşük veri hızları

nedeniyle günümüz veri trafiği hızı taleplerini karşılayamamaktadır (Lopes, 2014). Bunun yanında VHF sistemleri için gerekli anten ve donanımların büyük ağırlığı ve boyutları da yeni sistemlerin arayışını tetikleyen etkenlerdendir (Reyes-Guerrero vd., 2011).

Devletlerin, münhasır ekonomik bölgelerinde gerçekleştirecekleri ulusal denizcilik faaliyetleri için mevcut deniz haberleşme sistemlerindeki yetersizliklerin giderilmesi büyük bir önem arz etmektedir (Li vd., 2021). Karasal haberleşme sistemlerindeki gelişmelere göre deniz haberleşme sistemlerindeki gelişmeler çok daha yavaş ilerlemektedir. Bu nedenle de deniz ortamı haberleşme sistemleri için yeni araştırmaların yapılması son yıllarda ilgi çekmektedir (Bekkadal, 2009). Örneğin; TRITON (The TRI-Media Telematic Oceanographic Network), NANET (The Nautical Ad-Hoc Network) ve MarCom projeleri kıyı alanları ve gemiler arası yüksek hızlı ve güvenilir veri iletimi sağlamak için tasarlanmıştır. Ayrıca BLUECOM+ projesi ile açık deniz üzerinde balonlar vasıtasıyla kapsama alanının genişletilmesi amaçlanmaktadır (Wang vd., 2018). Ek olarak deniz haberleşmesi alanında ele alınan 802.16 IEEE standardını kullanan Wi-MAX sistemler de geniş kapsama alanı sunmalarının yanında pahalı ve tescilli teknolojilere dayanmaktadır (Lopes, 2014). Yüksek veri hızı sağlayan sistemler, uzaktan kontrollü gemiler veya açık deniz faaliyetleri gibi yüksek bandgenişliği gerektiren yeni uygulamaların ve çoklu sistemlerin taleplerini karşılayabilmelidir. Bu sebeple deniz yüzeyinde genişband radyo bağlantısının anlaşılması bir gereklilik olmuştur (Wang vd., 2015).

Deniz haberleşmesi için genişband Wi-Fi ağlarının kullanımı, uydu bağlantı sistemleri bulunmayan küçük tekneler ve balıkçı gemileri için uygun maliyetli bir çözüm olacaktır. Wi-Fi ağları, denizcilik alanında liman içi yakın mesafe kıyı-gemi ve gemi-kıyı haberleşmesi için bir çözüm olarak görülmektedir. Mevcut durumda liman dışında uydu ve darband iletişim sistemleri kullanılmaktadır (Lopes, 2014).

Deniz ortamında radyo dalgası propagasyonu yıllardır birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Bir deniz taşıtı ve kara istasyonu arasında güvenilir bir radyo bağlantısı elde etmek için planlama yapılırken, deniz yüzeyinde radyo dalgası propagasyonunun anlaşılması çok önemlidir. Yıllar içinde birçok farklı senaryo kullanılarak araştırmalar yapılmıştır. Günümüzde askeri alanda açık denizde teröristlere karşı gözetleme sistemlerinin ve limanlarda Wi-MAX uygulamaları gibi 5 GHz bandında kablosuz sistemlerin deniz ortamında kullanılması bu alandaki uygulamalara olan ilgiyi arttırmıştır. Bu uygulamalar, deniz ortamında direkt dalga (LoS – Line of Sight) mobil propagasyon yapabilmek için 5 GHz sistemlere ihtiyaç duymaktadır (Lee vd., 2014).

Deniz yüzeyinde radyo dalgası propagasyonu farklı frekanslar ve farklı haberleşme senaryoları için yıllar içinde araştırmacıların ele aldığı konular arasındadır. Bazı çalışmalar deniz ortamındaki buharlaşma kanalı (evaporation duct) yüksekliğinin etkisine odaklanırken, bazıları da deniz kanalı üzerindeki anten yüksekliği gibi farklı parametreleri veya farklı frekansların etkisini incelemiştir. Deniz ortamı için yapılan kanal modelleme çalışmalarına ait literatür her geçen gün genişlese de 5G gibi yeni hücresel sistemlerin gerekliliği olan milimetre radyo dalgası frekans bandları için uygun bir kanal modeline olan ihtiyaç devam etmektedir. Deniz ortamı için yapılan çalışmaların çoğunda tüm dünyada ulaşılabilir ve herkes için kullanımı ücretsiz olan 5 GHz frekans bandı ele alınmaktadır (Mehrnia & Ozdemir, 2018).

Deniz ortamında radyo dalgası propagasyonu için kullanılan kablosuz kanallar, bu ortamın kendine has yapısı nedeniyle karadan karaya kablosuz iletişimde kullanılan kanallardan farklıdır. Örneğin buharlaşma kanalı etkisi, karadan karaya oluşturulan senaryolarda incelenmemektedir. Deniz yüzeyi kanallarının modellenmesi için kullanılan mevcut yaklaşımlar; frekansa, kullanılan teknolojiye ve uygulama senaryolarına göre değişim göstermektedir. Bazı yaklaşımlar milimetre dalgalar ve genişband teknolojileri kullanırken, diğerleri 1.9 GHz, 2 GHz ve 10 GHz gibi frekanslar kullanmıştır. Yine bazı çalışmalarda deniz ortamı için deniz taşıtından deniz taşıtına gezgin iletişim incelemiştir. Gemiden gemiye ve gemiden karaya kablosuz iletişim senaryoları literatürdeki çalışmalarda ayrıca ele alınmış ve uygulanmıştır (Habib & Moh, 2019).

Mobil kablosuz ağlar her ne kadar dünyamızın kara parçalarının çoğunu kapsasa da önemli su kanalları ve okyanus operasyon alanlarında halen daha ağ kapsamı sorunları bulunmaktadır. Deniz alanlarında günümüzde de mobil haberleşme nispeten zayıftır. Açık denizdeki bilgi iletimi bahsedildiği üzere kapsama alanı avantajından ötürü çoğunlukla pahalı uydu haberleşmesine dayanmaktadır. Ancak mobil iletişim teknolojisindeki hızlı gelişmeler sayesinde mobil ağ kapsama alanlarının okyanus bölgelerine kadar genişlemesi umulmaktadır. Böylece denizde kablosuz haberleşmenin gelişimi teşvik edilmiş olacaktır (Gao vd., 2020).

Lisanssız IEEE 802.11 ağlarının deniz ortamında haberleşme için kullanımı, gemi sahiplerine; seyir güvenliğini arttırırken denizde düşük bütçeli genişband internet erişimi, gerçek zamanlı seyir yardımcı uygulamalarının kullanımı ve sesli/görüntülü haberleşme imkanlarını sağlayabilecektir (Lopes, 2014).

1.2. Deniz Ortamı Haberleşme Kanal Karakteristiği

Kablosuz kanal, kablosuz iletişimde bilginin iletim ortamıdır. Kanal başarımı direkt olarak iletim hızını ve iletişim kalitesini ortaya koyar. Yüksek kaliteli, büyük miktarda ve kullanışlı bilginin sınırlı radyo kaynakları ile gönderilebilmesi amacıyla oluşturulacak bir kablosuz sistem için kanal karakteristiğinin doğru anlaşılabilmesi gerekir. Kablosuz kanalın karakteristiğine göre, iletişimin kalite ve kapasitesinden emin olmak için uygun girişim ve bozulma önlemleri alınabilir. Kablosuz kanalın zamanla değişmesi ve rastlantısal oluşu, ayrıca çeşitli çevresel faktörlerden etkilenmesi nedeniyle etkin bir kanal modeli oluşturabilmek için ihtiyaç duyulan gerçek ölçümün yanında gerçek kanal karakteristiğini benzeştirmek, izlenmesi gereken en önemli yöntemlerden biridir (Gao vd., 2020).

Deniz yüzeyinde kablosuz kanal modellemesi ve analizi, deniz aşırı kablosuz iletişim sistemi oluşturmanın esas noktasıdır. Winner II ve Okumura modelleri karasal propagasyonda en yaygın kullanılan kablosuz kanal modelleridir. Karasal çevre için kablosuz kanalı etkileyen ana etmen karadaki alıcı ve engelin birbirlerine göre konumlarıdır ve farklı çevrelerin kanal karakteristiği de farklılık gösterir. Bu sebeple; farklı ortamlardaki karasal kablosuz kanalların karakteristiklerinin incelenmesi, esas olarak çok sayıda yapılan ölçüme dayanmaktadır. Fazlaca direkt görüş olmayan (NLoS) propagasyon yollarına sahip karasal ortam ile karşılaştırıldığında, deniz yüzeyi nispeten açık ve daha güçlü direkt işaretlerin olduğu engelsiz bir ortamdır. Deniz aşırı radyo kanalını etkileyen ana etmenler; deniz yüzeyinin istikrarsızlığı nedeniyle ortaya çıkan çoklu-yol etkisi ve aşırı hava koşullarının etkisidir. Deniz yüzeyindeki dalgalanmalar ve hava durumu zamanla değişmekte ve sonuç olarak deniz kablosuz kanallarının da karakteristikleri değişmektedir. Bu sebeple; okyanusun kablosuz propagasyon modeli sabit kara ortamına göre önemli ölçüde farklıdır. Örneğin; engellerin dağılımının neredeyse sabit olduğu karada, karasal kablosuz işaretlerin geliş açısı çevresel engellerin dağılımı ile ilişkilidir. Ancak deniz radyo kanalının geliş açısı esas olarak deniz dalgalarıyla ilişkilidir yani geliş açısı karakteristiği okyanus dalgalarıyla ilişkilidir. Özetlenmek istenirse; mevcut karasal kanal modelleri açık ve değişken deniz ortamı için uygulanabilir değildir. Bu sebeple deniz radyo kanalı modeli için derinlemesine araştırma yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır (Gao vd., 2020).

Ayrıca literatür incelendiğinde deniz yüzeyinde propagasyon söz konusu olduğunda yüzey kanalı (surface duct), yükseltilmiş kanal (elevated duct) ve buharlaşma kanalı (evaporation duct) gibi deniz üzeri elektromanyetik dalga iletiminde oluşan özel kanal türleri

dikkate alınmalıdır. Deniz yüzeyine yakın LoS propagasyon için buharlaşma kanalı etkisi barizdir ve diğer kanal türlerine göre baskındır. Bunun sebebi, buharlaşma kanalının okyanus üzerinde neredeyse her zaman var olmasıdır.

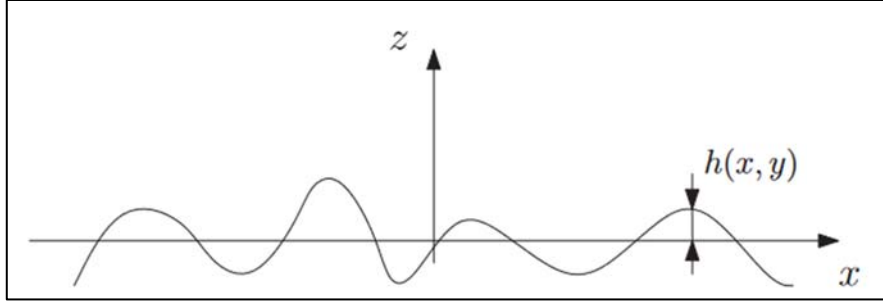
1.3. Deniz Yüzeyinin Karakterize Edilmesi

Deniz yüzeyinin şekli düzensiz ve sürekli değişkendir. Bunun ana nedeni, rüzgâr ve gelgitler gibi çevresel etkilerdir. Bu nedenle deniz yüzeyine, belirli istatistik özelliklere sahip rastgele bir işlem gibi yaklaşılabılır. Öncelikli olarak deniz yüzeyi gibi düzensiz ya da pürüzlü olarak tanımlanan yüzeylerin karakteristikleri ortaya konulmuştur. Bu amaçla pürüzlülük kriteri niteliksel yaklaşımlar ve pürüzlü yüzeyin istatistiksel özellikleri açısından incelenmiştir (Hoerack, 2015).

Rastgele pürüzlü bir yüzey, 2 temel parametre esasında tanımlanabilir. Bunlar; rastgele yüzey yüksekliğinin standart sapması ve yüzey korelasyon uzunluğudur. İleriki tanımlama ve açıklamalarda; standart sapma yüksekliği (RMS yüzey yüksekliği) σ_h ve yüzey korelasyon uzunluğu da l_0 simgeleriyle gösterilmiştir. Birinci parametre olan σ_h , yüzeydeki tepe ve çukurların yüksekliği; ikinci parametre olan l_0 ise bunlar arasındaki ayırım mesafesi hakkında bilgi vermektedir. Ortalama yüzey, ölçülen rastgele pürüzlü yüzeyin rastlantısal yüksekliğinden elde edilen bir referans sağlamaktadır. σ_h ve l_0 esas alınarak; RMS yüzey eğimi β_0 , üçüncü bir parametre olarak pürüzlü yüzeyin şeklini tanımlamak için elde edilebilir (Hoerack, 2015).

1.3.1. RMS Yüzey Yüksekliği

h ; rastgele yüzey yüksekliği, referans bir ortalama yüzeyden ölçülmektedir. Ortalama yüzey, kartezyen koordinat sisteminde x-y düzleminde ifade edilmektedir. Bunun anlamı; verilen x ve y koordinatlarında x-y düzleminin z eksenini için türevi alınarak rastgele yüzey yüksekliği $h(x,y)$ elde edilmektedir. y-ekseni, kartezyen koordinat sistemi için sayfa düzleminin dışarıya doğru olan eksenini temsil etmek üzere Şekil 1'de $h(x,y)$ gösterilmektedir (Hoerack, 2015).



Şekil 1. Pürüzlü bir yüzeyin yüzey yüksekliği (Hoerack, 2015)

σ_h yüzey parametresinin elde edilebilmesi için yüzey yüksekliğinin istatistiksel dağılımının yani h 'nın olasılık dağılım fonksiyonunun (PDF) belirlenmesi gerekmektedir. Doğal yüzeyler genel olarak Gauss dağılımı ile ifade edilirler. Bu sebeple yüzey yüksekliği h 'nın olasılık dağılım fonksiyonu $p(h)$ şu şekilde ifade edilir:

$$p(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_h} \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_h^2}\right) \quad (1)$$

RMS yüzey yüksekliği σ_h ve sıfır ortalama $\langle h^2 \rangle$ şu şekilde verilir:

$$\sigma_h = \sqrt{\langle h^2 \rangle} = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} h^2 p(h) dh} \quad (2)$$

1.3.2. Yüzey Korelasyon Uzunluğu

Yüzey korelasyon uzunluğu l_0 , yüzey oto-korelasyon fonksiyonunun (ACF) uygun bir formülasyon düzenlemesi ile belirlenmiştir. ACF, x ve y 'nin fonksiyonu olan yüzey yüksekliği ' h ' açısından ele alınmıştır. $\xi = (j - 1)\Delta x$, j bir tamsayı ve $j \geq 1$ için (x_1, y_1) ve (x_2, y_2) konumlarında bulunan iki yüzey noktası için yüzey korelasyon fonksiyonu " $B(\xi)$ " aşağıdaki şekilde tanımlanır. Denklemlerde kullanılan açılı ayraçlar " $\langle . \rangle$ " ortalama değer anlamına gelmektedir.

$$B(x_1, x_2, y_1, y_2) = \langle h(x_1, y_1)h(x_2, y_2) \rangle = \frac{\sum_{i=1}^{N+1-j} h_i h_{j+i-1}}{\sum_{i=1}^N h_i^2} \quad (3)$$

Denklem 3'ün normalize edilmiş son hali şu şekildedir:

$$C(x_1, x_2, y_1, y_2) = \frac{\langle h(x_1, y_1)h(x_2, y_2) \rangle}{\sigma_h^2} \quad (4)$$

Daha ileri bir varsayımla; rastgele değişen yüzey yüksekliği h , x ve y ile eş yönlüdür (isotropic). Bunun anlamı; tüm azimut yönlerinde 2-boyutlu pürüzlü yüzeyde bulunan iki nokta arasındaki sabit bir yatay mesafe için yüzey korelasyon fonksiyonunun değeri sabittir. Böylece normalize edilmiş yüzey korelasyon fonksiyonunun basitleştirilmiş hali şu şekilde olur:

$$C(\xi) = \frac{\langle h(x_1, y_1)h(x_2, y_2) \rangle}{\sigma_h^2} \quad (5)$$

ξ , iki nokta (x_1, y_1) ve (x_2, y_2) arasındaki yatay yer değiştirmeyi ifade eder:

$$\xi = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (6)$$

Rastgele pürüzlü bir yüzeydeki korelasyon fonksiyonu, artan yatay uzaklık (ξ) ile azalacaktır. (x_1, y_1) ve (x_2, y_2) noktaları arasındaki mesafe belirli bir değeri aştıktan sonra bu değer yatay korelasyon uzunluğu " l_0 " olarak adlandırılmaktadır. l_0 , (x_1, y_1) ve (x_2, y_2) noktaları arasındaki yer değiştirme olarak da tanımlanabilir ($e \approx 2.71828$ Euler sayısı). $\xi = l_0$ için denklem 7'deki ifade elde edilir (Ulaby vd., 2014).

$$C(l_0) = \frac{1}{e} \approx 0,368 \quad (7)$$

Rastgele pürüzlü yüzeylerden elektromanyetik saçılım için modeller incelenmiştir. Literatürde en yaygın kullanılan korelasyon fonksiyonları Gauss ve üsteldir. Üstel ve Gauss fonksiyonları 8 ve 9. denklemlerde gösterilmektedir:

$$\text{Üstel: } C(\xi) = \exp\left(-\frac{\xi}{l_0}\right) \quad (8)$$

$$\text{Gauss: } C(\xi) = \exp\left(-\frac{\xi^2}{l_0^2}\right) \quad (9)$$

Elektromanyetik saçılım inceleneceğinden, Gauss korelasyon fonksiyonu tercih edilmelidir (Hoerack, 2015).

1.3.3. RMS Yüzey Eğimi

Rastgele pürüzlü bir yüzeyi tanımlamak için, daha önce bahsedilen l_0 ve σ_h parametreleri gereklidir. Bazı elektromanyetik saçılım modellerinde RMS yüzey eğiminden (β_0) yararlanıldığından yüzey eğimi daha detaylı şekilde anlatılacaktır. RMS yüzey eğimi, RMS yüzey yüksekliği ve yüzey korelasyon uzunluğundan hesaplanabilir. Yüzey eğimi β ile ifade edilecektir. 3 ve 4. denklemlerden yola çıkılarak yüzey korelasyon fonksiyonu denklem 10'daki gibi de ifade edilebilir.

$$B(\xi) = \sigma_h^2 C(\xi) \quad (10)$$

Daha önce yapılan rastgele değişen yüzey yüksekliği $h(x,y)$ 'nin x ve y eksenlerinde eş yönlü olması varsayımından yola çıkılarak; 2-boyutlu pürüzlü yüzey, xz -ekseninde $h(x)$ olarak tek boyuta indirgenebilir. Bu sadeleştirme esas alınarak belirli bir x konumundaki yüzey eğimi şöyle ifade edilebilir:

$$\beta(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{h(x + \Delta x) - h(x)}{\Delta x} \quad (11)$$

β^2 'nin ortalaması 11. denklem kullanılarak şu hale getirilebilir:

$$\begin{aligned} \langle \beta(x)^2 \rangle &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{h^2(x + \Delta x) - 2h(x)h(x + \Delta x) + h^2(x)}{(\Delta x)^2} \\ &= 2\sigma_h^2 \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left[\frac{1 - C(\Delta x)}{(\Delta x)^2} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

12. denklemdeki $C(\Delta x)$, $\xi = \Delta x$ yatay yer değişimi için normalize edilmiş yüzey korelasyon fonksiyonudur. $\Delta x = 0$ için Taylor serisi açılımı yazılıp gerekli sadeleştirmeler yapıldığında özellikle denklem 9'da belirtildiği gibi bir Gauss yüzey dağılım fonksiyonu için

RMS yüzey eğimi; RMS yüzey yüksekliği ve yüzey korelasyon uzunluğu cinsinden denklem 13'deki gibi ifade edilebilir:

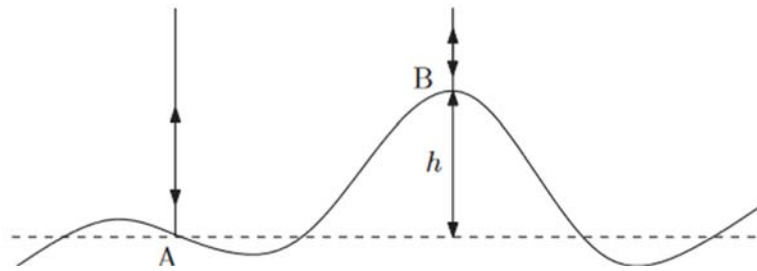
$$\beta_0 = \frac{\sqrt{2}h_0}{l_0} \quad (13)$$

1.4. Yüzey Pürüzlülüğünün Tanımlanması

Bu tanımlamanın yapılabilmesi için “Elektromanyetik konusu açısından bir yüzey hangi koşullarda pürüzlü sayılabilir?” sorusuna bir cevap verilmelidir. Ancak düzgün ve pürüzlü yüzeyler arasında keskin bir ayrım yapılamamaktadır. Rayleigh pürüzlülük kriteri, uygulamada bir yüzeyin pürüzlülüğünü tespit ya da tahmin etmek için geniş kullanım alanı olan bir yöntemdir. Diğer bir yüzey pürüzlülük tanımı, Fraunhofer pürüzlülük kriteri ile elde edilir.

1.4.1. Rayleigh Pürüzlülük Kriteri

Pürüzlü bir yüzeyin sahip olduğu tipik geometri aşağıdaki şekilde verilmiştir (Hoerack, 2015).



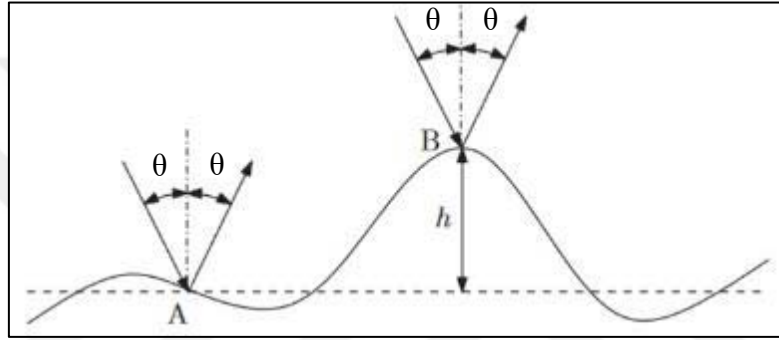
Şekil 2. Dik geliş açısı (Hoerack, 2015)

Şekil 2 incelendiğinde gelen iki ışın, yüzeydeki A ve B noktalarından yansımaktadır. Eğer yüzey kesikli çizgi ile gösterildiği gibi mükemmel düzgün olsaydı, yansıyan ışınların katettikleri yollar, diğer bir deyişle ışınların fazları farklı olmayacaktı. Şekil 2’de pürüzlü bir yüzeye dik olarak gelen iki ışın görülmektedir. Işınların dalga ile kesiştiği noktalardan B noktası, A noktasından Δh kadarlık yükselti farkına sahiptir. Dolayısıyla B noktasından

yansıyan ışın, $2\Delta h$ kadar daha kısa yol kat edecektir. Bu durumda da yansıyan iki ışın arasında aşağıda gösterildiği gibi bir faz farkı oluşacaktır:

$$\Delta\Phi = 2k\Delta h = \frac{4\pi\Delta h}{\lambda} \quad (14)$$

Denklem 14’de $k=2\pi/\lambda$ faz sabiti ve λ elektromanyetik dalga boyunu göstermektedir. Eğik gelme açısına sahip elektromanyetik dalgalar için Şekil 3 incelenmelidir (Hoerack, 2015).



Şekil 3. Eğik gelme açısı (Hoerack, 2015)

Şekil 3 için faz farkı ifadesi yeniden düzenlendiğinde:

$$\Delta\Phi = 2k\Delta h \cos\theta = \frac{4\pi\Delta h}{\lambda} \cos\theta \quad (15)$$

Denklem 15’deki θ , gelme açısını gösterir ve Şekil 3’de kesik yatay çizgilerle gösterilen mükemmel düzgün yüzeyden çıktığı varsayılan normalden ölçüm yapılarak elde edilir. x, y ve z kartezyen koordinatlarına göre; yansımanın gerçekleştiği yüzey xy düzleminde, yüzeyden çıkan normal de z ekseninde olacaktır.

Rayleigh pürüzlülük kriterine göre faz farkı $\Delta\Phi < \pi/2$ şartı için yüzey düzgün olarak kabul edilebilir. Düzgün bir yüzey için koşullu sonuçlar şu şekilde olur:

$$\Delta h < \frac{\lambda}{8\cos\theta} \quad (16)$$

Rastgele yüzeyler için; denklem 16’da bulunan Δh yükseklik parametresi, RMS yüzey yüksekliği σ_h ile yer değiştirebilir. Bu eşitsizlikten görüldüğü üzere Rayleigh pürüzlülük kriteri yalnızca üç parametrenin basit bir birleşimidir: yükseklik farkı Δh , elektromanyetik dalga boyu λ ve gelme açısı θ . Basit yapısından kaynaklı olarak bu formülasyon uygulamada çok yaygın olarak kullanılır.

1.4.2. Fraunhofer Pürüzlülük Kriteri

Yüzeylerin pürüzlülüğünün sınıflandırılması için kullanılan diğer bir yöntem Fraunhofer pürüzlülük kriteridir. Bu kriter, bir antenin uzak alan mesafesinin (far-field distance) tanımından yola çıkılarak oluşturulmuştur. Bu tanımlamaya göre; bir yüzeyin elektromanyetik olarak düzgün olduğunun varsayılabilmesi için, yansıyan ışınlar arasında $\Delta\phi < \pi/8$ koşulunu sağlayan bir faz farkı olmalıdır. Böylece; Δh , λ ve θ arasında Rayleigh pürüzlülük kriterinden farklı olarak Fraunhofer pürüzlülük kriteri denklem 17’deki gibi oluşmaktadır:

$$\Delta h < \frac{\lambda}{32\cos\theta} \quad (17)$$

Rastgele pürüzlü yüzeyler için yükseklik parametresi Δh , yüzey yüksekliği standart sapması σ_h ile yer değiştirebilir (Hoerack, 2015).

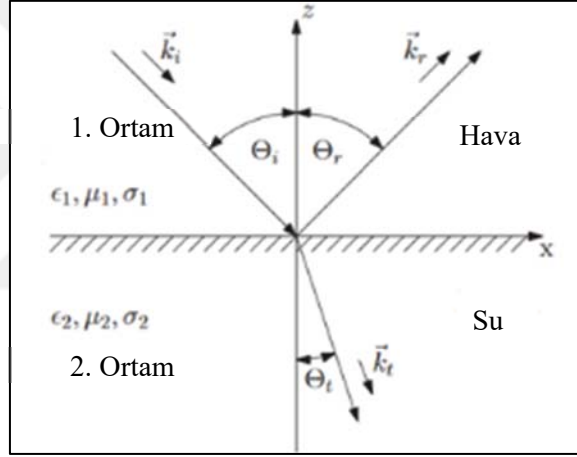
1.5. Deniz Yüzeyinde Elektromanyetik Dalga Propagasyonu Etkileri

Bir deniz ortamındaki EM dalga propagasyonu birçok işleyiş ve etkenden etkilenmektedir. Alıcı ve verici arasındaki direkt yolun (LoS) yanında, deniz yüzeyinden yansıma ve saçılmalarla kaynaklı çoklu yol bileşenleri oluşmaktadır. Kırınım, saçılma ve gölgeleme gibi ek etkiler, dünyanın eğriliği ve denizin pürüzlülüğünden kaynaklanmaktadır. Deniz üzeri elektromanyetik dalga propagasyonu mesafesi boyunca elektromanyetik dalgaları değiştiren bu etkilerden bahsedilecektir (Hoerack, 2015).

1.5.1. Yansıma (Reflection)

Bir ortamda yayılan bir elektromanyetik dalganın; elektriksel geçirgenlik (permittivity, ϵ), manyetik geçirgenlik (magnetic permeability, μ) ve elektriksel iletkenlik (σ) gibi farklı elektromanyetik özelliklere sahip başka bir ortama çarpması sonucunda yansıma olayı oluşmaktadır. Yansıma, elektromanyetik dalgaların ikincil bir ortamla etkileşimi sonucu oluşur. Yansıyan dalganın enerjisi, gelen dalganın enerjisinden her zaman ya az ya da eşittir. Ayrıca, yansıyan enerji miktarı elektromanyetik dalganın kutuplanma türüne de bağlıdır (Hoerack, 2015).

Tipik bir yansıyan dalga geometrisi aşağıdaki şekilde gösterilmektedir (Hoerack, 2015).



Şekil 4. Bir elektromanyetik dalganın yansıma ve ortam geçişi

Şekil 4 incelendiğinde gelen dalga ile ilgili bileşenlerin i indisi ile, yansıyan ve iletilen dalga bileşenlerinin de sırasıyla r ve t indisleriyle simgelendiği görülmektedir. θ simgesi ile gösterilen açılar, birinci ve ikinci ortamın sınır yüzeyine dik olan normal vektörüne göre ölçülür. Snell Yansıma Yasası'na göre gelen ve yansıyan dalga açıları arasında $\theta_i = \theta_r$ ilişkisi mevcuttur. Bu sebeple, yüzeyler arası sınıra ulaşan dalga aynasal yansıma uğrayacaktır. Deniz üzerinde haberleşme konusu ele alındığından, birinci ortam hava ve ikinci ortam da deniz suyu olarak ele alınacaktır. Gelen, yansıyan ve iletilen dalgaların dalga vektörleri genellikle şu şekilde tanımlanır:

$$\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\vec{k}}{|\vec{k}|} \rightarrow k = |\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (18)$$

Denklem 18'deki k , faz sabiti olarak adlandırılır. Yansıyan elektrik alanı gelen elektrik alan cinsinden hesaplayabilmek adına, gelen elektrik alanın dikey ve yatay kutuplanma türleri için yaygın olarak kullanılan Fresnel yansıma katsayıları kullanılır. Şekil 4'de görüldüğü üzere; dikey kutuplanma (v indisi), dikey xz -düzlemindeki elektrik alan vektörüne karşılık gelmektedir. Benzer şekilde; yatay kutuplu (h indisi) bir elektromanyetik dalga, yatay xy -düzlemindeki bir elektrik alan vektörünü içermektedir. Dikey ve yatay kutuplanmalar için Fresnel yansıma katsayıları sırasıyla şöyle tanımlanır:

$$\Gamma_v = \frac{(\epsilon_r - j\chi)\sin\psi - \sqrt{\epsilon_r - j\chi - (\cos\psi)^2}}{(\epsilon_r - j\chi)\sin\psi + \sqrt{\epsilon_r - j\chi - (\cos\psi)^2}} \quad (19)$$

$$\Gamma_h = \frac{\sin\psi - \sqrt{\epsilon_r - j\chi - (\cos\psi)^2}}{\sin\psi + \sqrt{\epsilon_r - j\chi - (\cos\psi)^2}} \quad (20)$$

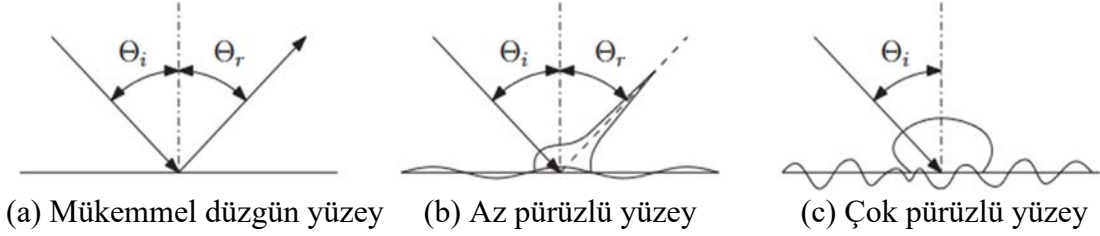
Denklem 19 ve 20'de ψ , gelme açısının 90° tamlayanı olan sıyırma açısı (grazing angle); ϵ_r , bağıl dielektrik katsayısı ve p de iletkenlik olarak tanımlanmıştır. $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} F/m$ için χ , denklem 21 ile bulunur (Collin, 1985). $|\Gamma|$, 0 ile 1 arasında değerler almaktadır (Bansal, 2006).

$$\chi = p/(\omega\epsilon_0) \quad (21)$$

1.5.2. Pürüzlülük (Roughness)

Saçılma, yansıma ile ilişkili bir propagasyon olayıdır. Yansıma veya saçılmanın meydana gelip gelmeyeceği; gelen dalganın dalga boyu λ 'nın, yansıtan nesnenin boyutlarına oranı ile belirlenir. Bu çalışmanın odaklandığı konu deniz yüzeyinden yansıma ve saçılma olduğundan, yansıtan nesnenin yani deniz dalgasının boyutları yüzey pürüzlülük derecesi olarak verilecektir. Bu nedenle deniz pürüzlülüğü ile karşılaştırıldığında; λ 'nın küçük olduğu durumlarda yansıma, büyük olduğu durumlarda saçılma gerçekleşir. Saçılma olayında;

aynasal yansımanın aksine, gelen dalga'nın yansıyan enerjisi yalnızca belirli bir yönde değil ($\theta_i = \theta_r$) her yöne dağınık olarak saçılır. Yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak, aynasal yansımadan dağınık saçılmaya dönüşüm Şekil 5'de gösterilmiştir (Hoerack, 2015).



Şekil 5. Farklı seviyede yüzey pürüzlülüğüne bağlı saçılma durumları (Hoerack, 2015)

Şekil 5'de (a) durumu incelendiğinde mükemmel düzgün bir yüzey için, gelen dalga aynasal (tam, specular) yansıyacaktır ve dağınık saçılan bir bileşen olmayacaktır. Bu durumda yansıyan elektrik alan, yukarıda anlatıldığı üzere Fresnel yansıma katsayısı ile hesaplanır. Yüzey pürüzlülüğü derecesi arttıkça aynasal yansıyan bileşenler azalırken, saçılan bileşenler artacaktır. Bu durum; Şekil 5'de görülen (b) ve (c) yansımaları için, yani çok pürüzlü yüzey durumunda gelen dalga'nın tamamı dağınık saçılana kadar devam eder. Aynasal yansıyan bileşenlerin enerjisindeki azalmayı hesaplayabilmek için Rayleigh pürüzlülük kriterini esas alan pürüzlülük katsayısı (saçılma kaybı faktörü) ρ_s ortaya konulmuştur (Hoerack, 2015). Pürüzlülük parametresi (ρ_s) 0 ile 1 arasında değerler almaktadır (Bansal, 2006).

$$\rho_s = \exp[-2(2\pi g)^2] \cdot I_0(2(2\pi g)^2) \quad (22)$$

Denklem 22'deki I_0 , sıfırıncı mertebe birinci tür modifiye Bessel fonksiyonunu; g ise denklem 23'de verildiği haliyle pürüzlülük parametresini ifade etmektedir.

$$g = \frac{\sigma_h \cdot \sin \psi}{\lambda} \quad (23)$$

Denklem 23'de σ_h , RMS yüzey yüksekliğini (RMS surface height); ψ , sıyırma açısını göstermektedir. Pürüzlü bir yüzey için etkin (modifiye) yansıma katsayısı şöyle ifade edilir:

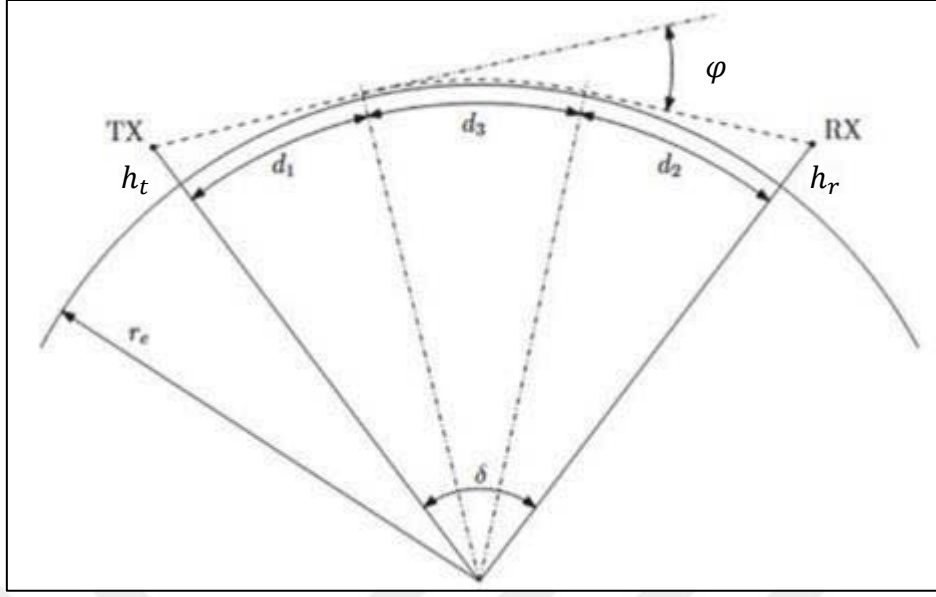
$$\Gamma_{eff} = \Gamma \rho_s \quad (24)$$

Γ yerine, denklem 19 ve 20’de bahsedilen sırasıyla dikey ve yatay kutuplu dalga için Fresnel yansıma katsayıları kullanılır (Miller vd., 1983).

1.5.3. Kırınım (Diffraction)

Geometrik bir bakış açısı ile; dünyanın eğriliğinden kaynaklı, deniz yüzeyinde alıcı ve verici arasındaki radyo dalgası iletimi mesafeye bağlı olarak belirli bir noktadan sonra mümkün olmayacaktır. Ancak direkt görüşün (LoS) kaybolduğu durumlarda (NLoS) bile kırınım olayı sayesinde elektromanyetik dalganın propagasyonu mümkün olabilmektedir. Bu olağan dışı durum Huygens – Fresnel prensibi ile açıklanabilir. Bu prensibe göre; bir elektromanyetik dalga cephesini (wavefront – aynı faza sahip noktaların oluşturduğu küme) oluşturan tüm noktalar, ikincil dalgacıklar (wavelets) üreten kendine özgü nokta kaynakları olarak tanımlanabilir. Sonuçta propagasyon yönünde oluşan dalga cephesi, tüm ikincil dalgacıkların elektrik ve/veya manyetik alan vektörlerinin vektörel toplamı olarak hesaplanabilir. Böylece elektromanyetik dalgalar, engellenen bölgelere bile yayılma özelliği kazanırlar. Alan gücü, Şekil 6’da gösterilen φ açısının artışı ile hızlıca azalmaktadır. Eğimli dünya yapısını göz önüne aldığımızda, dalgaların bu özelliğinden dolayı alıcı ve verici arasındaki menzil artar ve kırınım olayı da bir propagasyon kaybı olarak dikkate alınır.

Direkt görüş ötesi için TX verici, RX alıcıyı ifade etmek üzere eğimli dünya ortamında dalga propagasyonu Şekil 6’da gösterilmektedir (Hoerack, 2015):



Şekil 6. Dünyanın eğriliğinden kaynaklı kırınım

Şekil 6’da küresel dünyanın yarıçapı r_e ($\approx 6370\text{km}$) ve elektromanyetik dalganın izlediği yol da kesikli çizgilerle gösterilmektedir. Şekil 6 incelendiğinde, alıcı ve verici antenler ile ufuk arasındaki yay uzunlukları şu şekilde verilmektedir:

$$d_1 = \sqrt{2k_e r_e h_t} \quad (25)$$

$$d_2 = \sqrt{2k_e r_e h_r} \quad (26)$$

Denklem 25 ve 26 için; h_t ve h_r sırasıyla, verici ve alıcı antenlerin küresel dünyadan yüksekliklerini ifade etmektedir. Ayrıca k_e , dünyanın gerçek ve etkin yarıçapları arasındaki oranı temsil etmektedir. Alıcı ve verici arasındaki toplam yatay d mesafesi, denklem 27’de gösterildiği üzere d_1 , d_2 ve d_3 yay uzunluklarından oluşmaktadır:

$$d = d_1 + d_2 + d_3 \quad (27)$$

Daha önce belirtilmemiş olan d_3 , alıcı ve verici ufuklarının ötesindeki yay uzunluğunu göstermektedir. d mesafesi için başka bir gösterim ise şu şekildedir:

$$d = r_e \delta \quad (28)$$

δ , küresel dünyanın merkezine göre alıcı ve verici arasındaki açıyı ifade etmektedir. L_{Diff} olarak belirtilen toplam kırınım kaybı, 3 farklı d mesafesi için ayrı ayrı aşağıdaki denklemlerde ifade edilen kayıpların değerlendirilmesiyle elde edilir.

$$L_1 = 20 \log_{10} \left(\frac{N_1}{\sqrt{5.656\pi\zeta_1}} \right) \quad (29)$$

$$L_2 = 20 \log_{10}(N_2) \quad (30)$$

$$L_3 = 0.0086\zeta_3^3 + 0.2063\zeta_3^2 + 11.0997\zeta_3 - 0.8934 \quad (31)$$

Denklem 29, 30 ve 31'deki kayıp ifadeleri sırasıyla d_1 , d_2 ve d_3 mesafelerindeki kayıpları ifade etmektedir.

$$20 \log_{10}(N_n) = -0.5 + 35 \log_{10}(\zeta_n) + 10 \log_{10}(F_{s,n}), \quad (n = 1, 2) \quad (32)$$

$$\zeta_n = \left(\frac{2\pi d_n}{\lambda} \right) \left(\frac{2\pi k_e r_e}{\lambda} \right)^{-\frac{2}{3}}, \quad (n = 1, 2, 3) \quad (33)$$

$$20 \log_{10}(F_{s,n}) = -0.048\zeta_n + 1.0875\zeta_n + 4.0782\zeta_n - 0.8806 \quad (34)$$

Denklem 32, 33 ve 34'de L_1 ve L_2 ve L_3 kayıplarının hesabı için gerekli parametrelerin hesaplamaları verilmiştir.

REL modeli için kırınımın kaybı, propagasyon hesabına üç şekilde eklenmektedir. Bunun tespiti için öncelikle D_{06} (ilk Fresnel bölgesinin %60'ına karşılık gelen mesafe) değeri denklem 35'deki gibi hesaplanmalıdır.

$$D_{06} = \frac{D_f D_h}{D_f + D_h} \quad (35)$$

Denklem 35 için D_f ve D_h sırasıyla denklem 36 ve 37'deki gibi hesaplanır.

$$D_f = 0.0000389fh_th_r \quad (36)$$

$$D_h = 4.1(\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}) \quad (37)$$

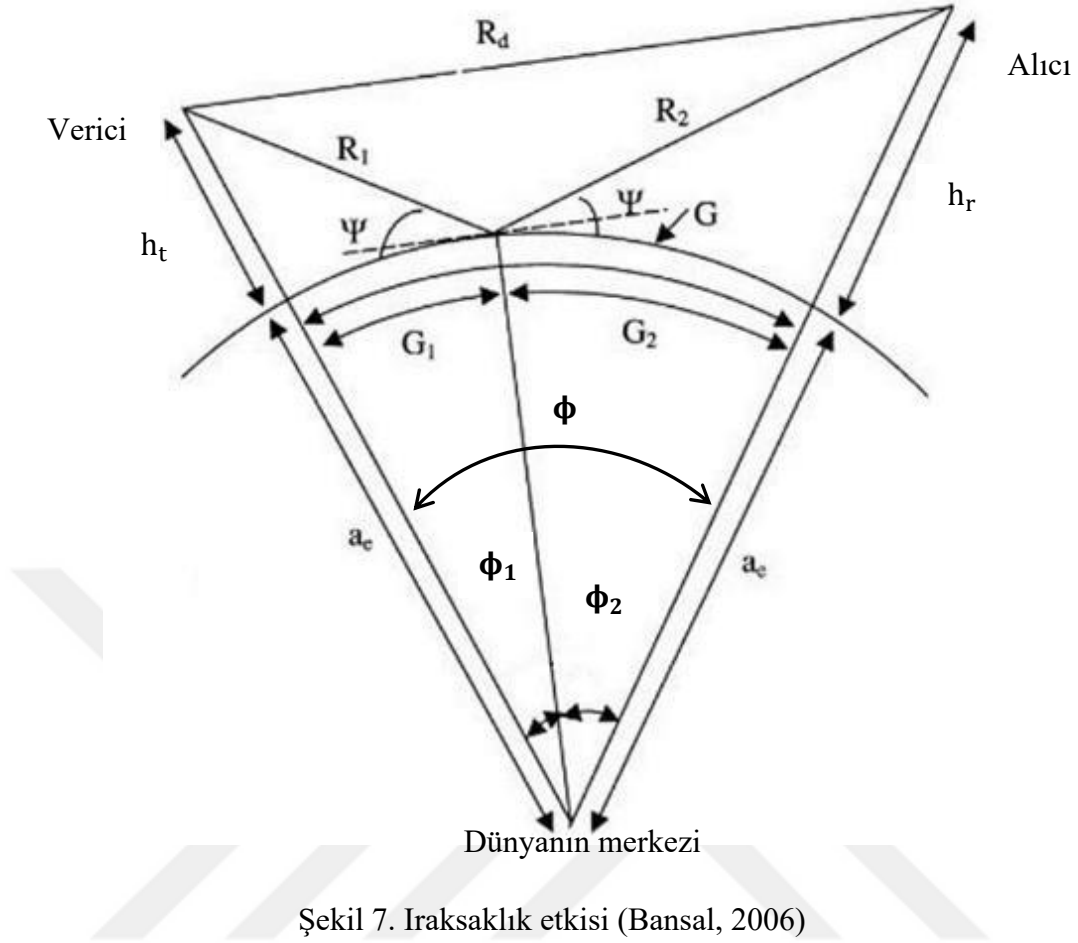
Denklem 36 ve 37 yardımı ile elde edilecek olan D_{06} mesafesi için kırınım kaybı L_{Diff} denklem 38'deki gibi değerlendirilir (Hoerack, 2015). Denklem 36 ve 37 için frekans MHz ve alıcı-verici anten yükseklikleri m cinsinden hesaba katıldığında sonuçlar km olarak elde edilecektir.

$$L_{Diff} = \begin{cases} L_1 + L_2 - |L_3| & d \geq d_1 + d_2 \\ L_1 + L_2 + |L_3| & D_{06} < d < d_1 + d_2 \\ 0 & d < D_{06} \end{cases} \quad (38)$$

Denklem 38 irdelendiğinde; $d \geq d_1 + d_2$ için alıcı ve vericinin ufuk ötesinde konumlandıkları yani direkt görüşün gerçekleşmediği (NLoS) söylenebilir. Bu durumda L_{Diff} kaybı hızlıca artacaktır. $d_3 \geq 0$ ve bu mesafeye karşılık gelen L_3 kırınım kaybı da negatif olacaktır. $D_{06} < d < d_1 + d_2$ şartı için alıcı ve verici antenler arasında direkt görüşün (LoS) olduğu söylenebilir. Şartın sağlanabilmesi için matematiksel olarak d_3 mesafesinin negatif olduğu ve buna karşılık gelecek L_3 kırınım kaybının pozitif olacağı yorumu yapılabilir. $d < D_{06}$ şartı oluştuğunda herhangi bir kırınım kaybı gözlemlenmez ve $L_{Diff} = 0dB$ olur.

1.5.4. Iraksaklık (Divergence)

Iraksaklık olarak adlandırılan olağan dışı durum; eğri dünya yüzeyinden yansımanın sonucu olarak, bir elektromanyetik dalganın güç yoğunluğunda ek bir azalma olarak tanımlanır. Şekil 7'de, ıraksaklıktan etkilenen radyo dalgası iletim sisteminin basit bir geometrisi gösterilmektedir (Hoerack, 2015).



Şekil 7. İraksaklık etkisi (Bansal, 2006)

Şekil 7 incelendiğinde G_1 ve G_2 ; sırasıyla verici ve alıcı ile yansımanın gerçekleştiği geometrik noktanın arasındaki yere göre ölçülen yatay mesafelerdir. R_1 ve R_2 ise yine sırasıyla verici ve alıcı antenin yansıma noktası ile arasındaki mesafelerdir. ψ , gelen ve yansıyan dalganın yükselti açısını ifade eder. h_t ve h_r büyüklükleri de sırasıyla verici ve alıcı için küresel dünyadan yükseklikleri gösterir. R_d , alıcı ve verici arasında direkt dalganın katettiği mesafeyi; ϕ , ϕ_1 ve ϕ_2 de sırasıyla G , G_1 ve G_2 yaylarına karşılık gelen merkez açıları simgelemektedir.

Dünyanın eğriliğinden kaynaklı olarak, dalga cephesi elemanlarının her birinin gelme açıları eğri yüzey üzerindeki tüm noktalar için aynı olmayacaktır. Yüzeye temas eden elektromanyetik dalgalar farklı doğrultularda ıraksamaktadır. Bu etkiyi tam olarak hesaba katabilmek amacıyla, ıraksaklık katsayısı 'D' ile Fresnel yansıma katsayısı çarpılır. İraksaklık katsayısı aşağıdaki denklemde ifade edilmiştir.

$$D = 1 / \sqrt{1 + \frac{2G_1 G_2}{a_e G \sin \psi}} \quad (39)$$

Denklem 39’da G_1 ve G_2 , yansıma noktası ile verici ve alıcı arası mesafe; a_e , etkin dünya yarıçapı ve ψ de sıyırma açısını (grazing angle) ifade eder. Alıcı ve verici arasındaki mesafe $G = G_1 + G_2$ ’dir. G_1 ve G_2 mesafelerinin hesaplanması için denklem 40 ve 41 kullanılmaktadır.

$$G_1 = \frac{G}{2} + p \cos \frac{\pi + \alpha}{3} \quad (40)$$

$$G_2 = G - G_1 \quad (41)$$

Denklem 40’da belirtilen G_1 mesafesinin hesabı için denklem 42 ve 43’deki hesaplamalar yapılır.

$$p = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{a_e(h_t + h_r) + \frac{G^2}{4}} \quad (42)$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{2a_e(h_t - h_r)G}{p^3} \right) \quad (43)$$

Iraksaklık katsayısı (D) hesabında ihtiyaç duyulacak bir diğer parametre olan ψ açısının hesabı için verici anten-yansıma noktası (R_1) ve yansıma noktası-alıcı anten arasında (R_2) elektromanyetik dalganın katettiği mesafelerin de hesaplanması gerekmektedir.

$$\phi_i = \frac{G_i}{a_e}, \quad i = 1, 2 \quad (44)$$

$$R_1 = \sqrt{h_t^2 + 4a_e(a_e + h_t) \sin^2 \left(\frac{\phi_1}{2} \right)} \quad (45)$$

$$R_2 = \sqrt{h_r^2 + 4a_e(a_e + h_r)\sin^2\left(\frac{\phi_2}{2}\right)} \quad (46)$$

Denklem 44, 45 ve 46 sonucu elde edilecek değerler denklem 47’de kullanılarak sıyırma açısı da bulunabilir (Bansal, 2006).

$$\psi = \sin^{-1}\left(\frac{2a_e h_t + h_t^2 - R_1^2}{2a_e R_1}\right) \quad (47)$$

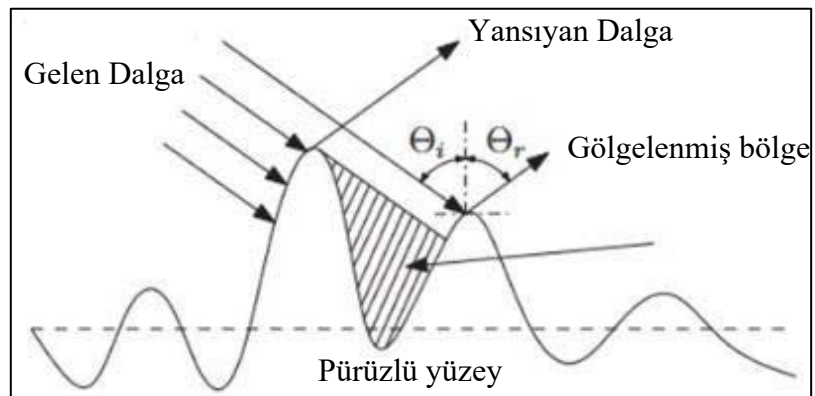
Sonuçta ıraksaklık etkisi de göz önüne alınarak yazılabilecek yansıma katsayısı şöyle olacaktır:

$$\Gamma_D = D \cdot \Gamma \quad (48)$$

Sonuç denklemi olan denklem 48’de Γ , belirlenmiş bir kutuplanma türü için Fresnel yansıma katsayısını simgelemektedir (Hoerack, 2015). D katsayısı, 0 ile 1 arasında bir değer almaktadır (Bansal, 2006).

1.5.5. Gölgeleme (Shadowing)

Yerkürenin kavisli şeklinden kaynaklı ortaya çıkan kırınım ve ıraksaklık etkilerinin aksine; gölgeleme, Şekil 8’de gösterildiği gibi yüzeydeki pürüzlülük sebebiyle ortaya çıkmaktadır (Hoerack, 2015).



Şekil 8. Pürüzlü yüzeyden kaynaklı gölgeleme etkisi (Hoerack, 2015)

Şekil 8 incelendiğinde gelen elektromanyetik dalganın pürüzlü yüzeyden yansıdığı görülmektedir. Şekil 8’de ortalama yüzey kesikli çizgilerle gösterilirken, gelme açısı θ_i de ortalama yüzeyin normaline göre ölçülmektedir. Deniz yüzeyindeki dalgalanmadan kaynaklı olarak yüzeydeki bazı bölgelere (Şekil 8’deki gölgelenmiş bölge) elektromanyetik dalga ulaştırılamaz ya da başka bir deyişle bu bölgeler elektromanyetik ışıma açısından aydınlatılamaz. Bu sebeple de gölgeli alanlarda yansıma olayı gerçekleşmez. Iraksaklık etkisinde olduğu gibi; gölgeleme etkisi de düzgün bir yüzey için verilen Fresnel yansıma katsayısı ile gölgeleme faktörü S ’nin çarpılması ile hesaplamalara katılır. Literatürde bu katsayının farklı tanımlamaları mevcuttur. En yaygın olarak aşağıda belirtilen iki tanım kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi;

$$S = \frac{1 - 0.5\operatorname{erfc}\left(\frac{\cot\theta_i}{\sqrt{2\beta_0}}\right)}{\Lambda(\theta_i, \beta_0) + 1} \quad (49)$$

Denklem 49 için β_0 , yüzey eğiminin karekök ortalaması (RMS); erfc , tamamlayıcı hata fonksiyonunu ifade etmektedir. Λ ise denklem 50’deki gibi verilmiştir:

$$\Lambda(\theta_i, \beta_0) = \frac{1}{2} \left[\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\beta_0}{\cot\theta_i} \exp\left(\frac{\cot^2\theta_i}{2\beta_0^2}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{\cot\theta_i}{\sqrt{2\beta_0}}\right) \right] \quad (50)$$

Bistatik (bir cisimden hem ışının geldiği kaynağa doğru hem de bir açı ile başka yönlerde yansıma gerçekleşmesi) saçılma bağlamında, başka bir gölgeleme faktörü denklem 51’deki gibi ifade edilmiştir:

$$S = \frac{1}{1 + \Lambda(\theta_i, \beta_0) + \Lambda(\theta_r, \beta_0)} \quad (51)$$

Yukarıda gösterilen farklı denklemlerden bağımsız olarak S , 0 ve 1 arasında değişen değerler alır ve Fresnel yansıma katsayısı Γ ’yı azaltır. Böylece gölgelemeyi hesaba katan etkin yansıma katsayısı denklem 52’deki gibi tanımlanır (Hoerack, 2015). Bu çalışma kapsamında gölgeleme etkisinin hesabı için denklem 49 kullanılmıştır.

$$\Gamma_s = S\Gamma \quad (52)$$

1.5.6. Yağmur Zayıflatması

Yağmurlu bir çevrede yapılan propagasyon esnasında suyun oluşturduğu kayıplı dielektrik ortamın dalga gücünü soğurması nedeniyle radyo dalgaları zayıflar. Ayrıca yağmur damlalarından kaynaklı olarak dalga demeti dışına enerji saçılımı etkisi nedeniyle direkt iletilen dalgada da kayıp oluşur. Genellikle saçılma kaybı, soğurma kaybından nispeten küçüktür. Yağmur zayıflatması teorisi, tek bir yağmur damlasının kesit yüzeyine göre yapılan hesaplamalara dayanmaktadır (Collin, 1985).

İletişim sistemlerinin tasarımı için yağış hızı, frekans ve sıcaklığa bağlı nispeten basit bir yapıya sahip bir denkleme ihtiyaç duyulmaktadır. İhtiyaç duyulan basit yaklaşım denklem 53’de verilmiştir.

$$A = aR^b dB/km \quad (53)$$

Denklem 53’de R, mm/h cinsinden yağış hızı; a ve b de frekans ve yağmur sıcaklığına bağlı katsayılarıdır. Denklemin sıcaklıkla ilişkilendirilmesinin nedeni, su sıcaklığına bağlı olarak dielektrik katsayısının değişimidir (Olsen vd., 1978). 0°C sıcaklık değerinde a ve b katsayıları için deneysel formüller denklem 54 ve 55’de verilmiştir.

$$a = G_a f^{E_a} \quad (54)$$

$$b = G_b f^{E_b} \quad (55)$$

Denklem 54 ve 55’deki f parametresi, GHz cinsinden elektromanyetik dalga frekansını ifade etmektedir. G_a , E_a , G_b ve E_b ’nin çalışılan frekansa bağlı değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Frekans değerine bağlı G_a , E_a , G_b ve E_b katsayılar tablosu

G_a	E_a	f
6.39×10^{-5}	2.03	$f < 2.9 \text{ GHz}$
4.21×10^{-5}	2.42	$2.9 \text{ GHz} \leq f \leq 54 \text{ GHz}$
4.09×10^{-2}	0.699	$54 \text{ GHz} \leq f \leq 180 \text{ GHz}$
3.38	-1.151	$180 \text{ GHz} < f$
G_b	E_b	f
0.851	0.158	$f < 8.5 \text{ GHz}$
1.41	-0.0779	$8.5 \text{ GHz} \leq f \leq 25 \text{ GHz}$
2.63	-0.272	$25 \text{ GHz} \leq f \leq 164 \text{ GHz}$
0.616	0.0126	$164 \text{ GHz} \leq f$

1.6. Deniz Kanalı Propagasyon Modelleri

Dalga propagasyonu terimi, ayrıntılı analizler gerektiren dalga ve propagasyon olmak üzere iki bileşene ayrılabilir. Genel bir tanım olarak propagasyon, madde aktarımı yapmadan enerjinin aktarımı olarak tanımlanabilir. Belirli bir ortamda iki nokta arasında enerji aktarımı, o ortamdaki durağan olmayan alanın konumsal dağılımının zamana bağlı değişiminin bir sonucudur. Bu makroskobik seviyede uygun olan yaklaşım; elektromanyetik, akustik, ısı ve diğer alanlarda birçok fiziksel fenomene uygulanabilir (Boithias, 1987).

1.6.1. ITU-R P.1546-2 Yol Kaybı Modeli

ITU-R P.1546-2 Tavsiyesi; 30-3000 MHz frekans aralığında, karasal hizmetler için noktadan alana propagasyon tahminleri öneren bir yöntemdir. ITU-R modeli; dB ($\mu\text{V/m}$) cinsinden elektrik alan şiddetini, km cinsinden d mesafesinin (1-1000km) bir fonksiyonu olarak veren propagasyon eğrilerine dayanmaktadır. Tavsiye içeriğinde verilen eğriler aşağıdaki parametrelere göre oluşturulmuştur:

- 1kW etkin yayılan güce (ERP – effective radiated power) sahip verici

- 100 MHz, 600 MHz ve 2000 MHz'lik f anma frekansları
- 10m alıcı anten yüksekliği
- 10, 20, 37.5, 75, 150, 300, 600 ve 1200m verici anten yükseklikleri
- %50, %10 ve %1'lik t yüzdeler zaman değerleri

Yüzdelik zaman; propagasyon eğrilerinin karşılık gelen alan şiddeti değerlerinin, zamanın %50, %10 ve %1'i için aşıldığı anlamına gelir. Bu yöntem, yüzdelik zamanın %1'den küçük ve %50'den büyük olduğu durumlarda geçerli değildir. Ayrıca yöntem dahilinde; karada, soğuk denizde (Kuzey Denizi) ve sıcak denizde (Akdeniz) propagasyon olmak üzere farklı eğriler verilmektedir. Yukarıda bahsedilen parametrelerden bağımsız olarak; verilen tüm alan şiddeti değer eğrileri, konumların (500m x 500m'lik bir alan içinde) %50'si için aşılmaktadır. Eğrilerde sağlanan değerlerin tamamı, gerekli parametreler için (f, h_1 , h_2 ve t) karşılık gelen değerler olamamaktadır. Ara alan değerlerini elde etmek için adım adım bir interpolasyon (ara değer bulma) ve/veya ekstrapolasyon (dış değer bulma) prosedürü tahmin yöntemi olarak kullanılmıştır. Tüm prosedür 17 adımdan oluşmaktadır ve ITU-R P.1546-2 Tavsiyesi içeriğinde tanımlanmaktadır (Hoerack, 2015). Çalışmamız kapsamında kullanılan 5.6 GHz frekans bandı ITU-R P.1546-2 modeli frekans aralığında olmadığından bu yöntem için değerlendirmeler yapılmamıştır.

1.6.2. Serbest Uzay Yol Kaybı Modeli

Serbest uzay yol kaybı modeli (FSPL – free space path loss), alıcı ve verici arasında engelsiz direkt bir görüş yolunun (LoS) bulunduğu durumlarda alıcıya gelen işaret şiddetinin tahmini için kullanılmaktadır. Uydu sistemleri ve direkt görüşe sahip mikrodalga radyo linkleri serbest uzay propagasyonu olarak değerlendirilebilir. Birçok büyük ölçekli radyo dalgası propagasyon modelinde olduğu gibi; serbest uzay yol kaybı modeli de alıcıda alınan gücü, alıcı ve verici arasındaki mesafenin güç yasasına göre bir fonksiyonu olarak tahmin etmektedir. d mesafesi kadar uzaklıkta bulunan verici antenden ışıyan enerjinin alıcı anten tarafından alınan serbest uzay işaret gücü, Friis iletim denklemi ile denklem 56'da verilmektedir (Rappaport, 2002).

$$P_r = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 P_t \quad (56)$$

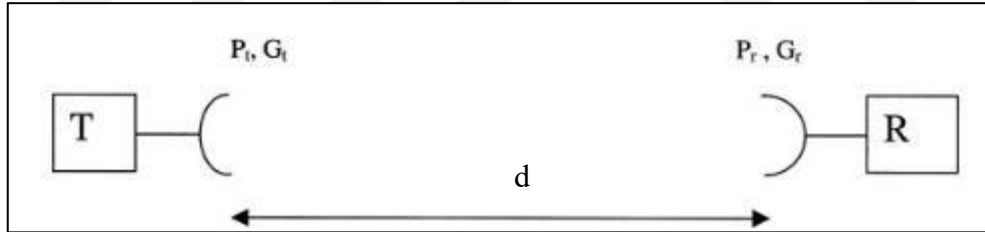
Denklem 56’da P_t , verici gücü; P_r , alıcıdaki işaret gücü; G_t , verici anten kazancı; G_r , alıcı anten kazancı; d , alıcı-verici arası mesafe [m] ve λ da dalga boyunu [m] ifade etmektedir. P_t ve P_r değerleri aynı birimlerle ifade edilmelidir. G_t ve G_r değerleri oranı ifade etmektedir ve birimleri yoktur. Kazanç ifadesinin (G) hesabı aşağıdaki denklemle yapılmaktadır.

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (57)$$

Denklem 57’de A_e , antenin fiziksel boyutlarıyla ilişkili etkin anten açıklığını; λ da denklem 58’deki hesaplama ile dalga boyunu ifade etmektedir.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (58)$$

Denklem 58’de c , $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ değerine sahip ışık hızını; f de Hz birimi ile taşıyıcı frekansı göstermektedir (Rappaport, 2002). Şekil 9’da bir alıcı ve vericiden oluşan basit bir kablosuz bağlantı için propagasyon sistemi gösterilmektedir.



Şekil 9. Temel bir kablosuz iletişim bağlantısı (Bansal, 2006)

Şekil 9’da T, vericiyi; R de alıcıyı ifade etmektedir. Friis iletim denkleminin uygulanabilmesi için antenlerin birbirlerine göre uzak alan bölgesinde olmaları gerekir. Friis iletim denkleminde alınan güç, d mesafesinin karesine ($1/d^2$) bağlı olarak azalmaktadır. Bir başka deyişle bu denklem sonucu elde edilecek alıcıdaki güç, mümkün olan en yüksek güç değerini hesaplamaktadır. Ancak gerçek kablosuz sistemlerde alınan gücü olumsuz etkileyen birçok etken mevcuttur. Friis iletim denkleminde alınan işaret gücü $P_t G_t$ çarpımına bağlıdır. Bu çarpım “etkin eş yönlü ışıma gücü (effective isotropic radiated power, EIRP)” olarak denklem 59’daki gibi tanımlanmaktadır.

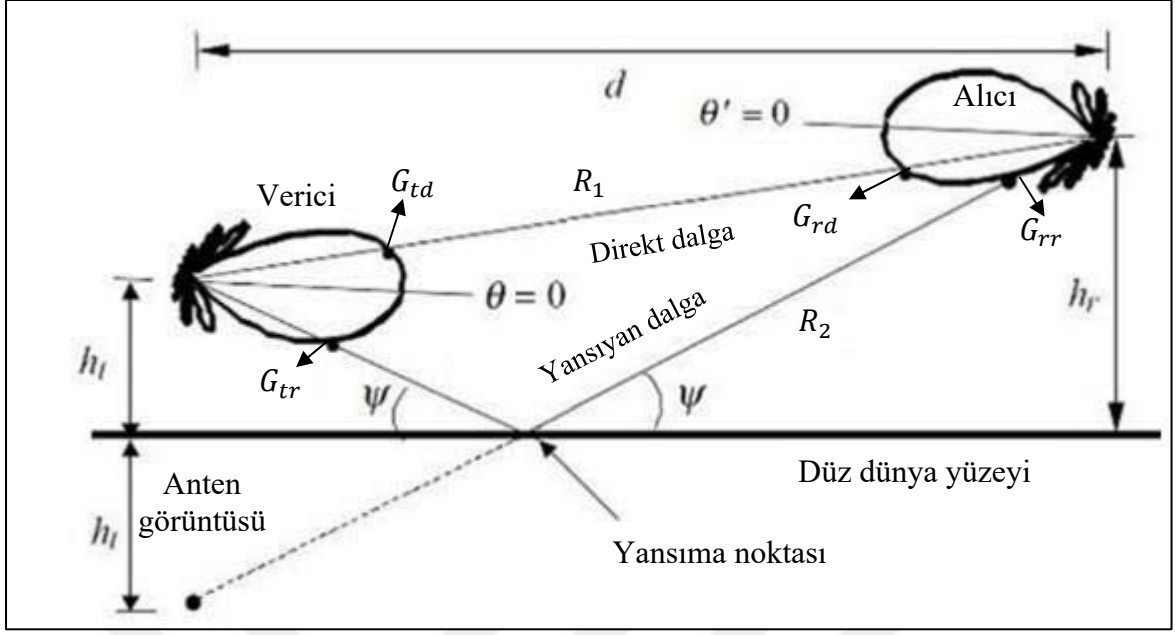
$$EIRP = P_t G_t \quad (59)$$

EIRP değeri; bir vericiden, eş yönlü bir antene oranla maksimum anten kazancı yönünde yayılabilecek maksimum ışıma gücünü ifade etmektedir (Bansal, 2006).

1.6.3. 2-Işınlı Yol Kaybı Modeli

Serbest uzay propagasyonu, esasen uydu-yer iletişiminde olduğu gibi ideal koşullar altında gerçekleşmektedir. Ancak iletişim sistemlerinin çoğu; dünyanın, atmosferin, iyonosferin ve yağmur damlası, kar ve dolu gibi su ve su buharı kaynaklı hava koşullarının etkisi altında çalışmaktadır. Radyo dalgalarının propagasyonuna doğal çevrenin etkisi; kullanılan frekansa, antenlerin yönlülüğüne ve yere yakınlığına oldukça bağlıdır. Propagasyonun gerçekleştiği iletişim yolunun fiziksel doğası da en önemli etkiler arasındadır. Çünkü deniz üzeri, karada, yeşillik arazide, kırsalda veya şehirde gerçekleştirilecek iletişim için farklı propagasyon ortamları oluşacak ve buna bağlı olarak farklı kırınım ve saçılım etkileri ortaya çıkacaktır. Önerilecek bir iletişim sisteminin değerlendirilmesinde propagasyon etkilerinin incelenmesi kaçınılmazdır (Collin, 1985).

Dünya üzerine yerleştirilen antenler ile ilişkili girişim etkisinin belirlenebilmesi için antenlerin üzerine yerleştirildiği düz dünyanın etkileri irdelenmelidir. Şekil 10'da düz dünya üzerine yerleştirilen alıcı ve verici antenler ile oluşturulan propagasyon sistemi ve yer yüzünün etkisi görülmektedir.



Şekil 10. Direkt ve yansıyan ışınların gösterimi (Jenn, 2012)

Şekil 10'da h_t , verici anten yüksekliği; h_r , alıcı anten yüksekliği; d , alıcı-verici arası yatay mesafe; R_1 , direkt dalganın katettiği mesafe; R_2 , yansıyan dalganın katettiği mesafe; ψ , sıyırma açısı (grazing angle); θ ve θ' , verici ve alıcı antenlerin maksimum kazanç doğrultuları; G_{td} , verici antenin direkt dalga doğrultusundaki kazancı; G_{tr} , verici antenin yansıyan dalga doğrultusundaki kazancı; G_{rd} , alıcı antenin direkt dalga doğrultusundaki kazancı ve G_{rr} de alıcı antenin yansıyan dalga doğrultusundaki kazancı göstermektedir. Şekil 10'da ayrıca verici antenden çıkarak alıcı antene ulaşan direkt ve yansıyan yöndeki dalga yolları da görülmektedir. R_2 mesafesine bağlı olarak alıcıda yıkıcı ya da yapıcı girişim gerçekleşmektedir. Şekil 10'a göre alıcı antene direkt ulaşan alanın burada üreteceği gerilim (E_{direct}) denklem 60'daki gibi ifade edilmektedir (Collin, 1985).

$$E_{direct} \propto G_{td} G_{rd} \frac{e^{-jkR_1}}{4\pi R_1} \quad (60)$$

Denklem 60'da belirtilen direkt dalganın katettiği mesafeyi gösteren R_1 , denklem 61'deki gibi hesaplanır. Denklem 60'da k ($2\pi/\lambda$) ile belirtilen parametre faz sabitini göstermektedir.

$$R_1 = \sqrt{(h_t - h_r)^2 + d^2} \quad (61)$$

Şekil 10’da belirtildiği üzere yansıyan dalganın alıcıda üreteceği gerilim ($E_{reflected}$) denklem 62’deki gibi ifade edilmektedir.

$$E_{reflected} \propto G_{tr}G_{rr}|\Gamma|e^{j\phi}\frac{e^{-jkR_2}}{4\pi R_2} \quad (62)$$

Denklem 62’de belirtilen yansıyan dalganın katettiği mesafeyi gösteren R_2 , denklem 63’deki gibi hesaplanır.

$$R_2 = \sqrt{(h_t + h_r)^2 + d^2} \quad (63)$$

Denklem 62’deki “ $|\Gamma|e^{j\phi}$ ” ifadesi yer yüzeyindeki yansıma katsayısının etkisini göstermektedir. Alıcı-verici ve direkt-yansıyan indisleriyle gösterilen anten kazancı ifadeleri açığa bağlı değerlerdir. Denklem 64’de sonraki hesaplamalarda kullanılacak kazanç ifade ve indisleri gösterilmektedir.

$$G(\theta) \begin{cases} G_{ref} = G_{tr}G_{rr} \\ G_{dir} = G_{td}G_{rd} \end{cases} \quad (64)$$

Denklem 64’e göre G_{ref} , yansıyan dalga doğrultusundaki toplam kazancı; G_{dir} , direkt dalga doğrultusundaki toplam kazancı simgeleri. Alıcı antene ulaşan direkt ve yansıyan dalgaların üreteceği toplam gerilim değeri denklem 65’de verildiği gibidir ve denklem 66’daki gibi de ifade edilebilmektedir.

$$|E_{total}| = |E_{direct}| + |E_{reflected}| \quad (65)$$

$$|E_{total}| \propto \left| G_{td}G_{rd} \frac{e^{-jkR_1}}{4\pi R_1} \left[1 + |\Gamma|e^{j\phi} \underbrace{\frac{G_{tr}G_{rr}}{G_{td}G_{rd}} \frac{R_1}{R_2}}_{\equiv F} e^{-jk\Delta d} \right] \right| \quad (66)$$

Denklem 66’da Δd , $R_2 - R_1$ hesabı ile bulunur. Denklem 66’da F ile gösterilen denklem parçası yol kazanç faktörü (pattern propagation factor / path gain factor) olarak bilinir. Denklem 67’de F ifadesi gösterilmektedir.

$$F = 1 + |\Gamma| e^{j\phi} \frac{G_{ref}}{G_{dir}} \frac{R_1}{R_2} e^{-jk\Delta d} \quad (67)$$

Denklem 67 için $G_{ref} \cong G_{dir}$, ve $R_1 \cong R_2$ kabulleri ile F ifadesi denklem 68'deki gibi kullanılmaktadır.

$$F = |1 + \Gamma(e^{j\phi - jk\Delta d})| \quad (68)$$

Denklem 68 için $|\Gamma|e^{j\phi} = -1$ ve $\Delta d = R_2 - R_1 = \frac{2h_t h_r}{d}$ kabulleri ile F ifadesinin son hali denklem 69'daki gibi olur (Collin, 1985).

$$F = 2 \left| \sin\left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d}\right) \right| \quad (69)$$

Denklem 69 incelendiğinde F büyüklüğünün 0 ile 2 arasında değer alabileceği görülmektedir. $|\Gamma|e^{j\phi} = -1$ kabulü ile yer yüzeyinden tam yansımanın gerçekleştiği ve yansıma noktasına gelen ve giden dalgaların faz farklarının olmadığı ifade edilmektedir. Alıcıda elde edilecek güç değeri ile F arasında $P_r \propto |F|^2$ ilişkisi mevcuttur. Alıcı-verici güçlerinin dB cinsinden ifade edildiği durumlar için F denklem 70'deki gibi kullanılır. (Jenn, 2012).

$$F[dB] = 10 \log_{10} |F|^2 \quad (70)$$

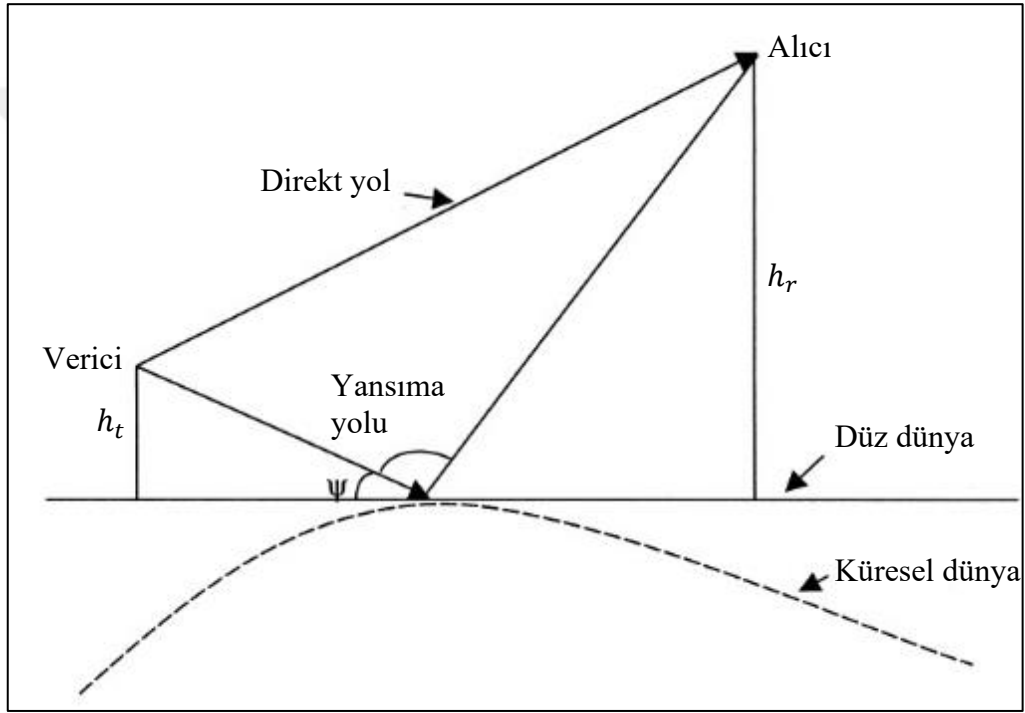
Denklem 69 ve serbest uzay yol kaybı denkleminin kullanılması ile 2-ışınlı yol kaybı modelinin en sadeleştirilmiş hali denklem 71'deki gibi elde edilir.

$$\frac{P_t}{P_r} = 4 \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \left[\sin\left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d}\right) \right]^2 \quad (71)$$

Denklem 67, 68 ve 69 için yapılacak hesaplamalar dünyanın eğriliğini dikkate almadığından düz dünya kaybı (Plane Earth Loss, PEL) olarak da adlandırılır.

1.6.4. Açık Deniz Radyo Propagasyonu İçin Dairesel Dünya Yol Kaybı Modeli

Açık deniz REL (Round Earth Loss) modeli, deniz ortamı için açık deniz bölgesinde (kıyı alanları ve liman etkileşimi olmadan) tahminleme yapan bir yol kaybı modelidir. REL modeli, küresel bir dünya üzerinde yalnızca direkt dalga ve aynasal yansıyan dalga yollarını hesaba katan 2-ışınlı yöntemi esas almaktadır. Hesaplamalara katılan daha ileri seviye propagasyon olayları; ıraksaklık, kırınım ve gölgelemedir. REL modeli için kullanılan temel geometri Şekil 11’de verildiği gibidir (Hoerack, 2015).



Şekil 11. REL modelinin geometrik gösterimi (Bansal, 2006)

Şekil 11 incelendiğinde alıcı ve verici arasındaki direkt görüş ve yansıma yolları görülmektedir. 2-ışınlı yol kaybı modelinin aksine yansıma noktası düz dünya üzerinde değil dünyanın küreselliği de hesaba katılarak işleme alınmaktadır. Fresnel yansıma katsayısı, pürüzlülük katsayısı, ıraksaklık, gölgeleme ve kırınım etkilerinin de dahil edildiği REL yol kaybı modeli için kullanılacak yol kazanç faktörü denklem 72’de verilmiştir.

$$F = \left| 1 + \Gamma e^{j\phi} \cdot \rho_s \cdot D \cdot S \cdot \frac{G_{ref} R_1}{G_{dir} R_2} e^{-jk\Delta d} \right| \quad (72)$$

Denklem 72’de yol kazanç faktörünün en genel hali verilmiştir. D ile belirtilen ıraksaklık katsayısı ve L_{Diff} olarak bahsedilen kırınım etkisi, REL yol kaybı modeli için kesinlikle dikkate alınması gereken parametrelerdir.

1.6.5. 3-Işınlı Yol Kaybı Modeli

Serbest uzayda radyo dalgası propagasyonu için propagasyon kaybı hesaplanırken serbest uzay yol kaybı modeli kullanılabilir. Direkt ışın yanında deniz yüzeyinden yansıyan bir ışın olduğunda propagasyon kaybı 2-ışınlı model kullanılarak hesaplanabilir (Lee vd., 2014).

Direkt dalga ile deniz yüzeyinden yansıyarak gelen dalgaların yıkıcı etki ile birleşimi sonucunda, alıcıya ulaşan dalgalarda girişim boşlukları oluşmaktadır. Ölçülen girişim boşluk değerleriyle hesaplanan boşluk değerleri arasındaki küçük farklar, deniz yüzeyi pürüzlülüğü (dalgalılığı) ve propagasyon dalgalarının kırınımından kaynaklanmaktadır. Bu iki etki; mükemmel bir yansıma ve direkt ışınların dikkate alınarak hesaplandığı 2-ışınlı modelin uygulanabilirliğini azaltmaktadır.

2000-3000m propagasyon mesafesinin ilerisine gidildiğinde ki bu nokta kırılma noktası (d_{break}) olarak ifade edilir, serbest uzay yol kaybı modeli ve 2-ışınlı modelin deniz ortamında propagasyon için tahmin yeteneklerinin azaldığı görülmektedir. Kırılma noktasının ötesinde tespit edilen bazı girişim boşlukları her iki model kullanılarak da hesaplanamamaktadır. Kırılma noktasının ötesinde her iki model de üstel bir zayıflama göstererek değişim olmayan bir örüntü ortaya koymaktadır.

Propagasyon mesafesi, kırılma noktasının ilerisine uzadıkça ortaya çıkan bu fazladan girişim boşlukları yine ortamda bulunan ek ışınlar nedeniyle olabilir. Fazlalık bu ışın, tropikal deniz ortamında sıkça beliren buharlaşma kanalı sebebiyle oluşan kırılmış bir dalgadır şeklinde yorum yapılabilir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde buharlaşma kanalının su yüzeyindeki propagasyon sinyallerini hapsedebildiği görülmektedir. Bu nedenle kırılma noktasının ötesinde bir çoklu ışınım yol kaybı modeli ortaya konulurken, buharlaşma kanalı tarafında hapsedilen sinyaller de hesaba katılmalıdır.

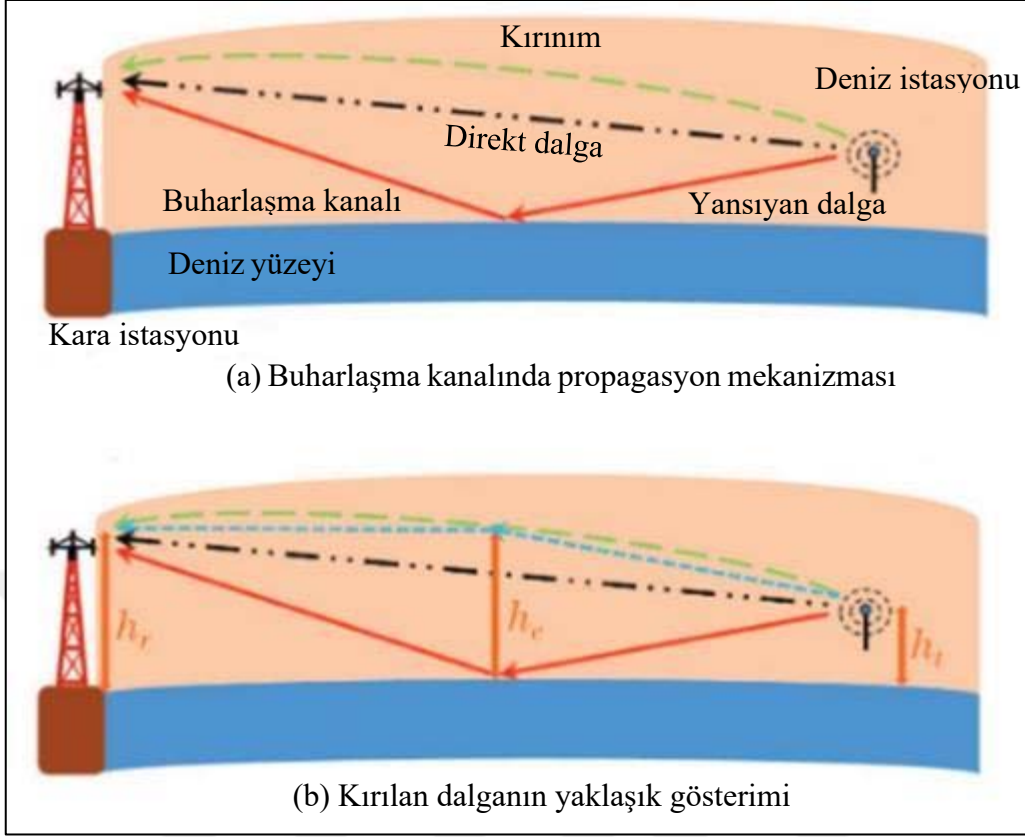
Deniz yüzeyinde doygun hale gelmiş buhar basıncı, deniz yüzeyinden birkaç on metre yükseklikte aniden düşerek katmanlar oluşturur. Bu buhar basıncındaki düşüş elektromanyetik dalgalar için kırılma indeksinde de düşüşe neden olur ve buharlaşma kanalı oluşur. Deniz üzerinde oluşan bir buharlaşma kanalı 3 GHz üzeri frekanslarda alınan işaret

şiddetini önemli ölçüde arttırmaktadır. Örnek bir çalışmada 27,7km'lik bir menzilde 5.6 GHz frekansta zamanın %48'i için alınan işaret şiddetinde 10dB'den fazla bir iyileşme gözlemlenmiştir. Bu anlatılanlara göre 5 GHz frekansında deniz yüzeyine yakın radyo dalgası propagasyonunun tanımlanması ve modellenmesi için buharlaşma kanalı etkisinin çalışılması çok önemlidir (Lee vd., 2014).

Kırılma noktasının tahmin edilebilmesi için serbest uzay yol kaybı ve 2-ışınlı modellerin örüntüleri incelenmiştir. 2-ışınlı model tarafından doğru hesaplanmış son boşluğun ötesinde mesafe arttıkça her iki model örüntüsü de yavaşça düzleşmeye başlamaktadır. Bu sebeple 2-ışınlı model, kabaca tahmin edebildiği son boşluğa kadar olan mesafe için doğru sonuçlar ortaya koyabilir şeklinde bir yorum yapılabilir. Kırılma noktası kabaca denklem 73'deki gibi hesaplanabilir (ITU-R P.1411-12, 2023). Kırılma noktasının ötesinde çoklu ışın yol kaybı modeli ortaya koymak amacıyla kullanılan 3-ışınlı yol kaybı modeli için buharlaşma kanalının kırınım etkisi de hesaba katılmalıdır.

$$d_{break} = \frac{4h_t h_r}{\lambda} \quad (73)$$

Daha önce de bahsedildiği gibi propagasyon mesafesi kabaca kırılma noktasının ilerisine geçtiğinde 2-ışınlı yol kaybı modeli tahmin yeteneğini kaybetmektedir. Buharlaşma kanalı oluşumunun 5000m menzilden sonra dikkate alınması gerektiği genel bir yaklaşımdır. Literatüre göre; tropikal sulardaki kanal yüksekliği ılıman soğuk sulara göre daha yüksektir. Böylelikle tropikal deniz ortamında radyo dalgaları daha kısa mesafelerde hapsedilmeye başlanır. Deniz ortamındaki radyo dalgası propagasyonu; yüzey kanalı, yükseltilmiş (elevated) kanal ve buharlaşma kanalı gibi kanal türlerinden etkilenmektedir. Bu kanal türleri arasında, deniz yüzeyi yakınında buharlaşma kanalı yüksekliği baskındır (Mehrnia & Ozdemir, 2018). Radyo dalgasının buharlaşma kanalında hapsolmesinin nedeni radyo dalgası kırınımıdır. Buharlaşma kanal katmanının üst sınırının homojen olmamasından ötürü, bu katmana gelen radyo dalgaları hemen dağılır ve dalgaların alındığı alanda bu sınırdan yansıma önemsiz olur. Ek olarak kısa mesafelerde kırınıma uğrayan ışın (3. ışın) oluşmayacaktır ancak mesafe arttıkça 3. ışının etkinliği görülmeye başlanacaktır. Şekil 12'de 3-ışınlı modelin oluşturulması için esas alınan fiziki propagasyon yapısı görülmektedir (Lee vd., 2014).



Şekil 12. Kırınımına uğrayan bir radyo dalgasının yansıyan dalgaya benzetimi (Lee vd., 2014)

Şekil 12 (a)'da buharlaştırma kanalı sebebiyle meydana gelen kırınım yeşil kesikli çizgi ile gösterilirken, kırınımına uğrayan bu radyo dalgasının bir yansıma olarak ele alındığı dalga ise Şekil 12 (b)'de mavi çizgi ile gösterilmektedir.

2-ışınlı model için daha önce bahsedildiği gibi radyo dalgasının deniz yüzeyine 90 derecelik açı ile geldiği varsayımı ile dikey kutuplanmış bir dalga için yansıma katsayısı -1'e yakınsayacaktır. Bu yaklaşım ile 3-ışınlı yol kaybı modeli denklem 74 ve 75'deki gibi sadeleştirilebilir:

$$L_{3-ışın} = -10 \log_{10} \left\{ \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 [2(1 + \Delta)]^2 \right\} \quad (74)$$

$$\Delta = 2 \sin \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right) \sin \left(\frac{2\pi (h_e - h_t)(h_e - h_r)}{\lambda d} \right) \quad (75)$$

Denklem 74 ve 75’de h_t ve h_r , metre cinsinden verici ve alıcı anten yüksekliklerini; h_e , etkin kanal yüksekliğini ifade etmektedir. h_e terimi, 3-ışınlı yol kaybı modeli için bir referans olarak alınan buharlaşma kanal yüksekliğine yaklaşık eşittir.

1.6.6. Log-Distance Yol Kaybı Modeli

Hem teorik hem de ölçüme dayalı propagasyon modelleri, bina içi ya da dış ortam radyo kanalları için ortalama alınan işaret gücünün logaritmik olarak azaldığını göstermektedir. Aralarında herhangi bir d mesafesi bulunan alıcı-verici sistem için ortalama büyük ölçekli yol kaybı denklem 76 ve 77’de verilmektedir.

$$PL(d) \propto \left(\frac{d}{d_0}\right)^n \quad (76)$$

$$PL[dB] = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (77)$$

Denklem 76 ve 77’de n , mesafeye bağlı olarak yol kaybındaki artış hızını belirten üstel yol kaybı katsayısını; d_0 , vericiye yakın alanda yapılan ölçümler ile belirlenen referans mesafeyi ifade etmektedir. Denklem 77’de belirtilen $PL(d_0)$ parametresinin hesabı denklem 78 ile yapılmaktadır.

$$PL(d_0) = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right)^2 \quad (78)$$

‘ n ’ parametresinin değeri propagasyon ortamının özelliğine bağlıdır. Örneğin serbest uzay için $n=2$ iken engellerin bulunduğu bir ortam için n daha büyük değerler alabilir. Propagasyon ortamına uygun bir serbest uzay referans mesafesinin (d_0) seçimi önemlidir. Büyük kapsama alanına sahip hücresel haberleşme sistemleri için 1km ve küçük hücresel sistemler için 100m veya 1m referans mesafe değerleri yaygınca kullanılmaktadır. Seçilecek referans mesafe antenin uzak alan bölgesi içinde olmalıdır. Anten yakın alan bölgesinin etkisi referans yol kaybını değiştirmemektedir. Tablo 3’de farklı haberleşme ortamları için üstel yol kaybı katsayısına ait tipik değerler verilmiştir (Rappaport, 2002).

Tablo 3. Farklı ortamlar için üstel yol kaybı katsayısı değerleri

Haberleşme ortamı	Üstel yol kaybı katsayısı, n
Serbest uzay	2
Kentsel alan hücreli yayın	2.7 – 3.5
Gölge etkili kentsel hücreli yayın	3 – 5
Bina içi direkt görüş	1.6 – 1.8
Bina içi engelli	4 – 6
İmalathane içi engelli	2 – 3

1.6.7. Dual-Slope Yol Kaybı Modeli

Yol kaybı sıklıkla, denklem 77’de gösterildiği gibi ortalama güç yasası ile ilişkili log-normal dağılıma sahip olarak kabul edilir. Kentsel ve yarı kentsel ortamlar için 2-ışınlı model de çokça kullanılmaktadır. Mesafeye bağlı bir log-log yol kaybı çizimi ortaya koyan iki bölgeyi doğrusal eğri yaklaşımı; uygulamadaki basitliğinden ötürü, bir direkt yol ve bir ya da daha fazla yansıyan yolların bulunduğu ortamlar için mükemmel bir model adayı olarak değerlendirilmektedir.

İkili doğrusal regresyon yaklaşımına göre yol kaybının ortaya koyulabilmesi amacıyla n_1 ve n_2 olarak adlandırılan her iki bölgeye ait üstel yol kaybı katsayılarının hesabı için ölçüm verileri kullanılarak minimum ortalama karesel hata (MMSE) yöntemi ile dB cinsinden standart sapma elde edilerek en uygun kestirimler yapılmaktadır. İkili çoklu regresyon tekniği ile tüm ölçüm verisi her biri ayrı üstel yol kaybı katsayısına sahip iki bölgeye ayrılmaktadır. Eğer mesafe eksenini logaritmik olarak oluşturulursa; ikili regresyon modeli, kırılma noktasının (break point) her iki tarafı için farklı eğimlere sahip bir parçalı doğrusal modele dönüşmektedir. LoS ortamlar için basit bir tek doğrusal regresyon modeline göre ikili parçalı doğrusal regresyon modeli kullanılarak genellikle çok daha düşük bir standart sapma ile daha iyi eğri kestirimi gerçekleştirilmektedir (Feuerstein vd., 1994).

Dual-slope yol kaybı modelinin uygulanabilmesi için kırılma noktasının denklem 73’de belirtildiği gibi hesaplanması ya da MMSE yöntemi ile kestirilmesi izlenen yaklaşımlar arasındadır. Belirlenen kırılma noktasına (d_{break}) göre dual-slope yol kaybı (PL_{dual}) (ikili regresyon modeli) hesabı denklem 79’daki şartlara göre yapılmaktadır.

$$PL_{dual}[dB] = \begin{cases} PL_1[dB], n_1, d_{slope1} = d \leq d_{break} \\ PL_2[dB], n_2, d_{slope2} = d \geq d_{break} \end{cases} \quad (79)$$

Denklem 79’da PL_{dual} , dual-slope yöntemi ile elde edilecek toplam yol kaybını; $PL_1[dB]$, n_1 ve d_{slope1} sırasıyla kırılma noktası öncesi yol kaybı, üstel yol kaybı katsayısı ve mesafe değerlerini; $PL_2[dB]$, n_2 ve d_{slope2} sırasıyla kırılma noktası sonrası yol kaybı, üstel yol kaybı katsayısı ve mesafe değerlerini ifade etmektedir. Yol kaybı büyüklükleri dB, mesafe büyüklükleri m cinsinden hesaba katılmaktadır. Denklem 79’da belirtilen şartlara göre birinci ve ikinci bölgedeki yol kayıpları denklem 80 ve 81’de verilmektedir.

$$PL_1[dB] = PL(d_0) + 10n_1 \log_{10} \left(\frac{d_{slope1}}{d_0} \right) \quad (80)$$

$$PL_2[dB] = PL(d_0) + 10n_2 \log_{10} \left(\frac{d_{slope2}}{d_{break}} \right) + 10n_1 \log_{10} \left(\frac{d_{break}}{d_0} \right) \quad (81)$$

Denklem 80 ve 81’de d_0 , vericiden Fresnel uzak alan bölgesindeki referans mesafeyi ve $PL(d_0)$ da bu mesafe için hesaplanacak serbest uzay yol kaybını ifade etmektedir (Oyie vd., 2018).

1.7. Literatür Çalışmaları

Literatür incelendiğinde deniz üzeri radyo dalgası propagasyon modellerinin test edildiği, yeni model ve iyileştirmelerin önerildiği birçok çalışma ile karşılaşmaktadır. Çalışmaların çoğunluğu yapılan ölçümlere dayansa da benzetim yapılarak elde edilen verilerin yorumlandığı çalışmalar da mevcuttur. Bu bölümde deniz üzeri radyo dalgası propagasyonu modelleri, deniz ortamı parametreleri ve kara haberleşmesi için kullanılan yöntemlerin deniz ortamına uyarlanması konularını içeren çalışmalar incelenmiştir.

5.8 GHz lisanssız bandda kıyı-gemi ve gemi-gemi ortamlarında yapılan ölçümler Log-normal yol kaybı modeline göre incelenmiştir. Bu frekansın seçim nedeni ücretsiz ve yüksek çıkış gücüne izin verilmesidir. Ölçüm verileri hem büyük ölçekli hem de küçük ölçekli (cumulative distribution function, CDFs) zayıflama yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Deniz durumu görsel değerlendirmeye göre yaklaşık olarak ele alınmıştır. Yol kaybı ve gölgeleme etkileri büyük ölçekli, çoklu yol kaybı da küçük ölçekli zayıflamalar olarak tanımlanmıştır.

$d_0 = 10m$ olarak seçilmiş, sürekli dalga işareti kullanılarak 12800 örnek alınmış ve değerlendirilmiştir. 3 farklı ölçüm senaryosu için n kestirimi ve buna bağlı standart sapmalar hesaplanmıştır. Sonuç olarak küçük ölçekli zayıflama için EVD (extreme value distribution) fonksiyonunun tahmin için uygun olduğu söylenmiştir (Reyes-Guerrero & Mariscal, 2014).

2 GHz frekans bandı için kıyı-gemi ortamında ölçümler yapılmıştır. Açık deniz haberleşmesi için deterministik bir yol kaybı modeli önerilmektedir. β_0 ve σ_h parametreleri için kestirimler yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. 2-ışınlı model; etkin yansıma, pürüzlülük, ıraksaklık, gölgeleme ve kırınım etkileri de katılarak REL yöntemi ile ele alınmıştır. ITU-R P.1546 yol kaybı önerisi 30 MHz - 3 GHz arası 1km'lik mesafe için tahminde bulunduğundan ölçüm sonuçları bu yöntemle de karşılaştırılmıştır. Pürüzlülüğün kaynaklı saçılma etkisinin irdelenmesinde en yaygın teorilerin Kirchhoff ve Perturbation olduğundan bahsedilmiştir. Deniz üzeri yüzey dalgası yüksekliğinin Gaussian dağılıma sahip olduğu söylenmiştir. ITU-R, PEL ve REL yöntemleri ile yapılan tahmin ve ölçüm verileri grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. D_{06} mesafesinden sonra gölgeleme ve saçılma etkilerinin azaldığı, alınan işaret gücünün β_0 ve σ_h parametrelerinden bağımsız hale geldiği belirtilmiştir (Yang vd., 2013).

Aynı yazarlara ait farklı bir çalışmada yine 2 GHz frekans bandı için kıyı-gemi ortamında ölçümler yapılmıştır. Ölçüm düzeneği tek verici, 2 alıcı anten kullanılarak oluşturulmuştur. Girişim azaltma yöntemi uygulanmadan ve 2 alıcı antenli sistem için sinyal işleme teknikleri ile girişim azaltma yöntemi uygulanarak elde edilen yol kaybı ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Serbest uzay yol kaybı, Okumura-Hata, COST 231-Hata ve ITU-R P.1546-2 yöntemleri, ölçülen yol kaybı verileri ile karşılaştırılarak en başarılı yöntemin ITU-R P.1546 (%50) olduğu tespiti yapılmıştır. Diğer gemilerin gölgeleme etkisi, geminin dönme hareketleri gibi etkilerden kaynaklı sinyal gücündeki bazı önemli düşme noktaları modelde görülmemektedir yorumu ifade edilmiştir. Deniz dalgası ve gel-git kaynaklı anten yüksekliği değişiklikleri göz ardı edilmiştir (Yang vd., 2011).

485 MHz frekans bandı için karada ölçümler yapılmış ve farklı yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Log-distance modeli tek bir n parametresine bağlı olduğundan aynı propagasyon karakteristiğine sahip bir ortam için kabul edilebilirdir. Ancak birçok durumda ortamı iki ayrı parça olarak n_1 ve n_2 parametreleriyle değerlendirmek gerekir. n , üstel yol kaybı katsayısının hesabı; iteratif bir yöntem ile MMSE için en iyi uyum değeri dikkate alınarak yapılmıştır. d_0 mesafesi olarak vericiye en yakın olan 1.48km noktası seçilmiştir. Kırılma noktası için hesaplama ile değil iterasyon ile en uygun değer kestirilmiştir. Her bir

senaryo için Okumura-Hata, ITU-R P.1546, tek ve iki parçalı Log-distance yöntemleri için ortalama hata ve standart sapma değerleri ortaya koyulmuştur. Yine her bir model için mutlak hata PDF (probability density function) ve CDF grafikleri irdelenmiştir. İki parçalı Log-distance yol kaybı yönteminin en iyi başarıma sahip olduğu söylenmiştir (Fernández, 2012).

0.4, 1.2 ve 6 GHz frekans bandları için benzetim, 2 ve 5 GHz frekans bandları için karada ölçümler yapılarak şehir ortamında araçlar arası haberleşme incelenmiştir. Benzetim verileri ile Dual-slope yöntemi sonuçları karşılaştırılmıştır. Kırılma noktası tespiti için yeni bir hesaplama ortaya konulmuştur. Dual-slope yol kaybı model hesabına binalar arası mesafeler katsayı olarak eklenmiştir. Son olarak ölçüm verileri ile önerilen yol kaybı modeli başarımlar değerlendirilmiştir (Ito vd., 2007).

400-406 MHz frekans bandını kullanan GPS Radyosonda cihazı ile göl üzerinde ölçümler yapılmış ve Runge-Kutta'ya dayanan ray-tracing yöntemi ile propagasyon değerlendirme çalışması yapılmıştır. Deniz troposfer tabakası veya büyük su kütleleri üzerinde oluşan anormal propagasyon mekanizmalarından olan atmosferik kanal oluşumu, UHF bandından milimetre altı dalga boyu aralığındaki elektromanyetik dalgaları önemli ölçüde etkilemektedir. Bu etkiler; radarlar, yüksek güçlü mikrodalga sistemler, GPS ve kablosuz haberleşme sistemleri üzerinde beklenmeyen sonuçlar oluşturmaktadır. Örneğin; radarların maksimum menzilin artması, radar parazitlerinin artması, radarda gölge alanların oluşması ve konumlama hataları gibi sonuçlar oluşabilmektedir. Bu etkileri ortaya koyan çeşitli kanal türleri mevcuttur. Bu kanal türleri; yüzey (surface), yüzey-esaslı (surface-based), buharlaşma (evaporation), yükseltilmiş (elevated) ve karmaşık kanal olarak sınıflandırılmaktadır (Sun vd., 2016).

5.8 GHz (Wi-Max) frekans bandı için kıyı-gemi ortamında ölçümler yapılmış ve serbest uzay, 2-ışınlı ve Log-distance yol kaybı modelleri için incelenmiştir. Bu frekansın seçilmesinde birçok ülke için daha yüksek çıkış güçlerine izin verilmesi etkin olmuştur. Kullanılan frekans değeri ve ölçüm ortamının daha önceki çalışmalarda değerlendirilmediğini söylemektedir. Sürekli dalga verici, vektör analizör ve GPS ile ölçüm düzeneği kurulmuştur. LoS ve NLoS durumlarda ölçümler yapılmış ve bu esnada denizin sakin ve havanın açık olduğu belirtilmiştir. $d_0=600\text{m}$ olarak alınmış, üstel yol kaybı ve gölgeleme parametreleri ortaya koyulmuştur (Reyes-Guerrero vd., 2011).

1540.9-1541.5 MHz (L-band) frekans bandı için deniz ortamında yapılan ölçümlere dayalı değerlendirmeler yapılmıştır. Deniz yüzeyi durumunun bir fonksiyonu olarak

yüzeyden saçılan enerjinin eş evreli ve eş evresiz bileşenleri için gölgeli Kirchoff Approximation Teori'yi esas alan bir zayıflama yöntemi önermektedir. Önerilen yöntemde gölgeleme ve deniz yüzeyi durumu ele alınmaktadır. Çoklu yol zayıflamasının, direkt ve yansıyan elektromanyetik dalgalar arasındaki girişimden kaynaklandığını söylemektedir. Deniz yüzeyinden yansıyan elektromanyetik dalgalar; anten boyuna bağlı olarak fazı değişen aynasal yansıyan eş evreli bileşen ve deniz dalgasının hareketlerine bağlı değişim gösteren eş evresiz bileşenlerden oluşmaktadır. Eş evreli bileşenlerin deniz ortamında baskın iken, eş evresiz bileşen dalgalı deniz durumunda daha baskındır. β_0 ve σ_h için ölçümlere dayalı grafikler verilmiştir (Karasawa & Shiokawa, 1984).

8-12 GHz (X-band) frekans bandında kıyı-hava ortamı için ölçümler yapılmıştır. Havadaki istasyon deniz üzerindeki bir uçurtmaya yerleştirilmiştir. Yansıma, pürüzlülük, ıraksaklık, bitki örtüsü ve gölgeleme faktörlerini dikkate alan hesaplamalar yapılmıştır. Ayrıca alıcı ve verici anten kazançlarının gelme açısına bağlı olarak değişimi değerlendirmeye alınmıştır. Çoklu yol için dürtü tepkisi eğrileri (impulse response curve - IRC) incelenmiştir (Haspert & Tuley, 2011).

2.4 GHz frekans bandı için kıyı-kıyı ortamında ölçümler yapılmıştır. Gel-git nedeniyle deniz seviyesi ve dolayısıyla anten yüksekliklerindeki değişimin etkileri ortaya koyulmaya çalışılmıştır. Bu amaçla deniz yüzeyinden yansımanın RSSI (Received Signal Strength Indicator)'ya olan etkisi 2-ışınlı model ile incelenmiştir. Literatürdeki birçok çalışmada deniz üzeri propagasyon değerlendirmesi yapılırken 2-ışınlı yöntemin kullanıldığından bahsetmektedir (Gaitán vd., 2020).

433 MHz frekans bandı için deniz-hava ortamında ölçümler yapılarak serbest uzay ve Log-distance yol kaybı modelleri ile sonuçlar değerlendirilmiştir. Denizdeki terminal bir gemiye, havadaki terminal de insansız hava aracına (unmanned air vehicle - UAV) yerleştirilmiştir. Ayrıca ışın izleme algoritması ile deniz yüzeyinin 3-boyutlu modeli oluşturulmuş ve kablosuz iletişim kanalı benzeştirilerek modellenmiştir. Bu benzetim ortamı için alınan işaret gücü irdelenmiştir. $d_0=4\text{m}$ olarak ele alınmıştır. Deniz üzeri radyo kanalını etkileyen en önemli faktörler; deniz yüzeyinin istikrarsızlığından kaynaklı çoklu yol etkisi ve şiddetli hava durumudur ifadesine yer verilmiştir (Gao vd., 2020).

2-4 GHz (S-band) ve 4-8 GHz (C-band) frekans bandlarında gemi-USV (unmanned surface vehicle) ve USV-USV ortamları için ACF-UV (Adaptive Communications Framework for Unmanned Vehicles) kullanılarak veriler üretilmiştir. İletişim kanalının karakterize edilmesi için buharlaşma kanalından kaynaklı işaret gücündeki kaybı ortaya

koyan APM (Advanced Propagation Model) ve zayıflama kanalını modelleyen Nakagami-m modeli kullanılmıştır. APM; TPTEM (terrain parabolic equation model) ile RPO (radio physical optics) modellerinin birleşimidir. İletişim sistemlerinin başarımı birçok etkene bağlıdır. Bunlardan en önemlisi terminaller arası iletişim kanalının durumudur. Deniz ortamında radyo dalgası propagasyon mekanizması; sıcaklık, basınç ve nem gibi atmosferik olaylardan ötürü karmaşıktır. Deniz yüzeyinden, diğer deniz taşıtlarından ve kara parçalarından yansıyan işaretler nedeniyle oluşan faz girişiminin yanında atmosferden de yansımalar mevcuttur (Coker vd., 2013).

1800 MHz frekans bandında başka bir çalışmada yapılan kıyı-deniz ortamı ölçümleri kullanılarak geliştirilmiş ITM (Irregular Terrain Methodology) yöntemi önerilmiştir. Standart ITM modeli; 2-ışınlı yol kaybı modeli, bulut, sis ve yağmur zayıflatmaları eklenerek geliştirilmiştir. Geliştirilmiş ITM ve standart ITM modelleri karşılaştırılmıştır. Geliştirilmiş ITM model daha iyi bir başarımla ortaya koymuştur (Zhao vd., 2013).

700 MHz UHF bandında kıyı-deniz ortamı için başka bir çalışmada ölçüm verileri ile ITM esaslı 2-ışınlı yöntem karşılaştırılmıştır. TVWS (television white space) bandında deniz yüzeyinde süper Wi-Fi iletişim kanalı için öneride bulunulmuştur. Önerilen süper Wi-Fi için iletişim mesafesi 2.4 ve 5 GHz Wi-Fi'ye göre daha iyi olacaktır yorumu yapılmıştır (Ren vd., 2014).

Bu çalışmanın deniz üzeri haberleşmesi için önerdiği yöntem, düzgün yüzey kaynaklı aynasal çoklu yol ve pürüzlü yüzey kaynaklı saçılmanın etkili olduğu çoklu yol içeren kanal dürtü tepkisini (channel impulse response - CIR) ortaya koymaktadır. Çalışma içeriğinde ölçüm verisi kullanılmamıştır. Yansıma, pürüzlülük, açığa bağlı kazançlar, ıraksaklık ve gölgeleme etkilerini içeren analitik bir model ortaya koyulmuştur (Huang vd., 2016).

5.15 GHz frekans bandında kıyı-deniz ortamı ölçüm verileri ile serbest uzay, 2-ışınlı ve 3-ışınlı-parçalı yol kaybı modelleri karşılaştırılmıştır. Tropikal okyanus ortamlarında buharlaşma kanalının oluşma ihtimali ve baskınlığı daha yüksektir. 3 farklı alıcı anten yüksekliği için yapılan ölçüm sonuçlarının serbest uzay ve 2-ışınlı yol kaybı yöntemleriyle karşılaştırılması sonucunda serbest uzay yol kaybı modelinin daha iyi bir büyük ölçekli tahmin yapabildiği görülmüştür. Ancak 2-3km mesafeye kadar ölçüm verileri 2-ışınlı yol kaybı modeline uygunluk göstermektedir. Bu parçalı uyum nedeniyle 2-3 km mesafesini kırılma noktası olarak adlandırmış; bu nokta öncesini 2-ışınlı yöntem ile bu noktadan sonrasını 3-ışınlı yöntem ile modellemiştir (Lee vd., 2014).

2.4 GHz frekans bandı için benzetim verileri kullanılmıştır. Yansıma katsayısını içeren 2-ışınlı yol kaybı modeli ile benzetim verileri karşılaştırılmıştır. Anten yükseklikleri ve kutuplanmanın, döngüsel gel-git değişimleri süresince etkisi incelenmiştir. Sonuçta gel-git süresince deniz üzeri haberleşme linkleri için polarizasyon da dikkate alınarak kısa anten yüksekliklerinin uzuna göre daha performanslı olduğu ve dikey kutuplanmanın daha düşük performans gösterdiği görülmüştür (Gaitán vd., 2019).

5 GHz frekans bandı için kıyı-deniz ortamında Hindistan kıyılarındaki balıkçılar için noktadan-çok noktaya (multi-hop network) uzun mesafeli Wi-Fi incelemesi yapılmıştır. Mevcut IEEE 802.11 (Wi-Fi) teknolojisinin bazı kısıtlamalarından dolayı uzun mesafeli iletişime uygun olmadığı söylenmektedir. Bunun yerine bu protokolda gerçekleştirilecek bazı iyileştirmeler ile uzun mesafeli Wi-Fi (LR Wi-Fi) mümkün olmaktadır. Farklı bandgenişlikleri için yapılan ölçümlerde bandgenişliği arttıkça RSSI'nın azaldığı tahmin edildiği şekilde görülmüştür (Unni vd., 2015).

5.9 GHz (IEEE 802.11p) frekans bandında gemi-demirli gemi ortamında yapılan ölçüm verileri ile PEL, REL ve ITU-R P.1546-2 yöntemleri karşılaştırılmıştır. Maksimum 2.6 km'ye kadar ölçümler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre RMSE değeri açısından en iyi başarımlar REL modeli ile elde edilmiştir. Ek olarak power delay profile (PDP) ve RMS gecikme yayılımı (delay spread) incelenmiştir. Akaike kriteri uygulanarak küçük ölçekli zayıflama için en uygun genlik dağılımı tahmin edilmiştir. 5.9 GHz'de REL, PEL ve P.1546-2 için çalışma yapılmadığı vurgulanmıştır. Anten yüksekliği olarak dalganın etkisi olmadan deniz yüzeyinden anten yükseklik değeri verilmiştir. Deniz ortamı için Normal, Rician, Log-normal, TWDP (Two-Wave with Diffuse Power), Rayleigh ve Weibull dağılımları yaygın olarak kullanılmaktadır denmiştir. Küçük ölçekli tahminleme için TWDP, Rayleigh ve Weibull dağılımları değerlendirilmiş ve en başarılı tahmini TWDP dağılımının yaptığı tespit edilmiştir (Yang vd., 2018).

35 ve 94 GHz frekans bandları için “Wireless InSite” yazılımının ışınlı izleme kabiliyetinden faydalanılarak yol kaybı, alınan güç, RMS gecikme yayılımı (delay spread) ve PDP gibi kanal parametreleri incelenmiştir. 2-ışınlı modelin yüksek frekanslar için yalnızca kısa mesafelerde kullanılabileceği söylenmiştir. Serbest uzay yol kaybı yönteminin kısa mesafeler için bile bu frekanslarda tahminleme yapamadığı belirtilmiştir. Yansıma katsayıları değiştirilerek mevcut 2-ışınlı yol kaybı modeli geliştirilmiş ve geliştirilen modelin tahminlemede diğerlerine göre daha yüksek başarımlar sağladığı tespit edilmiştir.

Deniz durumu için Pierson-Moskowitz ölçeği kullanılarak yüzey pürüzlülüğünün hesaplanabileceği söylenmiştir (Mehrnia & Özdemir, 2018).

2.4 ve 5 GHz frekansları ve farklı anten yükseklikleri için kıyı-USV ortamında ölçümler yapılmıştır. Ölçüm verileri ile serbest uzay ve 2-ışınlı yol kaybı modelleri karşılaştırılmıştır. 2-ışınlı yol kaybı modeli 3 parçalı olarak incelenmiş ve 2 parçası hesaplamalar için kullanılmıştır. Deniz durumu Beaufort ölçeğine göre tahminen 1 olarak alınmıştır. Her bir anten yüksekliği, frekans ve ortam için RSSI grafikleri verilmiştir (Yamamoto, 2019).

5.2 GHz frekans bandında kıyı-gemi ortamı için ölçümler yapılmıştır. Karasawa ve yansıma katsayısının dahil edildiği 2-ışınlı yol kaybı modelleri ile ölçüm verileri karşılaştırılmıştır. Karasawa modeli için 5.2 GHz’de deniz yüzeyi pürüzlülüğünden kaynaklı saçılma olayı incelenmiştir. Ayrıca 100 MHz band genişliği kullanıldığını ve bu değerın literatürdeki çalışmalara göre yüksek olduğu söylenmiştir. Karasawa modelinin 3 GHz taşıyıcı frekansı altına odaklanmasına rağmen 5.2 GHz için de yüksek bir başarımlı sağladığı görülmüştür (Wang vd., 2015).

5.2 GHz frekans bandında 120 MHz bandgenişliği için kıyı-deniz ortamı ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler esnasındaki dalga yüksekliği yaklaşık olarak verilmiştir. Power delay profile ve delay-doppler spectrum değerlendirmeleri yapılmıştır. Channel sounder kullanılarak CIR verileri elde edilmiştir (Wang vd., 2017).

2.4 GHz (IEEE 802.16) frekans bandında gemi-gemi ortamı için ölçümler yapılmıştır. Deniz dalga yüksekliği ve alınan işaret gücü arasındaki ilişki 2-ışınlı yol kaybı modeli ile incelenmiştir. Deniz dalgaları modellenerek, deniz dalgasına bağlı gemi hareketi sonucu anten kazançlarında meydana gelen değişimler dikkate alınmıştır. Deniz hareketliliğinin olumsuz etkisini azaltmak için daha geniş demet açıklığına sahip antenlerin kullanımı önerilmektedir. Ancak bu durumda kazanç ve dolayısıyla EIRP azalacaktır. Ayrıca deniz hareketliliğini baskılamak için mekanik ve elektronik anten stabilizatörleri kullanılmaktadır. Ancak bu sistemler de pahalı ve yer kaplamaktadır. Deniz yüzeyi hareketi için Pierson-Moskowitz deniz durumu ölçeği kullanılmıştır. Anten yüksekliklerindeki değişimin RSSI grafiğindeki tepe ve çukur noktaları mesafe ekseninde kaydardığı gösterilmiştir (Ang & Wen, 2008).

5.8 GHz (IEEE 802.11n) frekans bandında kıyı-gemi ortamı için ölçümler yapılmıştır. Deniz dalgalarından kaynaklı anten yüksekliği ve hizalanmasındaki değişimlerin 2-ışınlı yol

kaybı modeline göre alınan işaret gücünü de değiştireceği belirtilmiştir. Ölçülen veri ve farklı iki anten yüksekliği için 2-ışınlı yol kaybı grafikleri karşılaştırılmıştır (Lopes, 2014).

Deniz yüzeyi ve deniz-hava ortamı haberleşme sistemleri için yapılan propagasyon çalışmalarının incelendiği geniş çaplı bir araştırma yapılmıştır. Ölçüm ve simülasyon olmadan literatür incelemesi yapılarak yaklaşımlar karşılaştırılmıştır (Wang vd., 2018). Deniz üzeri haberleşme için benzer bir literatür çalışması daha yapılmıştır (Habib & Moh, 2019). 5.6 GHz frekans bandının deniz ortamı için incelenmediği bu iki geniş çaplı literatür çalışmasından da anlaşılmaktadır.

2.4 ve 5 GHz frekans bandları için kıyı-deniz ortamı ölçümleri yapılmıştır. Gel-git sebebiyle deniz yüzeyi yüksekliğinde oluşan değişiminin kıyı-deniz haberleşmesi üzerine etkisi araştırılmıştır. Farklı anten yükseklikleri için RSSI eğrilerinin genlik olarak değil de konum olarak (sağa-sola kaydığı) değiştiği bu çalışmada da vurgulanmıştır. 2.4 ve 5 GHz için mesafeye bağlı anten yükseklik değişimleri verilmiştir. 2-ışınlı yol kaybı modeli ile ölçüm verileri karşılaştırılmıştır. Yazarlar ileriki çalışmalarda anten yüksekliği değişimini dahil ederek 2-ışınlı yol kaybı modelini iyileştirmeyi planlamışlardır (Gaitán vd., 2021).

8 GHz frekans bandında deniz üzeri haberleşme için ölçüm yapılmadan PE (parabolic equation) yöntemi ile değerlendirme yapılmıştır. Miller-Brown-Vegh modeli ile buharlaşma kanalının etkin olduğu bir ortamda rüzgâr kaynaklı pürüzlülüğün elektromanyetik dalga propagasyonuna etkisi incelenmiştir. Miller-Brown-Vegh modeli, deniz yüzeyini mükemmel iletken kabul etmemektedir ve sınır koşullarına göre sıyırma açısı ve yansıma katsayısına bağlı bir empedans denklemi ortaya koymaktadır. Ayrıca rüzgâr hızı ile σ_h 'yı ilişkilendiren bir formül kullanmaktadır (Zhao & Huang, 2010).

60, 80 ve 100 GHz frekans bandlarında ışın izleme benzetimi ile oluşturulan ortam için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada kırılma noktası hesabı için farklı yaklaşımlarda bulunulmuştur. Birinci Fresnel bölgesi hesabı, dual-slope yöntemi kullanılarak iterasyon ile MMSE için kestirim ve trend filtering algoritması ile elde edilen 3 farklı kırılma noktası, 2-ışınlı yol kaybı yöntemi ile elde edilen grafikler üzerinde karşılaştırılmıştır. Birinci Fresnel bölgesi hesabı ile elde edilen kırılma noktası hesabının başarımlı geçerliliğini koruduğu sonucuna varılmıştır (Zöchmann vd., 2017).

2.5 GHz frekans bandında kara ve deniz ortamları için oluşturulan benzetim verileriyle; serbest uzay, 2-ışınlı ve dual-slope yol kaybı modelleri için farklı kırılma noktası tespitlerinde bulunulmuştur. Sonuçta yatay ve dikey kutuplanma için yer ve deniz yansıma

katsayılarına göre bir d_{break} (kırılma noktası) hesabı önerilmiş ve diğerlerine göre çok daha başarılı olduğu belirtilmiştir (El-Sallabi vd., 2018).

1900 MHz frekans bandında kara için ölçüm olmadan Log-distance ve Dual-slope yol kaybı modelleri incelenmiştir. $d_0=1\text{m}$ olarak alınmıştır. n , n_1 ve n_2 katsayıları MMSE için kestirim yapılarak belirlenmiştir. Kırılma noktası için de MMSE değerlendirilerek kestirim yapılmış ve Dual-slope yol kaybı modeli için yüksek başarımla elde edilmiştir (Feuerstein vd., 1994).

Başka bir kara için ölçüm olmadan yapılan çalışmada 2-ışınlı yerden yansıyan yol kaybı yöntemi kullanılarak zayıflama etkisi incelenmiştir. Bu amaçla 2 adet kırılma noktası belirlenerek 3 parçalı bir inceleme yapılmıştır (Jaekel vd., 2017).

5.9 GHz frekans bandında gemi-gemi ortamı için ölçümler yapılmıştır. Ölçüm verilerinden ziyade benzetim verileri incelenmiştir. Benzetim sonuçlarına göre artan rüzgâr hızına bağlı olarak elektromanyetik dalga propagasyonu REL modelden serbest uzay modeline dönüşmektedir. REL modeli ve deniz modellemesinde Pierson-Moskowitz ölçeği kullanılmıştır. Monte Carlo yöntemi ile 5.9 GHz için 0-6m/s rüzgâr hızı aralığında yol kaybı ve gölgelenme zayıflaması karakteristikleri benzeştirilmiştir. Ölçüm verileri ve REL model sonuçları grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. REL modelinin ölçüm verisiyle iyi örtüştüğü belirlenmiştir (Li vd., 2023).

5.9 GHz frekans bandında gemi-kara ve gemi-gemi ortamları için ölçümler yapılmıştır. Deniz kablosuz haberleşme kanalı araştırmaları için temel olan PDP, gecikme yayılımı (delay spread) ve propagasyon yol kaybı karakteristikleri incelenmiştir. Serbest uzay yol kaybı, REL yöntemi ve ITU-R P.1411 önerileri değerlendirilmiştir (Li vd., 2021).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Deniz ticaretinin gelişmesi, deniz yük taşımacılığının avantajları, su altı doğal kaynaklarına olan ilgi, dünyada artan nüfusa bağlı olarak deniz üzeri balık çiftlikleri ve balıkçılık alanlarına olan ihtiyacın artması ve ülke güvenlikleri için askeri deniz faaliyetleri gibi birbirinden farklı birçok alanda deniz ortamında haberleşme ihtiyacı mevcuttur. Günümüz dünyasında insanların haberleşme eyleminden beklentisi, teknolojik gelişmelere bağlı olarak değişikliğe uğramıştır. Genişband haberleşme sistemlerine duyulan bu ihtiyaç hem yüksek veri hızları hem de hareket kabiliyeti gerektirmektedir. Bu amaçla tez çalışmasında 5.6 GHz kablosuz haberleşme sistemi kurularak mevcut propagasyon yöntemlerinin başarımı yapılan saha ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara bağlı olarak mevcut sistemlerde parametre iyileştirmeleri ve yeni bir model oluşturma çalışması yapılmıştır.

Çalışma ölçümleri için deniz istasyonu olarak Trabzon - Sürmene İlçesi Çamburnu Mahallesi'nde bulunan Karadeniz Teknik Üniversitesi - Sürmene Deniz Bilimleri Fakültesine ait 12m'lik Yakamoz Araştırma Teknesi kullanılmıştır. Kara istasyonu olarak ise sabit bir otomobil ve deniz kıyısında bulunması nedeniyle direkt görüşe sahip fakülte binası kullanılmıştır.

Farklı hava şartları, buna bağlı olarak farklı deniz dalgası yükseklikleri ve kara istasyonunda farklı anten yükseklikleri için gerçekleştirilen ölçümler; mevcut serbest uzay (FSPL), 2-ışınlı, 3-ışınlı, Log-distance ve Dual-slope yol kaybı modelleriyle karşılaştırılarak dikkate aldıkları farklı parametrelerin değişimine göre başarımları ortaya konulmuştur. 2-ışınlı yol kaybı modeli için 5 farklı yaklaşımda bulunulmuş, deniz dalga durumu gözetilerek hesaplanan alıcı anten yükseklikleri için başarımlar değerlendirilmiştir ve iki parçalı bir model önerisinde bulunulmuştur.

2.1. Ölçüm Donanımları ve Düzenneği

5.6 GHz frekans bandında deniz kanalı propagasyon ölçümleri için deniz ve kara olmak üzere iki ayrı istasyon kurulmuştur.

Karadaki düzenek ölçüm süresince sabit bir otomobilin tavanına ve fakülte binasının üçüncü kat penceresine, denizdeki düzenek ise ölçüm cihazının anten muhafaza tabanının mıknatıslı yapısından faydalanılarak tekne kamarası üzerinde tasarlanan metal bir düzeneğe tutturulmuştur. Kara istasyonu sabit olup deniz istasyonu olarak kullanılan tekne ile deniz akıntısının izin verdiği ölçüde düz bir hat üzerinde bağlantı kesilene kadar ilerlenmiş ve aynı rota izlenmeye çalışılarak başlangıç noktasına geri dönmüştür. Kara istasyonuna uzaklaşma ve yaklaşma için ayrı kayıtlar alınmıştır. Tekne konumu, cihaz antenleri ve cihazda bulunan yazılımın GPS bilgisi (1575 MHz) alma yeteneği olması sebebiyle yine ölçüm verilerine dahildir [15].

2.1.1. Ölçüm Donanımı

Ölçümler amacıyla COHDA Wireless firmasına ait MK5 OBU (On-Board Unit) cihazı kullanılmıştır. Adı geçen alıcı-verici ölçüm cihazı kara ve deniz olmak üzere her bir istasyona yerleştirilmiştir. Aynı şekilde cihaz antenleri de 2 adet olmak üzere kullanılmıştır. Ölçümler için tek kanal kullanılarak her bir anten biriminde bulunan dahili ikili anten yapısının anten çeşitliliği ile haberleşme verimliliği ve doğruluğunu arttırması sağlanmıştır. Cihaz antenleri eş yönlü özellikte olup dahili GPS anteni de içermektedir. Şekil 13’de ölçüm için kullanılan MK5 OBU cihazı ve anteni görülmektedir (Cohda Wireless, 2017).



Şekil 13. Cohda Wireless MK5 OBU Alıcı/Verici ve Anteni

Ölçüm düzeneğinden veri alabilmek ve alınan güç seviyesinin cihaz hassasiyetinin (99dBm) altına düştüğü konumu ve mesafeyi tespit etmek amacıyla her bir istasyondaki ölçüm düzenekleri birer dizüstü bilgisayara bağlanmıştır. Ölçüm cihazları 12V-DC ile

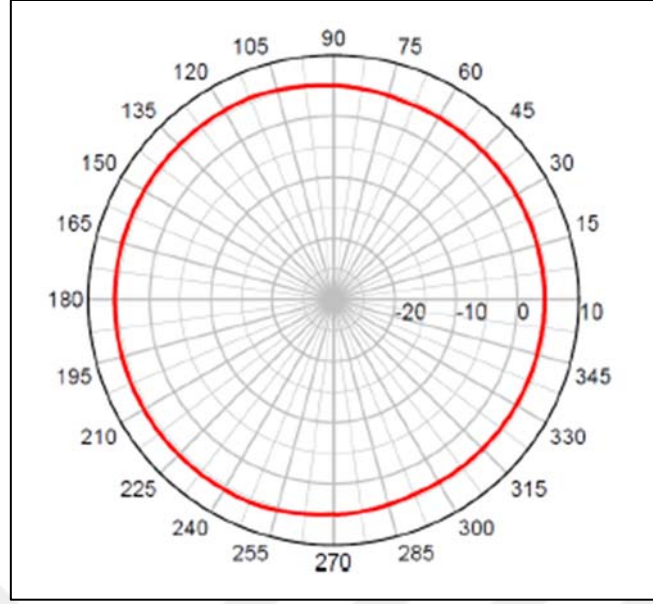
çalışabildiğinden bir araç çakmağı dönüştürücü ile karada ve yine 12V'luk akü barındıran teknede de uygun bir ara bağlantı kullanılarak cihaz beslemeleri yapılmıştır (Cohda Wireless, 2017).

Cihaz içeriğindeki yazılım vasıtası ile kara istasyonu verici ve deniz istasyonu da alıcı olarak 5.6 GHz'de haberleşme için ayarlanmıştır. Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu'nun yayınladığı Kısa Mesafe Erişimli Telsiz (Ket) Cihazları Hakkında Yönetmeliğe göre 5470-5725 MHz frekans bandı için dış ortam EIRP (Effective Isotropic Radiated Power) güç seviyesi 1W olarak belirlenmiştir (Resmi Gazete, 2012). Çalışmanın esas amaçlarından biri olan mevcut 5 GHz Wi-Fi frekansının deniz üzeri propagasyonunun incelenmesi kapsamında 5.6 GHz frekans değeri seçilmiştir. Tablo 4'de MK5 OBU cihazının genel teknik özellikleri verilmiştir.

Tablo 4. Cohda Wireless MK5 OBU teknik özellikler

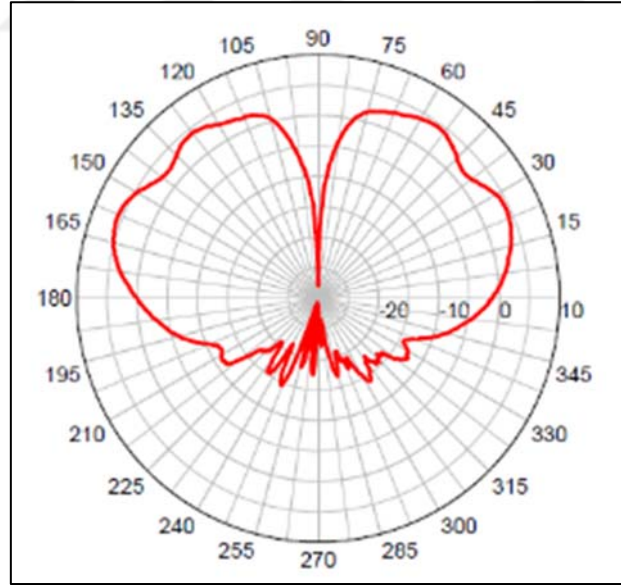
Parametre	Değer
Standart	IEEE 802.11p
Frekans bandı	5.9 GHz
Veri hızı	3 – 27 Mbps
Verici gücü	23 dBm
Anten kazancı	5 dBi
Alıcı hassasiyeti	3 Mbps'de -99 dBm
GPS doğruluğu	2.5m
Anten polarizasyonu	RHCP
Bandgenişliği	10 MHz
Anten modeli	Mobile Mark SMW–303, GPS
Anten tipi	Eş yönlü (Yönsemez)
Modülasyon	1/2 BPSK, 1/2 QPSK ve 1/2 16QAM

Tablo 4'de belirtilen frekans bandı cihaz kanal numarası değiştirilerek 5.6 GHz'e sabitlenmiştir. Anten ışıma diyagramının yatay düzlem için şekli aşağıdaki gibidir.



Şekil 14. Anten yatay ışıma diyagramı

Şekil 14 incelendiğinde antenin yatay düzlemde eş yönlü olduğu görülmektedir. Aşağıdaki şekilde de dikey düzlem için aynı antenin ışıma diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 15. Anten dikey ışıma diyagramı

Şekil 14 ve 15’de verilen anten ışıma örüntüleri ilgili firmanın 5500 MHz için yaptığı ölçümler sonucunda elde ettiği teknik özellik föylerinden alınmıştır (Mobile Mark, 2018).

2.1.2. Ölçüm Düzenegi

3 farklı günde gerçekleştirilen 4 adet ölçüm senaryosu için kara ve denizde ayrı ayrı istasyonlar kurulmuştur. İstasyon yerleşiminde antenlerin direkt birbirini görmesi sağlanmıştır. Kara istasyonu otomobil üzerinde deniz kıyısına yerleştirildiği için arada engel bulunmamaktadır. Aşağıdaki şekilde kara istasyonu için ölçüm düzenegi gösterilmiştir.



Şekil 16. Otomobil içi ölçüm cihazı düzenegi (verici)

Şekil 16'da MK5 OBU'ya araç içi çakmaklıktan 12V besleme bağlantısı, dizüstü bilgisayar arası veri bağlantısı ve anten kablo bağlantısı görülmektedir. Deniz seviyesinden 5.8m yukarıda bulunan otomobil tavanına dahili mıknatısı vasıtasıyla sabitlenen cihaz anteni yerleşimi aşağıdaki gibidir.



Şekil 17. Otomobil üzerine verici anten yerleşimi (verici)

Şekil 17’de görüldüğü üzere araç camından uzatılan anten kabloları ile MK5 OBU bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Farklı günlerde yapılan her bir ölçüm için araç konumunun aynı olması sağlanmıştır.

Şekil 18 ve 19’da ise deniz istasyonu için ölçüm cihazı ve anten yerleşimi gösterilmektedir. Fotoğraflar, tekne limandayken seyir öncesi yapılan hazırlıkları göstermektedir. Su seviyesi ve tekne üzeri alıcı anten konumu arasında 3.5m’lik mesafe bulunmaktadır. Tasarlanan demir bir düzenek vasıtasıyla hem anten tekne üzerine yine dahili mıknatıs vasıtasıyla sabitlenmiş hem de kamara üstünde bulunan diğer haberleşme cihaz anten ve ekipmanlarıyla oluşabilecek girişim en aza indirilmiştir.



Şekil 18. Tekne üzeri anten yerleşimi (alıcı)

Şekil 18’den de anlaşılacağı üzere anten konumu teknenin gidiş yönüne yakındır. Bu nedenle kara istasyonundan ayrılırken ve yaklaşırken antenin konumunun propagasyona etkisi mevcuttur. Cohda Wireless MGW–303 serisi anten muhafazası içinde iki adet haberleşme, bir adet de GPS anteni bulunmaktadır. Muhafaza içindeki antenlerin her biri için alıcı cihazda farklı alıcı gücü değerleri işlenmektedir.

Şekil 19’da tekne içine yerleştirilen MK5 OBU cihazı görülmektedir. Cihaz 12V beslemesi, anten bağlantı kabloları ve RJ45 portuna bağlı ağ kablosu üzerinden dizüstü bilgisayar bağlantıları görülmektedir.



Şekil 19. Tekne içi ölçüm cihazı düzeneği (alıcı)

Ölçüm başlangıcında yapılan yazılımsal ayarlamaya göre alıcı ve verici olarak davranan MK5 OBU cihazlarının gösterdikleri ve kaydettikleri veri değerleri farklıdır. Hem alıcı hem verici cihazlar enlem ve boylam GPS verilerini işlerken alınan işaret gücü (RSSI - Received Signal Strength Indicator) yalnızca alıcı cihaz için işlenmektedir.

MK5 OBU cihazında; 1/2BPSK, 1/2QPSK ve 1/2 16QAM modülasyonları için alıcıda işlenen RSSI değerleri modülasyon türüne göre de ayrı ayrı verilmekte ve kaydedilmektedir.

2.2. Ölçüm Senaryoları

Mevcut propagasyon modelleriyle uyum ve deniz üzerinde yeni bir radyo dalgası model önerisi amacıyla üç farklı günde 4 adet ölçüm gerçekleştirilmiştir. Her bir ölçüm için

karaya yerleştirilmiş verici anten konumu sabit iken alıcının ölçüm cihazı bağlantısı kesilene kadar kara istasyonundan uzaklaşarak ve yaklaşarak hareket etmesi sağlanmıştır. Tekne hızı hava şartlarının el verdiği sürece sabit tutulmaya çalışılmıştır. Hız bilgisi teknenin kendi GPS cihazı üzerinden takip edilmiştir. Her bir güzergâh için RSSI değerleri işlenmiştir. Ölçüm cihazlarının anten çeşitliliği özelliğine sahip olması nedeniyle alıcı donanımında iki farklı anten için RSSI değerleri saklanmaktadır. Bu sebeple her bir anten biriminde bulunan antenlerin watt cinsinden RSSI değerlerinin toplamı yeniden dBm cinsine döndürülerek tek bir RSSI değeri elde edilmiştir (Kuzuligil, 2021). Ölçüm verisi olarak ifade edilen tüm değer ve grafikler bahsedilen işlemlerle hesaplanmıştır.

2.2.1. Yağışlı Hava Ölçümleri (M1)

Birinci senaryoda hava durumunun yağışlı (çise) ve denizin dalgalı (diğer ölçüm senaryolarına göre) olduğu durumda ölçüm yapılmıştır ve tezde M1 olarak kodlanmıştır. Birinci senaryolar için yapılan hesaplamalarda meteorolojik veriler göz önüne alınarak deniz durumu Beaufort ölçeğine göre 3 olarak alınmıştır. Aşağıdaki tablo, birinci ölçüm senaryosunun yapıldığı tarih için T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Trabzon Havalimanı meteoroloji bölümünden alınan hava ve deniz durumu verilerini göstermektedir (Trabzon DHMİ, 2018).

Tablo 5. M1 senaryosu için hava ve deniz durumu bilgileri

Parametre	Değer
Hava durumu	Çok bulutlu ve yağmurlu
Hava Sıcaklık	6.5 – 7 °C
Deniz dalga yüksekliği	0.1 – 0.5 m
Rüzgâr	220 dereceden 4 ila 8 knot
Denizin durumu	Küçük dalgalı
Deniz suyu sıcaklığı	10.3 °C
Yağış miktarı	06:00 – 12:00 Gmt arası 6 saatlik toplam:2 mm

Tablo 5’de verilen hava ve deniz şartlarında, M1 senaryosu için kara istasyonu sabit iken deniz ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm ortamı aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 20. M1 ölçüm senaryosu

Şekil 20’de kıyıya yakın bir noktada tekne konumu ve kara istasyonu görülmektedir. Denizin derinliğine bağlı olarak kıyıya yaklaşma mesafesi sınırlı olmaktadır.

2.2.2. Dalgalı Yağışsız Hava Ölçümleri (M2)

İkinci senaryoda havanın bulutlu, yağmurun olmadığı ve dalgalı deniz için ölçüm yapılmıştır. Bu senaryo M2 olarak kodlanmıştır ve denizin dalga durumu yine diğer senaryolara göre belirtilmiştir. Hava ve deniz durumunu gösteren tablo aşağıda verilmiştir.

Tablo 6. M2 senaryosu için hava ve deniz durumu bilgileri

Parametre	Değer
Hava durumu	Çok bulutlu
Hava Sıcaklık	8.6 – 10 °C
Deniz dalga yüksekliği	0.1 – 0.5 m
Rüzgâr	040 dereceden 3 ila 5 knot
Denizin durumu	Küçük dalgalı
Deniz suyu sıcaklığı	9 °C
Yağış miktarı	Yok

Tablo 6’da verilen hava ve deniz durumu bilgilerine göre M2 senaryosu, M1 senaryosuna benzer deniz dalga durumu için yapılmıştır. Bu senaryo için deniz durumu Beaufort ölçeğine göre 3 olarak hesaplarda kullanılmıştır. İkinci senaryo için ölçüm ortamı aşağıdaki şekilde gibidir.



Şekil 21. M2 ölçüm senaryosu

Şekil 21’de kıyıya yakın bir konum için antenlerin ve istasyonların konumu gösterilmektedir.

Şekil 22’de ölçüm güzergahı daha iyi gözlemlenebilmektedir. Şekil 22’de belirtilen hava ve deniz şartlarında açık deniz için deniz istasyonu ve kara istasyonu arasındaki menzil ve birbirlerine göre konumları görülebilmektedir.



Şekil 22. M2 senaryosu için açık deniz ölçümü

2.2.3. Farklı Anten Yükseklikleri İçin Açık Hava Durumu Ölçümleri (M3 ve M4)

Sırasıyla M3 ve M4 olarak kodlanan üçüncü ve dördüncü senaryolar, M1 ve M2 senaryolarına göre daha bulutsuz ve sakin deniz ortamı için gerçekleştirilmiştir. Bu iki senaryo için de hesaplamalarda deniz durumu Beaufort ölçeğine göre 2 olarak alınmıştır.

M3 ve M4 senaryoları kapsamında farklı verici anten yükseklikleri, aynı hava ve deniz şartları için peş peşe ölçümler gerçekleştirilmiştir. M3 senaryosunda M1 ve M2 senaryoları için verici istasyonun üzerine konumlandırıldığı otomobil kullanılırken, M4 senaryosu için cihaz anteni, fakülte binasının denize bakan tarafındaki üçüncü kat penceresine (13.3m) yerleştirilmiştir.

Her bir senaryo için yaklaşma ve uzaklaşma ölçümleri ayrı ayrı kaydedilmiştir. Aşağıdaki tabloda üçüncü ve dördüncü senaryo ölçümlerinin gerçekleştirildiği hava ve deniz durumu bilgileri verilmektedir.

Tablo 7. M3 ve M4 senaryoları için hava ve deniz durumu bilgileri

Parametre	Değer
Hava durumu	Çok bulutlu
Hava Sıcaklık	10 °C
Deniz dalga yüksekliği	0.1 – 0.5 m
Rüzgâr	350 dereceden 4 ila 7 knot
Denizin durumu	Küçük dalgalı
Deniz suyu sıcaklığı	9.1 °C
Yağış miktarı	Yok

M3 ve M4 ölçüm senaryoları, M1 ve M2 ölçüm senaryolarına nazaran daha açık bir hava ve az dalgalı bir deniz ortamında gerçekleştirilmiştir. M3 senaryosu ölçüm ortamı aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil 23. M3 senaryosu için ölçüm ortamı

Şekil 23’den görüldüğü üzere hava durumu açık ve deniz dalgası durumu ölü dalga derecesindedir. Verici anten fakülte binası önünde M1 ve M2 ölçümlerindeki konumunda bulunmaktadır.

M4 senaryosunun ölçümü için deniz seviyesinden 13.3m yükseklikte bulunan fakülte binasındaki üçüncü kat penceresine yerleştirilen verici anten ve MK5 OBU cihazı kullanılmıştır. M4 senaryosu için ölçüm ortamı aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 24. M4 senaryosu için ölçüm ortamı

Şekil 24’de deniz seviyesinden diğer ölçümlere göre daha yüksek bir konuma yerleştirilmiş verici kara istasyonu gösterilmektedir.

2.3. Ölçüm Sonuçları

5.6 GHz frekansında kara – deniz haberleşme kanalı propagasyonu için alınan işaret gücü ölçüm sonuçları yazılan Matlab programı ile MK5 OBU cihaz verilerinden çekilerek işlenmiştir. Dört farklı senaryo (M1, M2, M3 ve M4) göz önüne alınarak farklı deniz durumu ve verici anten yükseklikleri için ham veri sonuçları ve ölçüm rotaları grafik ve resim olarak gösterilmiştir.

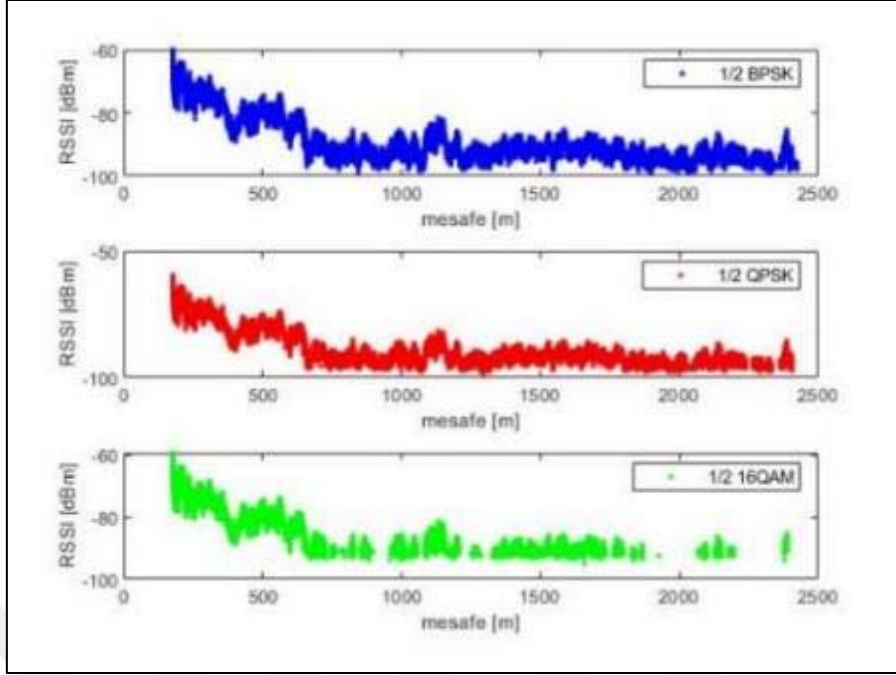
Aşağıdaki şekilde M1 senaryosu için denizde tekne ile izlenen rota, alıcı cihazdan elde edilen enlem ve boylam bilgilerine göre çizilmiştir.



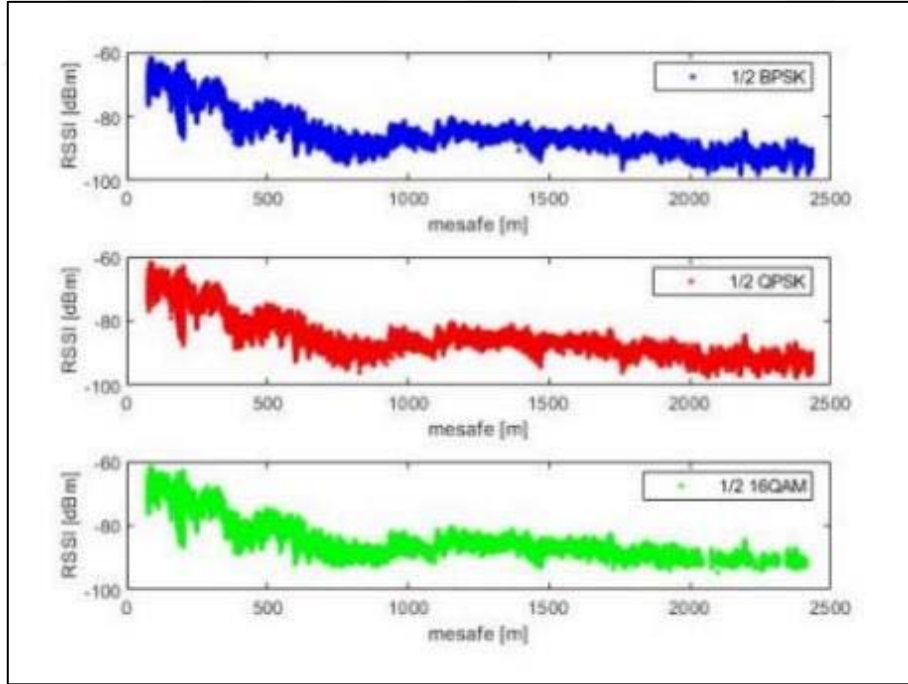
Şekil 25. M1 ölçüm senaryosu için izlenen rota

Şekil 25’da kırmızı ile gösterilen yol, gidiş yani kara istasyonundan uzaklaşılan rotayı göstermektedir. Mavi ile gösterilen yol ise geliş yani kara istasyonuna yaklaşılacak rotayı göstermektedir. Akıntı ve rüzgâr nedeniyle her ne kadar doğrusal bir rota amaçlansa da gidiş ve dönüş yolları arasında konum farkları oluşmuştur. Ayrıca deniz ölçümü amacıyla kullanılan tekne, sınıfı gereği gelişmiş seyir ekipmanlarına sahip değildir. Bu nedenle gemiyi kullanan kaptanın tecrübe ve gözlemleri rota takibinde etkindir.

M1 senaryosu için gidiş ve dönüş yolları süresince elde edilen alıcısındaki güç değerleri (RSSI) modülasyonlar da dikkate alınarak sırasıyla aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Şekil 26’da karadan uzaklaşarak yapılan ölçümler (gidiş) üç farklı modülasyon türü için gösterilmektedir. Ölçümler süresince 10 knot’lık tekne hızı korunmaya çalışılmıştır. Şekil 27’de dönüş yönünde alınan işaret gücünün kesildiği konumdan dönüş sağlanarak kara istasyonuna yaklaşılırken elde edilen alıcı gücü gösterilmektedir. Alınan işaret güç eğrileri grafiklerinde kırmızı işaret 1/2 16QAM, yeşil işaret 1/2 QPSK ve mavi işaret ise 1/2 BPSK modülasyonu için elde edilen değerlerdir.

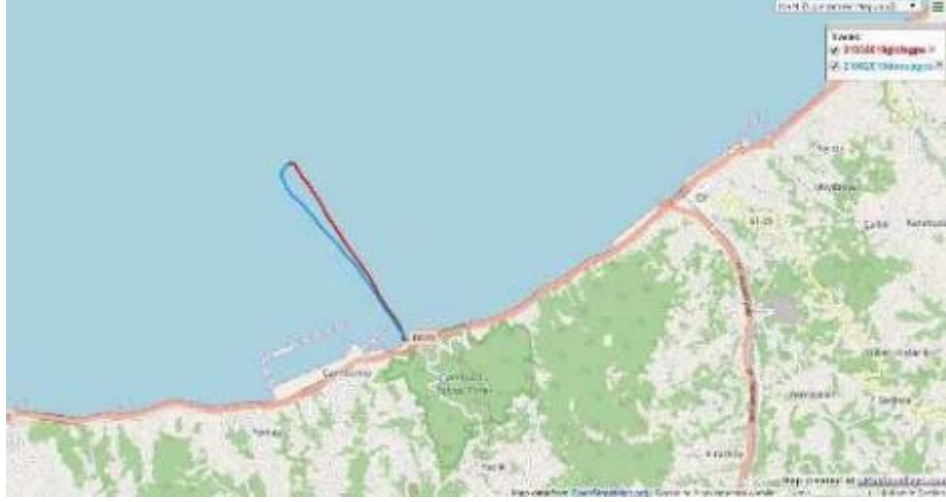


Şekil 26. M1 senaryosu için gidiş rotasında elde edilen RSSI



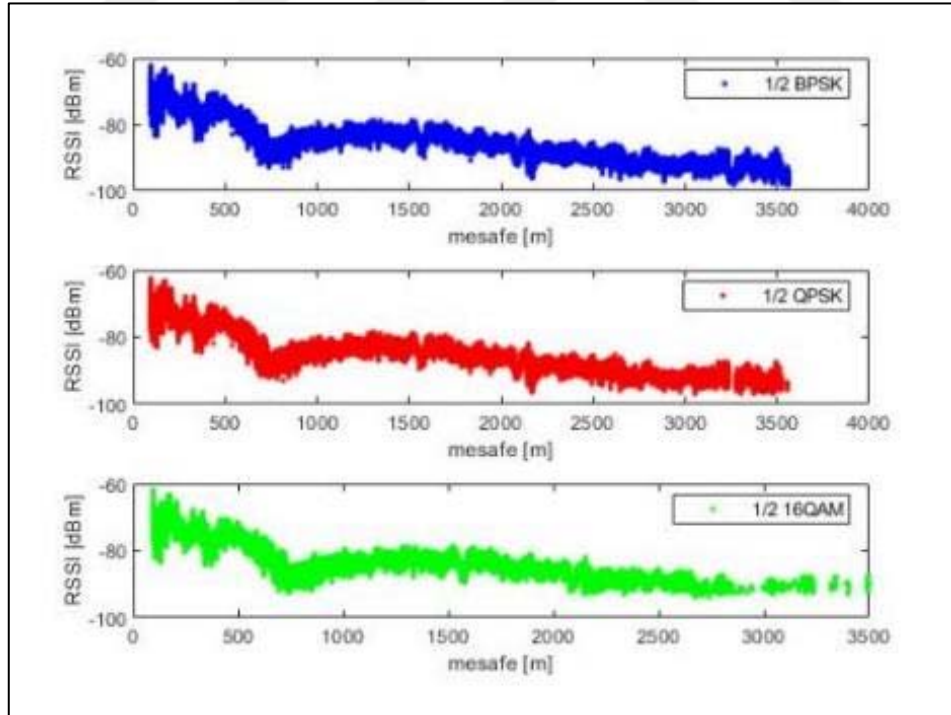
Şekil 27. M1 senaryosu için dönüş rotasında elde edilen RSSI

Şekil 26 ve 27 incelendiğinde M1 senaryosu için ulaşılabilen en uzak mesafe 2432.2m olarak hesaplanmıştır. M2 senaryosunda takip edilen güzergâh aşağıdaki şekilde verilmiştir.

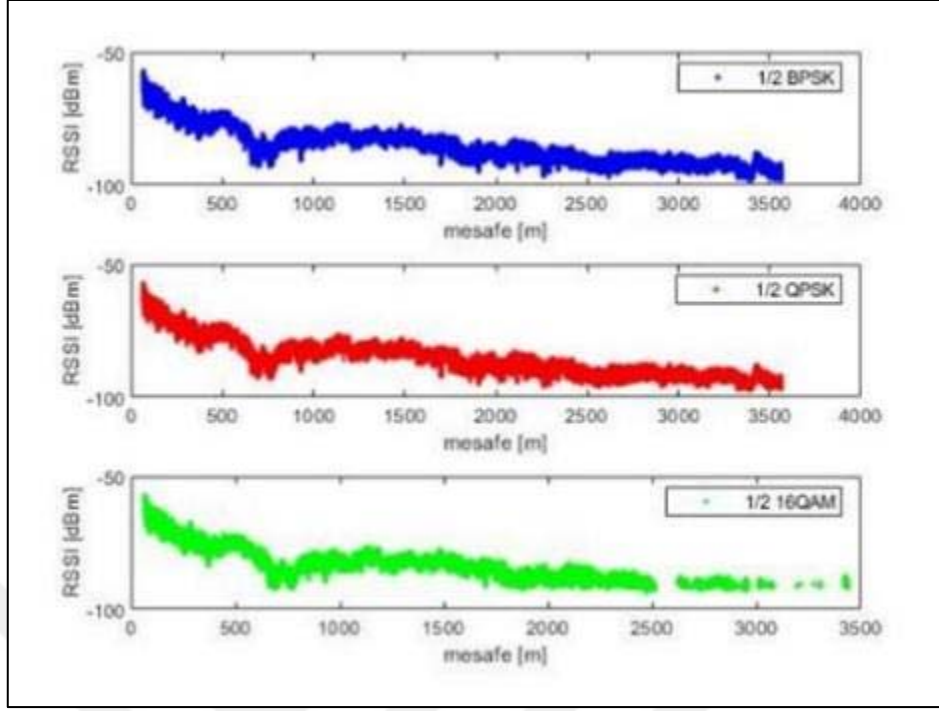


Şekil 28. M2 ölçüm senaryosu için izlenen rota

Şekil 28’de kırmızı rota gidiş yolunu, mavi rota ise dönüş yolunu göstermektedir. Gidiş ve dönüş rotaları için elde edilen RSSI değerleri (dBm) alıcı-verici arası mesafeye bağlı olarak aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



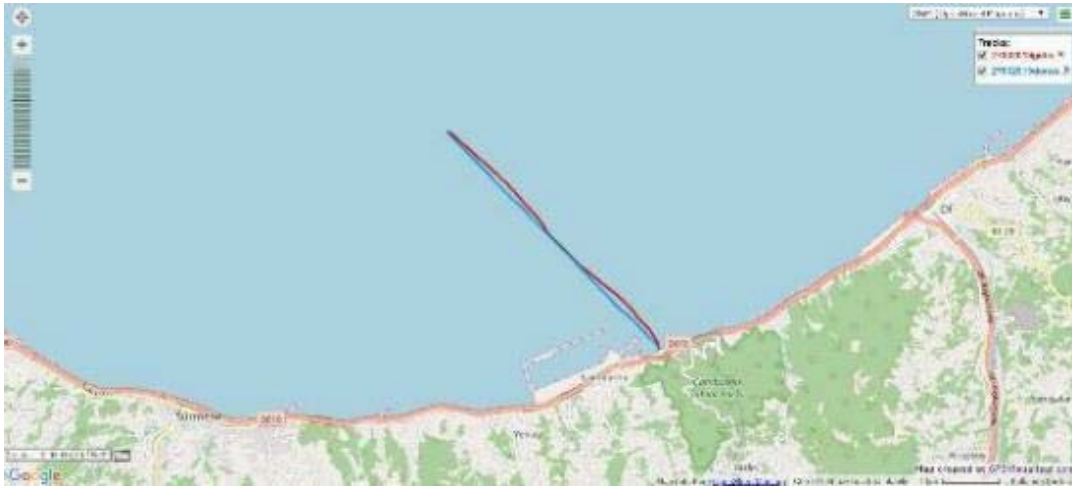
Şekil 29. M2 senaryosu için gidiş rotasında elde edilen RSSI



Şekil 30. M2 senaryosu için dönüş rotasında elde edilen RSSI

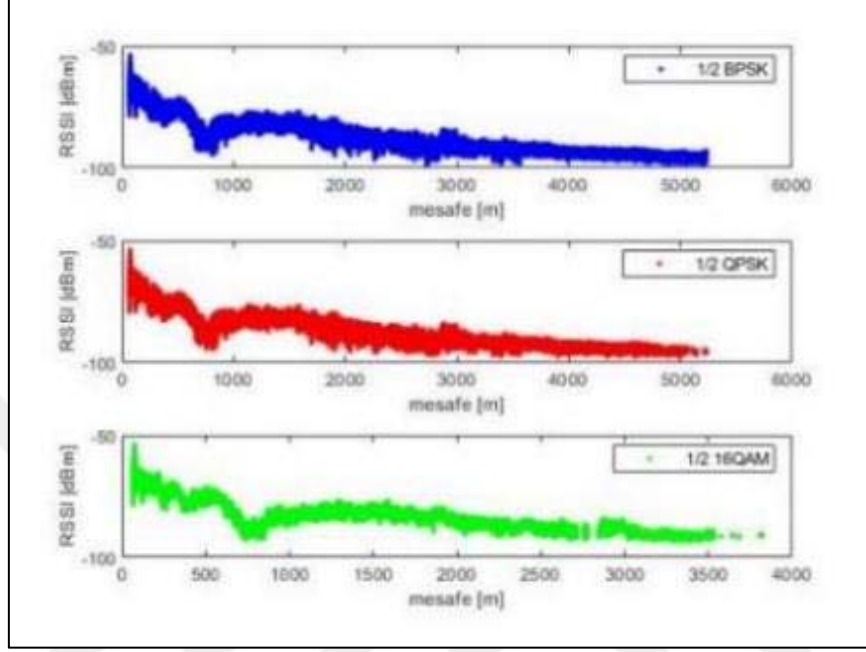
Şekil 29 ve 30’da M2 senaryosuna ait alıcıda kaydedilen güç değerleri gidiş ve dönüş güzergahlarında 3 modülasyon türü için gösterilmektedir. Alıcı hassasiyetine bağlı olarak ulaşılabilen en uzak mesafe 3563.5m olarak hesaplanmıştır.

M3 senaryosu için yapılan ölçüm esnasında takip edilen güzergâh aşağıdaki şekilde verilmiştir.

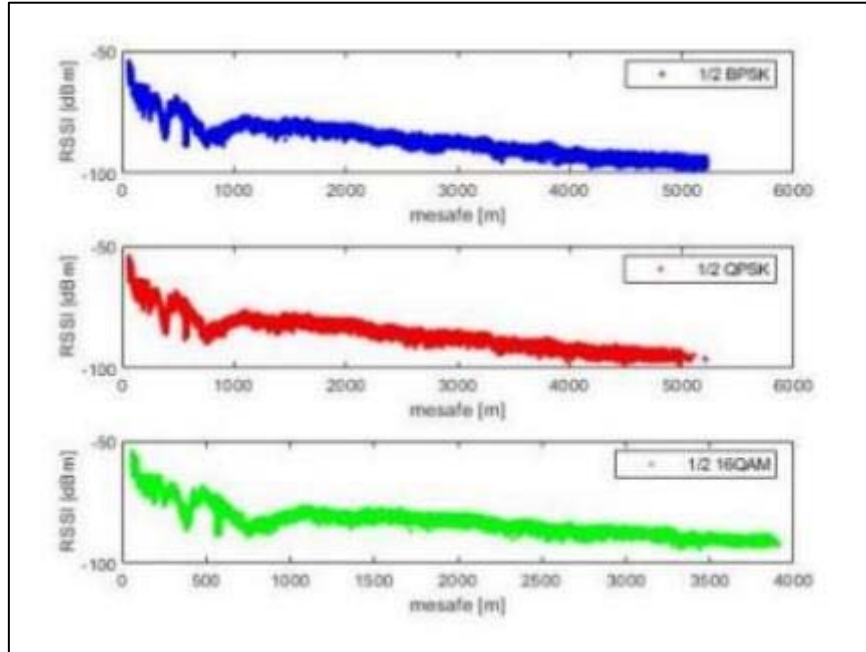


Şekil 31. M3 ölçüm senaryosu için izlenen rota

Şekil 31’den de görülebileceği üzere tüm ölçümler için gidiş (kırmızı) ve dönüş (mavi) yönünde olabildiğince doğrusal bir yol izlenmeye çalışılmıştır. Şekil 31’deki rota boyunca alıcıda elde edilen güç değerleri Şekil 32 ve 33’de verilmektedir.



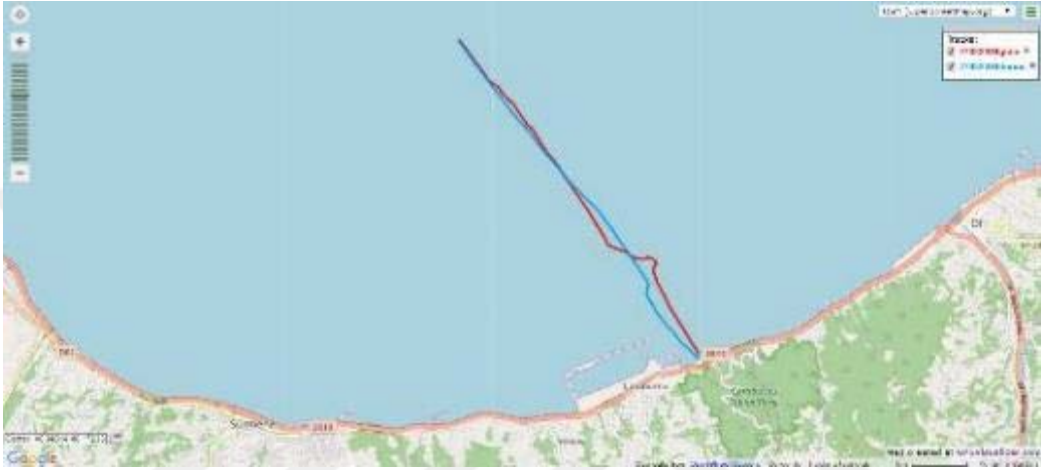
Şekil 32. M3 senaryosu için gidiş rotasında elde edilen RSSI



Şekil 33. M3 senaryosu için dönüş rotasında elde edilen RSSI

Şekil 32 ve 33’de sırasıyla gidiş ve dönüş rotalarında yapılan ölçümler sonucu elde edilen RSSI değerleri modülasyon türlerine göre gösterilmektedir. Alıcı ve verici arasında bağlantı kesilinceye kadar ölçüm yapılabilen en uzak mesafe 5224.5m olarak hesaplanmıştır.

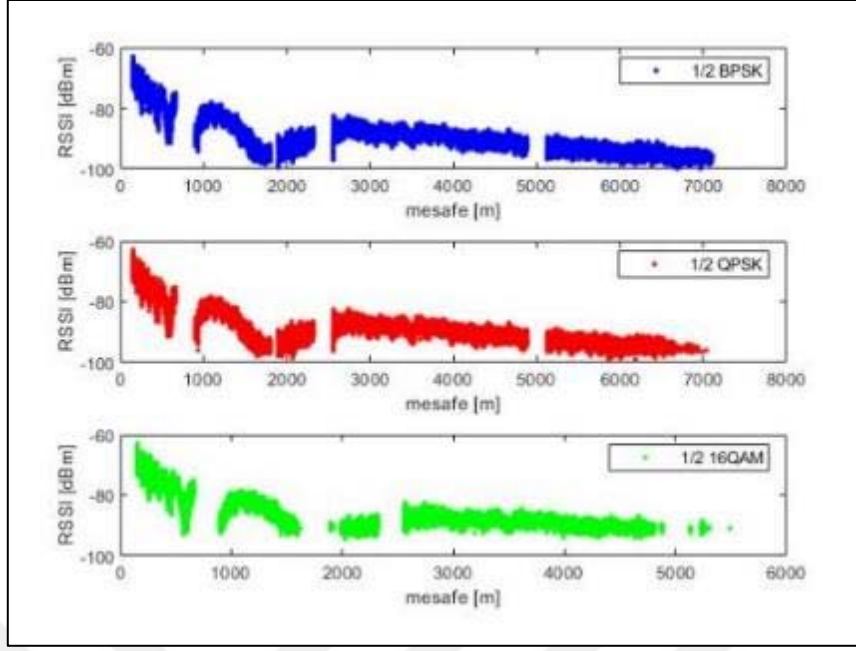
M4 senaryosunda, M3 senaryosu ile aynı hava ve deniz durumunda deniz seviyesinden 13.3m yükseğe konumlandırılan verici anteni için ölçüm yapmak amacıyla takip edilen güzergâh aşağıdaki şekilde verilmiştir.



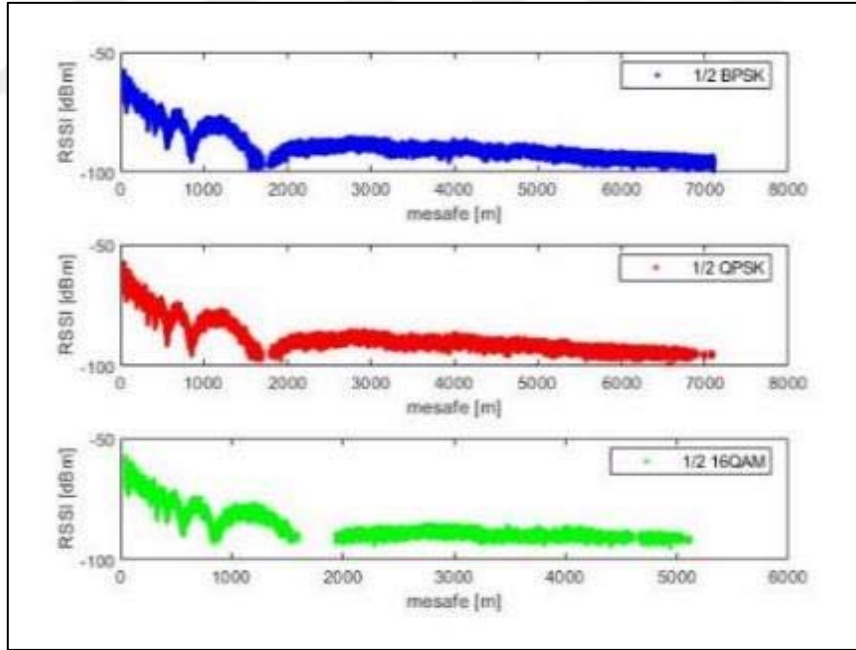
Şekil 34. M4 ölçüm senaryosu için izlenen rota

Şekil 34’de dördüncü senaryoda gidiş yönü için kırmızı, dönüş yolu için mavi yol takip edilerek ölçümler yapılmıştır. Diğer ölçümlerde olduğu gibi kara istasyonuna göre olabildiğince doğrusal bir yol izlenmeye çalışırken özellikle gidiş yönünde tespit edilen sapmalar sonrasında tekne kaptanının müdahalesi ile düzeltilmiştir.

M4 senaryodaki hava ve deniz şartlarında 13.3m verici anten yüksekliği için alıcı cihazda yapılan kayıtlar gidiş ve dönüş yolları için aşağıdaki şekillerdeki gibidir.



Şekil 35. M4 senaryosu için gidiş rotasında elde edilen RSSI



Şekil 36. M4 senaryosu için dönüş rotasında elde edilen RSSI

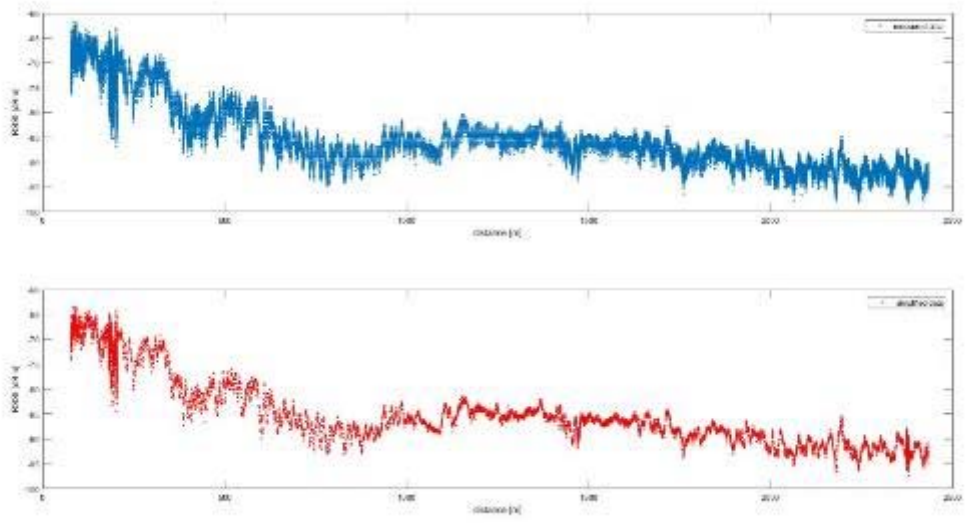
Şekil 35 ve 36’da ölçüm verileri kullanılarak çizilen grafikler 13.3m kara istasyonu için üç modülasyon türünde elde edilmiştir. Verici antenden haberleşme kesilene kadar ulaşılabilen en uzak mesafe 7106.6m’dir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

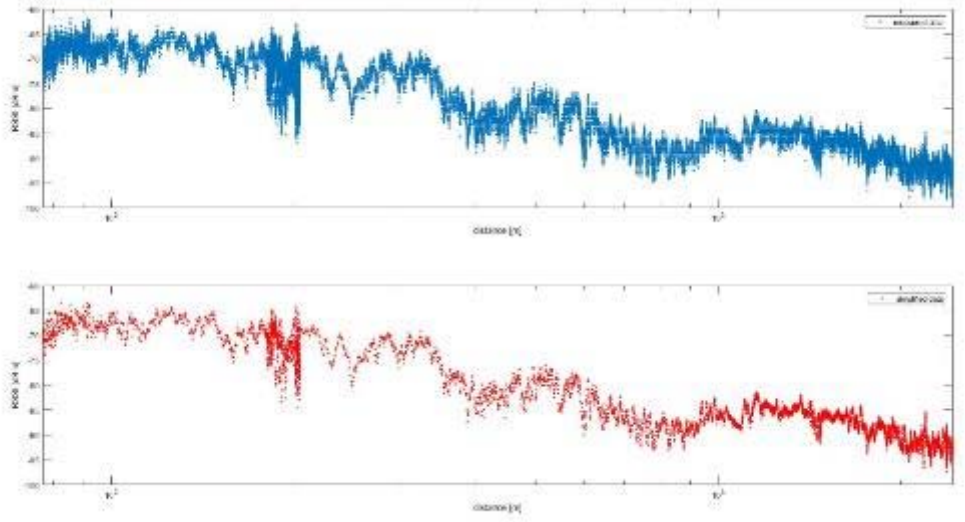
Ölçüm sonuçlarının mevcut propagasyon modelleriyle karşılaştırılması ve örtüşme oranı sonucunda modelin ölçüm ortamı ve şartları için başarımının belirlenmesi bu çalışmanın amaçlarından biridir. Şüphesiz ki her ortam için elde edilecek sonuçlar farklı olacaktır (Wang vd., 2018). Bu sebeple deneysel ve teorik çalışmalar sonucunda yeni bir modelin önerilme ihtiyacı oluşmaktadır.

Modellerle karşılaştırmak amacıyla her bir ölçüm senaryosu için dönüş rotasında 1/2 BPSK modülasyon türü seçilerek alıcıda elde edilen RSSI verileri kullanılmıştır. Kıyıdan uzaklaşırken tekne güvertesinden kaynaklı meydana gelebilecek yansıma ve girişimlerden az etkilenebilmek amacıyla hesaplama ve karşılaştırmalarda kıyıya yaklaşma (dönüş) rotası ile elde edilen sonuçlar seçilmiştir. Cihazlardan üç farklı modülasyon için elde edilen RSSI değerleri arasında, en fazla güç verimliliğine sahip olması nedeniyle BPSK modülasyonu için elde edilen veriler tercih edilmiştir.

Alıcı tarafında kaydedilen ham veriler, ölçüm donanımının saniyede 400 paket veriyi işlemesi ve deniz ortamında alıcı hareketinin sınırlı hıza ulaşabilmesi nedeniyle çok fazla veriyi içermektedir. Mesafeye bağlı RSSI verisi incelendiğinde aynı mesafe noktası için birden fazla verinin kaydedildiği tespit edilmiştir. Burada oluşan veri yığılması ve miktarı Matlab programında hesaplamaların yapılmasına olanak sağlamamıştır. Bu sorunun giderilmesi amacıyla aynı noktaya karşılık gelen dBm cinsinden RSSI değerlerinin watt cinsinden aritmetik ortalamaları hesaplanarak, dBm türüne dönüştürülerek kullanılmıştır. Örnek bir değerlendirme olarak M1 senaryosuna ait ham veriler ve sadeleştirilmiş veri sonuçları serbest uzay yol kaybı yöntemi için başarımlar açısından karşılaştırıldığında; R_squared değerinde yaklaşık %1, RMSE değerinde yaklaşık %4'lük bir değişim görülmüştür. Aynı yol izlenerek, 2-ışınlı yol kaybı yöntemi için R_squared değerinde %1.5 ve RMSE değerinde yaklaşık %1'lik değişim olduğu hesaplanmıştır. Ortaya çıkan farklar, çalışmamız açısından ihmal edilebilir. Bu yaklaşımla Matlab programının hafıza sınırlama sorunu aşılmıştır. Aşağıdaki grafiklerde her bir ölçüm için doğrusal ve logaritmik eksenle ölçüm verisi ile ölçüm verisinin ayıklanması sonucu elde edilen yeni veriler karşılaştırılmıştır.

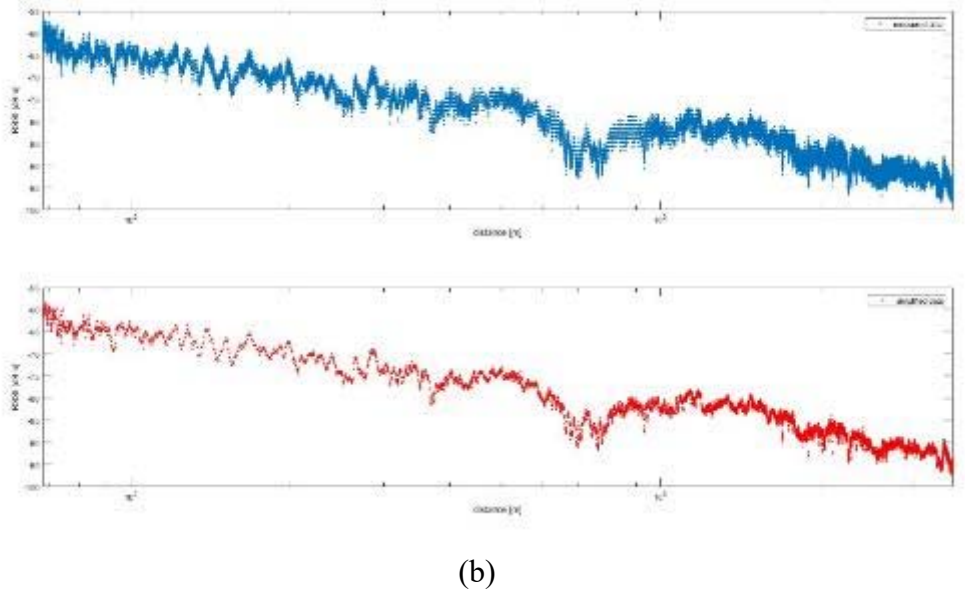
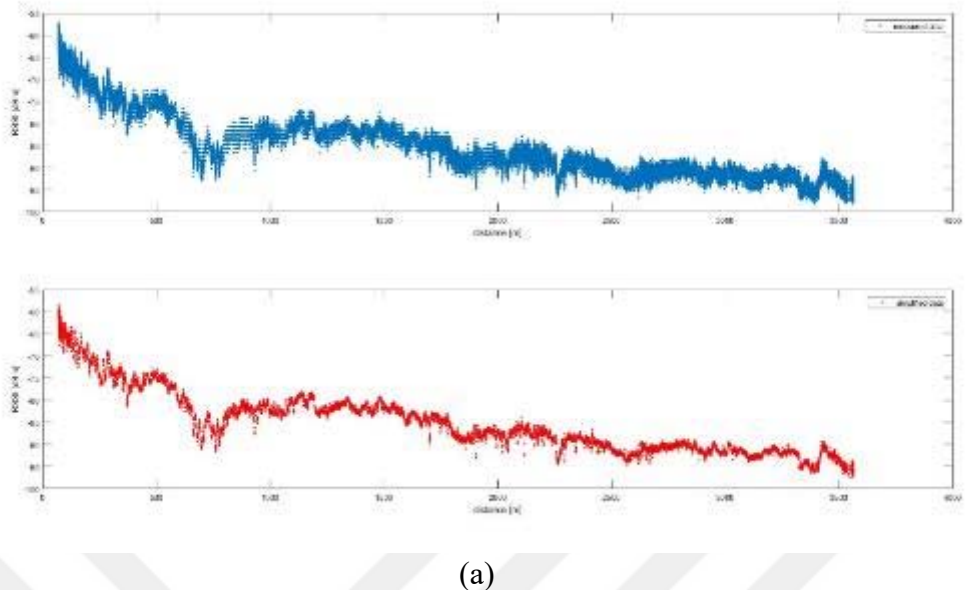


(a)

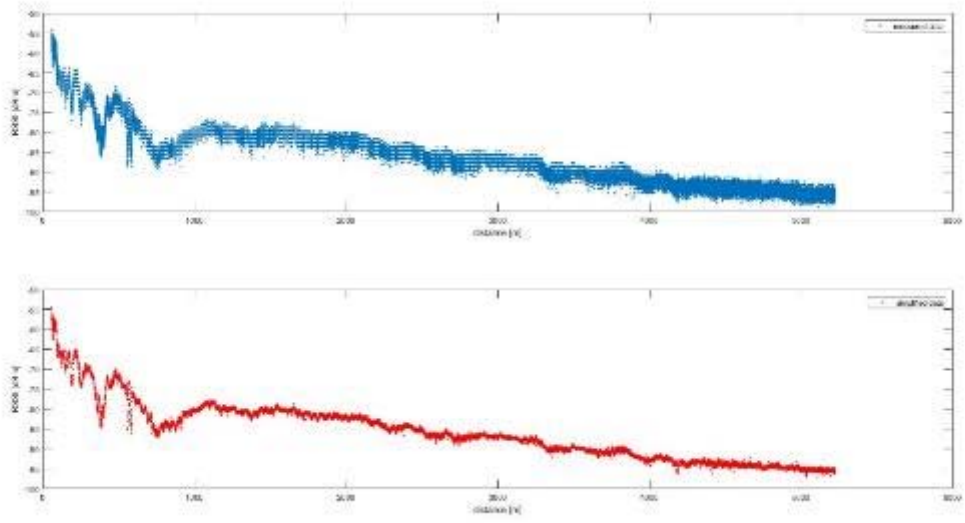


(b)

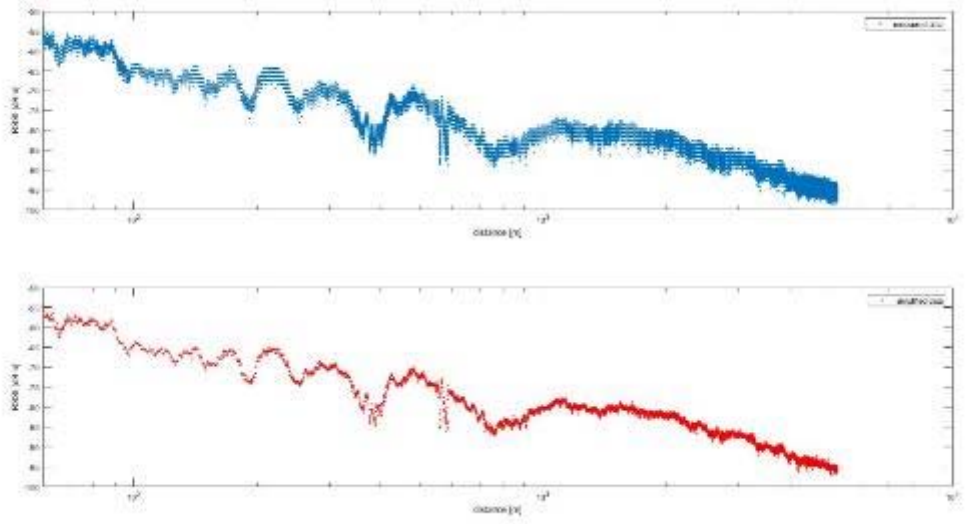
Şekil 37. (a) Doğrusal (b) Logaritmik düzlemde M1 senaryosu için ölçüm verileri ve ayıklanan verilerin karşılaştırılması



Şekil 38. (a) Doğrusal (b) Logaritmik düzlemde M2 senaryosu için ölçüm verileri ve ayıklanan verilerin karşılaştırılması

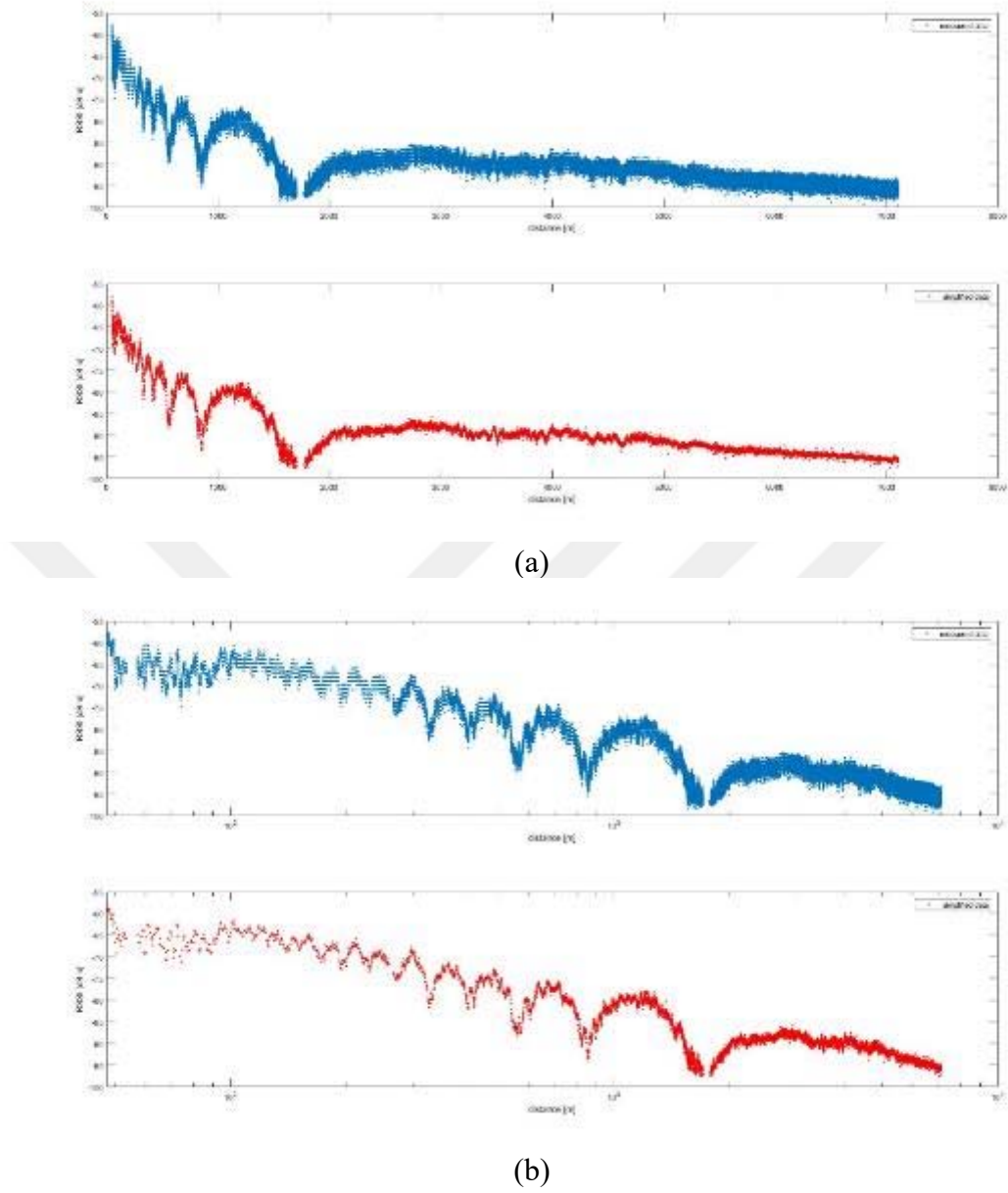


(a)



(b)

Şekil 39. (a) Doğrusal (b) Logaritmik düzlemde M3 senaryosu için ölçüm verileri ve ayıklanan verilerin karşılaştırılması



Şekil 40. (a) Doğrusal (b) Logaritmik düzlemde M4 senaryosu için ölçüm verileri ve ayıklanan verilerin karşılaştırılması

Şekil 37, 38, 39 ve 40’da sırasıyla M1, M2, M3 ve M4 senaryoları için elde edilen ham ölçüm verileri ve ham veri işlenerek ayıklanan veriler, farklı eksen ölçeklendirilmeleriyle gösterilmiştir. Çalışmanın geri kalanında ölçüm ve modelin grafiksel karşılaştırmaları için Şekil 37, 38, 39 ve 40’da mavi renkle gösterilen ham veriler kullanılmıştır. Model ve başarıım hesaplamaları için Şekil 37, 38, 39 ve 40’de kırmızı renkli grafikleri oluşturan sadeleştirilmiş veriler kullanılmıştır. Tablo 8’de tüm hesaplamalarda kullanılan ortak parametreler verilmektedir.

Tablo 8. Ortak sistem parametreleri

Parametre	Değer
Taşıyıcı frekansı (MHz)	5600
Alıcı anten yüksekliği (m)	3.5
Verici anten yüksekliği (m)	5.8 (M1, M2, M3), 13.3 (M4)
Modülasyon türü	1/2 BPSK
Verici gücü (dBm) (P_t)	23
Anten kazancı (dBi)	Anten ışıma örüntüsü, gelme açısı ve yansıma noktasına göre hesaplandı

Tablo 8’de kullanılan büyüklükler de dahil olmak üzere, tüm çalışma boyunca “ f ” frekans, “ h_r ” alıcı anten yüksekliği, “ h_t ” verici anten yüksekliği, “ P_t ” verici gücü, “ P_r ” alıcıda ölçülen işaret gücü (RSSI - dBm), “ G_{td} ” verici antenin direkt dalga yönündeki kazancı, “ G_{tr} ” verici antenin yansıyan dalga yönündeki kazancı, “ G_{rd} ” alıcı antenin direkt dalga yönündeki kazancı ve “ G_{rr} ” de alıcı antenin yansıyan dalga yönündeki kazancı olarak hesaplamalara katılacaktır. Buradan $G_{td} \cdot G_{rd}$ toplam direkt dalga yönündeki kazancı (G_{R_1}), $G_{tr} \cdot G_{rr}$ yansıyan dalga yönündeki toplam kazancı (G_{R_2}) ifade edecektir. G_{td} , G_{tr} , G_{rd} ve G_{rr} hesaplamaları için Şekil 14 ve 15’de görüldüğü üzere anten donanımı teknik bilgilerinden elde edilen ışıma örüntüsü için ışıma açısına bağlı yaklaşık bir denklem uydurulmuş, yansıma noktası, gelme ve yansıma açılarına bağlı olarak kazanç değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca direkt dalganın aldığı yol “ R_1 ”, yansıyan dalganın aldığı yol da “ R_2 ” ile simgelenmiştir.

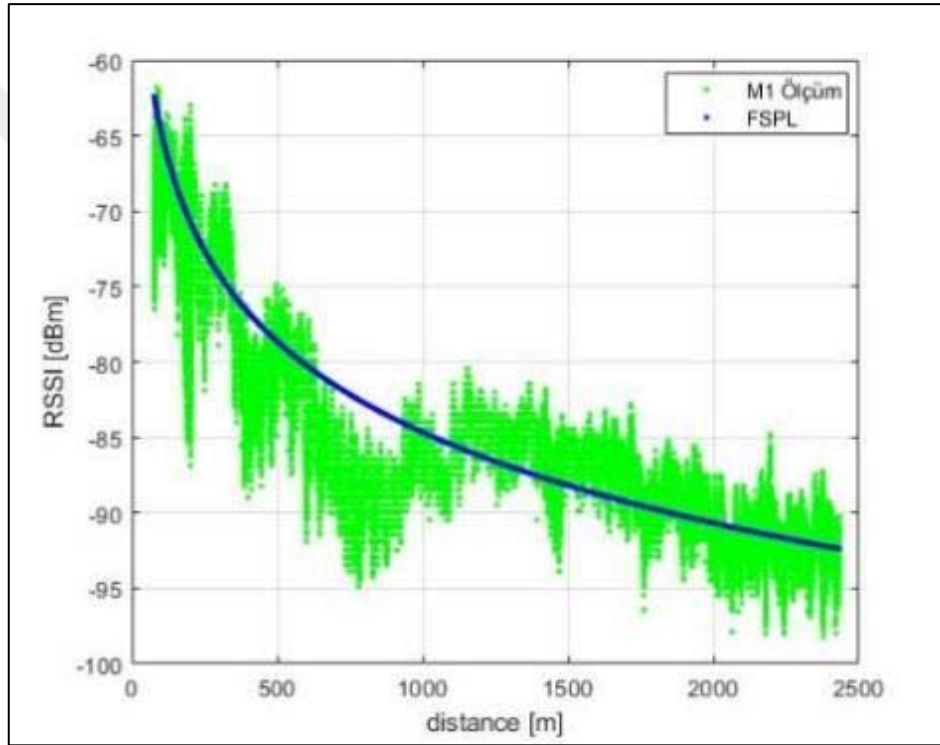
3.1. Serbest Uzay Yol Kaybı Modeli (FSPL) ve Ölçüm Verilerinin Karşılaştırılması

Her bir senaryo için ulaşılabilen maksimum mesafeye bağlı olarak serbest uzay yol kaybı hesaplamaları yapılmış, elde edilen sonuçlara göre alıcıdaki RSSI değerleri tahmin edilmiş, ölçüm verileri ve hesaplama sonuçları grafiklerde karşılaştırılmış ve serbest uzay yol kaybı modelinin ölçüm verilerine göre bu propagasyon kanalını tahmin etme başarımı RMSE (Root Mean Square Error) ve R-squared değerleri ile ortaya koyulmuştur. Serbest uzay yol kaybı modelinde RSSI değerine geçiş için P_t , G_{td} ve G_{rd} parametreleri

kullanılmıştır (Ang & Wen, 2008). FSPL için alıcıdaki RSSI değerinin hesaplanması denklem 82'deki gibidir. L_{FSPL} , serbest uzay yol kaybını ifade etmektedir.

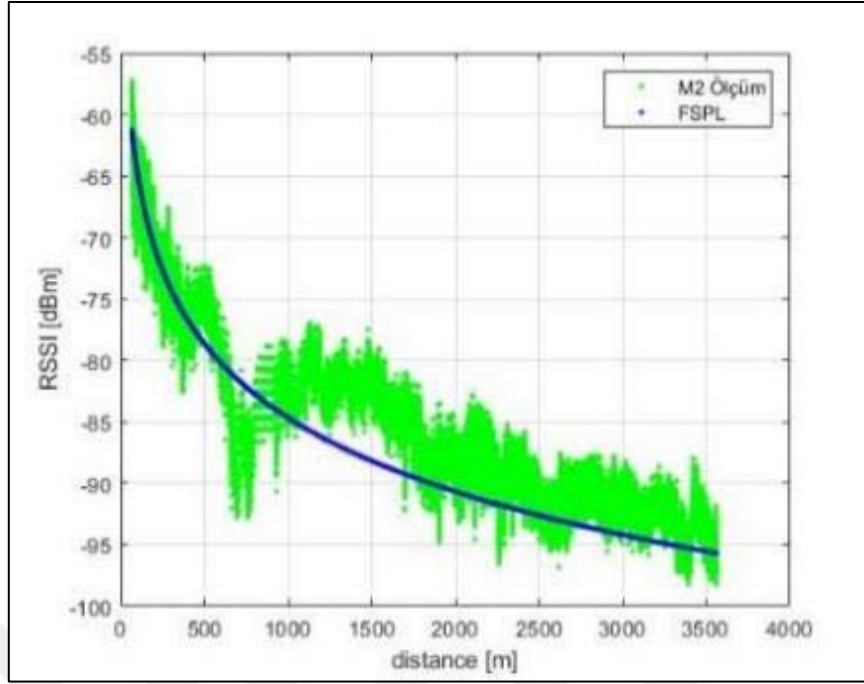
$$RSSI_{FSPL}[dBm] = P_t[dBm] + G_{td}[dBi] + G_{rd}[dBi] - L_{FSPL}[dB] \quad (82)$$

Denklem 82'deki hesaplamalar sonucu alıcıda elde edilecek $RSSI_{FSPL}$ değerleri ve her bir senaryo için ölçüm verileri grafiksel ve topluca başarımlar değerlendirilmesi olarak aşağıdaki gibi karşılaştırılmıştır.



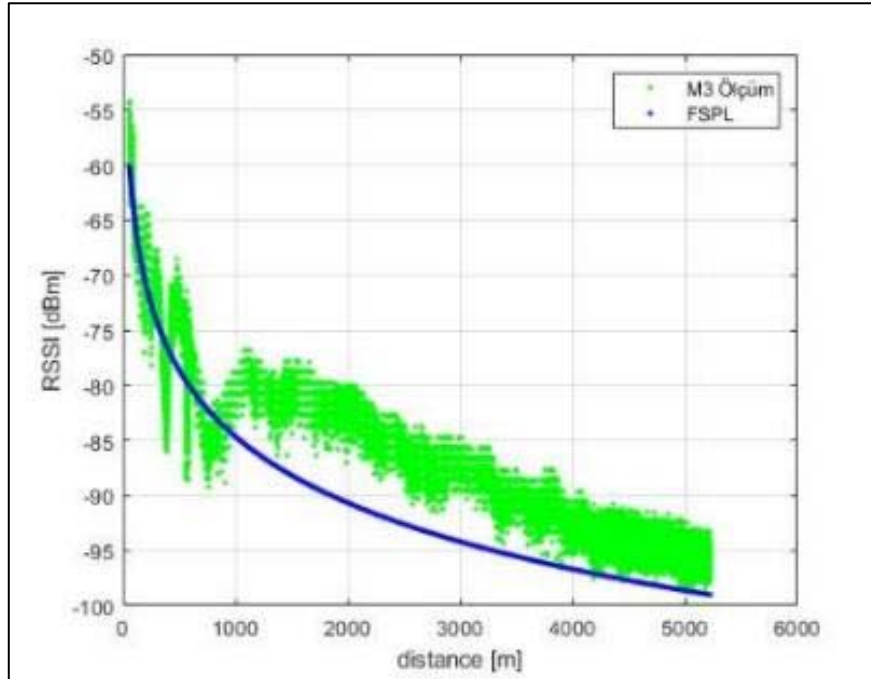
Şekil 41. M1 senaryosu ölçüm ve FSPL modeli tahmini RSSI değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 41'de FSPL modeli ile hesaplanan alıcıdaki RSSI değeri mavi çizgi ile gösterilmektedir.



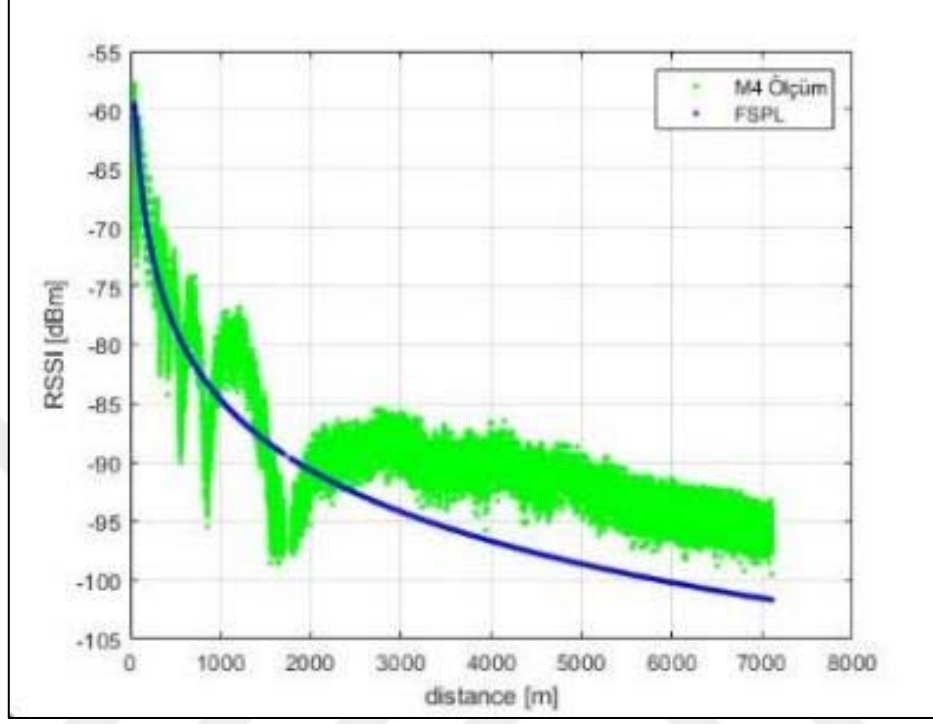
Şekil 42. M2 senaryosu ölçüm ve FSPL modeli tahmini RSSI değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 42’de FSPL modeli ile hesaplanan alıcıdaki RSSI değeri mavi çizgi ile gösterilmektedir.



Şekil 43. M3 senaryosu ölçüm ve FSPL modeli tahmini RSSI değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 43’de FSPL modeli ile hesaplanan alıcıdaki RSSI değeri mavi çizgi ile gösterilmektedir.



Şekil 44. M4 senaryosu ölçüm ve FSPL modeli tahmini RSSI değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 44’de FSPL modeli ile hesaplanan alıcıdaki RSSI değeri mavi çizgi ile gösterilmektedir. Tablo 9’da tüm senaryolar için ölçüm verileri ile alıcıda hesaplanan $RSSI_{FSPL}$ değerleri başarımlı değerlendirme yapılmıştır.

Tablo 9. Ölçüm senaryoları ve $RSSI_{FSPL}$ verileri başarımlı değerlendirme

	M1	M2	M3	M4
$R_squared$	0.8884	0.9058	0.8866	0.8194
$RMSE [dB]$	3.1051	3.4990	5.7186	5.7203

3.2. 2-ışınlı Yol Kaybı Modeli (2-ray) ve Ölçüm Verilerinin Karşılaştırılması

2-ışınlı yol kaybı modeli ile alıcıdaki RSSI değerinin her bir ölçüm senaryosu için hesaplanmasında; modelin en sade halinden, gelme açısına bağlı hesaplanan kazançlar $G(\theta)$, Fresnel yansıma (düzgün yüzeyden yansıma) katsayısı (Γ) ve pürüzlülük parametreleri (ρ_s , D , S ve L_{Diff}) ve yalnızca M1 senaryosu için yağmur zayıflatması (A) da dikkate alınarak ortam parametrelerinin ele alınmasını sağlayan daha genel haline kadar farklı yaklaşımlar ele alınmıştır. 2-ışınlı modelin kullanılan parametrelere göre grafik ve hesaplamalarda adlandırması aşağıdaki tabloya göre yapılmıştır.

Tablo 10. 2-ışınlı model ve kullanılan parametrelere göre adlandırılması

Etiket adı	Kullanılan parametreler
2-ray	P_t, h_r, h_t, d
2-ray+ Γ	$P_t, h_r, h_t, d, \epsilon_r, p$
2-ray+ Γ + $G(\theta)$	$P_t, h_r, h_t, d, \epsilon_r, p, R_1 \neq R_2, G_{R_1} \neq G_{R_2}$
REL (2-ray+ Γ +rough)	$P_t, h_r, h_t, d, \epsilon_r, p, \rho_s, D, S, R_1 = R_2, G_{R_1} = G_{R_2}, L_{Diff}, A$
REL + $G(\theta)$	$P_t, h_r, h_t, d, \epsilon_r, p, \rho_s, D, S$ ve $L_{Diff}, R_1 \neq R_2, G_{R_1} \neq G_{R_2}, A$
<i>A: Yağmur zayıflatması yalnızca M1 senaryosunda kullanılmıştır, $L_{Diff} = 0$ dB</i>	

Tablo 10 incelendiğinde sunulacak grafik ve sonuçların daha kolay anlaşılabilmesi için 2-ışınlı yol kaybı olarak kara ve deniz propagasyon kanalı hesaplamalarında en sık kullanılan modelin farklı parametrelere bağlı etiketlendirilmesi görülmektedir.

“2-ray” olarak bahsedilen yaklaşımda alıcı-verici anten yükseklikleri ve mesafe (d) parametreleri kullanılarak en sade yaklaşımın tahmin başarımı incelenmiştir. Denklem 83’de Tablo 10’de bahsedilen parametreler için 2-ışınlı yol kaybı hesabına göre alıcıdaki RSSI hesabı gösterilmektedir. L_{2-ray} , 2-ışınlı yol kaybını ifade etmektedir.

$$RSSI_{2-ray}[dBm] = P_t[dBm] + G_{td}[dBi] + G_{rd}[dBi] - L_{2-ray}[dB] \quad (83)$$

“2-ray+ Γ ” gösterimi Fresnel yansıma katsayısının da hesaplanarak dikkate alındığı durumu ifade etmektedir. Su tuzluluğu ve çalışılan frekansa bağlı olarak bağlı dielektrik (ϵ_r)

ve iletkenlik (p) katsayılarının değerleri değişmektedir (Ishtaiwi, 2021). Fresnel yansıma katsayısı hesabında, farklı çalışmalardaki benzer veriler dikkate alınarak deniz suyu için bağıl dielektrik katsayısı 81, iletkenlik 5 Siemens/m olarak kullanılmıştır [Ishtaiwi, 2021; El-Sallabi vd., 2018; Picquenard, 1974; Parsons, 2000; ITU-R P.527-3, 1992; Rappaport, 2002]. Bu değerler dikkate alınarak bulunan yansıma katsayısı (Γ) ve ona bağlı yol kazanç faktörü (F – path gain factor / pattern propagation factor) sonucu elde edilen 2-ışınlı yol kaybı için alıcıdaki RSSI değeri denklem 84’de hesaplanmıştır.

$$RSSI_{2-ray+\Gamma}[dBm] = P_t[dBm] + G_{td}[dBi] + G_{rd}[dBi] - L_{FSPL}[dB] + F[dB] \quad (84)$$

“2-ray+ Γ +G(θ)” etiketi, yol kazanç faktörü (F) hesabında yansıma katsayısı yanında gelme açısına bağlı anten kazançlarının ve yansıyan-direkt dalganın aldığı mesafeler ihmal edilmeden kullanılmıştır. Bu yaklaşımda, direkt dalga için alıcı-vericideki toplam kazanç (G_{R_1}) ve yansıyan dalga için alıcı-vericideki toplam kazanç (G_{R_2}), ayrıca direkt dalganın aldığı mesafe (R_1) ile yansıyan dalganın aldığı mesafe (R_2)’nin hesaplanan gerçek değerleri kullanılmıştır. Sonuçta alıcıda elde edilen RSSI değeri denklem 85’deki gibidir.

$$RSSI_{2-ray+\Gamma+G(\theta)}[dBm] = P_t[dBm] + G_{td}[dBi] + G_{rd}[dBi] - L_{FSPL}[dB] + F[dB] \quad (85)$$

“2-ray+ Γ +rough (REL – Round Earth Loss)” kısaltması, pürüzlülük parametreleri başlığı altında ρ_s , D , S ve L_{Diff} parametrelerinin de eklenerek yol kaybının hesaplandığı yaklaşımı ifade etmektedir. Düz dünya kaybı (PEL – Plane Earth Loss) olarak kabul edilen serbest uzay ve 2-ışınlı yol kaybı modellerine D (divergence) parametresi ve L_{Diff} (diffraction loss) kırınım kaybının eklenmesi ile dünyanın eğriliği de hesaba katıldığından, denklemin son haline REL modeli denilmiştir (Yang vd., 2013). L_{Diff} parametresi için tüm ölçümlere göre yapılan hesaplamalarda $d < D_{06}$ yani ölçüm için alınan mesafe, Fresnel bölgesinin %60’ına karşılık gelen mesafeden küçük olduğu için $L_{Diff} = 0dB$ olarak hesaplamalara katılmıştır. Tablo 11’de her bir ölçüm senaryosu için ölçüm menzili ve hesaplanan D_{06} mesafeleri verilmiştir.

Tablo 11. Ölçüm senaryoları için menzil ve D_{06} mesafeleri

Ölçüm senaryosu	Maksimum mesafe [km]	D_{06} [km]
M1	2.4322	12.561
M2	3.5638	12.561
M3	5.2245	12.561
M4	7.1066	18.496

Etkin Fresnel yansıma katsayısının belirlenmesi için kullanılan pürüzlülük katsayısı ρ_s , Beaufort ölçeğine göre deniz durumuna karşılık gelen σ_h [m] (RMS surface height) değerine göre hesaplanmıştır (Barton, 2013). Gölgeleme katsayısının (S) hesabı için ihtiyaç duyulan β_0 (RMS surface slope), ölçüm günlerine ait meteorolojik veriler ve tekne kaptanının bölgesel hava ve deniz durumu yorumlarına göre belirlenmiştir (Reyes-Guerrero vd., 2011; Reyes-Guerrero & Mariscal, 2014). Beaufort skalası göz önüne alındığında; ölçüm günlerine ait meteorolojik verilerde belirtilen dalga yükseklikleri ve rüzgâr şiddetleri, 2 ve 3 deniz durumuna karşılık gelmektedir (URL-1, 2024). Ölçümlere dayalı olarak oluşturulan dalga yüksekliği – β_0 grafiği incelendiğinde, 1-4m dalga yüksekliği için β_0 'ın 0.04 ve 0.07 arasında değiştiği görülmektedir (Karasawa & Shiokawa, 1984). Çalışmamız için varsayılan β_0 değerlerinin, senaryolarda dalga yüksekliğinin en fazla 0.5m olması nedeniyle 0.04 değerinin altında olmasına dikkat edilmiş ve en düşük RMSE için en iyi β_0 kestirimi gerçekleştirilmiştir (Yang vd., 2013). Elde edilen β_0 değerleri meteorolojik verilerle uyumludur.

Tablo 12. Gölgeleme ve pürüzlülük katsayılarının belirlenmesinde kullanılan parametreler

Ölçüm senaryosu	Deniz durumu (Beaufort Ölçeği)	Dalga yüksekliği [m]	Rüzgâr [knot]	β_0	σ_h [m]
M1	3	< 0.5	7	0.025	0.24
M2	3	< 0.4	6	0.01	0.24
M3	2	< 0.3	6	0.001	0.10
M4	2	< 0.3	6	0.001	0.10

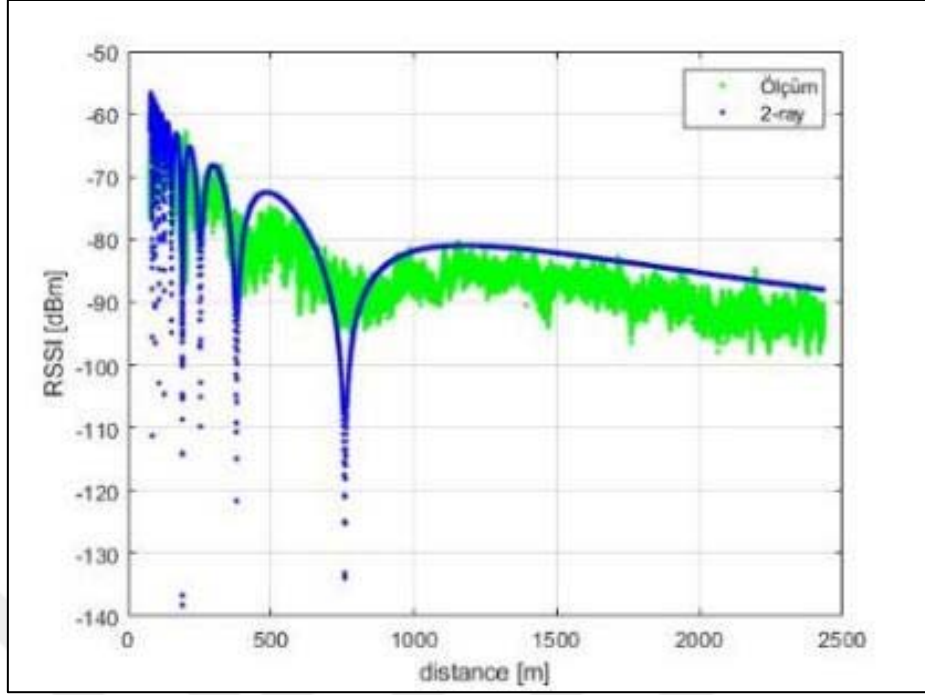
REL modelinde kullandığımız S ve ρ_s katsayılarının hesabında Tablo 12'deki değerler kullanılmıştır. F'nin; etkin yansıma, gölgeleme ve ıraksama katsayıları ile $G_{R_1} = G_{R_2}$ ve $R_1 = R_2$ kabulleri ile hesaplanması sonucu alıcıda elde edilecek RSSI değeri denklem 86'daki gibi olacaktır.

$$RSSI_{REL}[dBm] = P_t[dBm] + G_{td}[dBi] + G_{rd}[dBi] - L_{FSPL}[dB] + F[dB] \pm L_{Diff}[dB] - A[dB] \quad (86)$$

“2-ray+ Γ +G(θ)+rough” (REL+ G(θ)) etiketi ile F hesaplanırken pürüzlülük parametrelerinin yanında, alıcı-vericideki direkt dalga yönündeki ve yansıyan dalga yönündeki toplam kazançların ve direkt dalganın aldığı yol ile yansıyan dalganın aldığı yolların eşit olmadığı yaklaşımı da katılmıştır. Pürüzlülük parametreleri için Tablo 12'deki değerler kullanılmıştır. Bu yaklaşım için de ıraksaklık katsayısı ve kırınım kaybı hesapları yapılmıştır. Hesaplanan F sonucu alıcıda elde edilecek RSSI değeri denklem 87 ile hesaplanabilir.

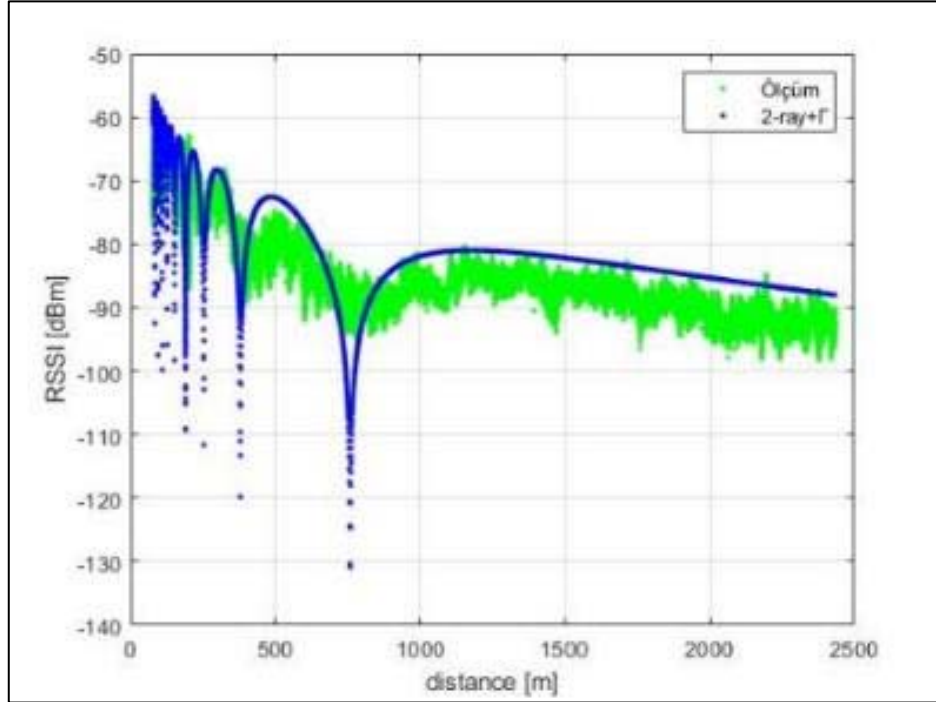
$$RSSI_{REL+G(\theta)}[dBm] = P_t[dBm] + G_{td}[dBi] + G_{rd}[dBi] - L_{FSPL}[dB] + F[dB] \pm L_{Diff}[dB] - A[dB] \quad (87)$$

Beş farklı 2-ışınlı model yaklaşımıyla ve dört ayrı senaryo için yapılan ölçümler sonunda elde edilen veriler, her birisi için grafiksel ve topluca başarımlar açısından karşılaştırılmıştır.



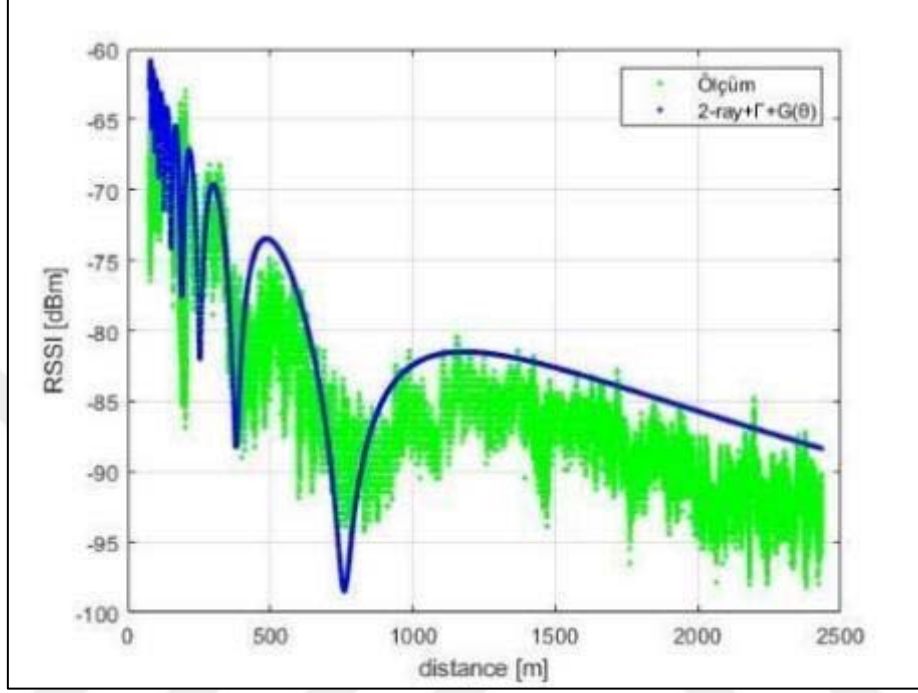
Şekil 45. M1 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{2-ray}$ verilerinin karşılaştırması

Şekil 45’de sadeleştirilmiş 2-ışınlı yol kaybı modeli mavi renkli grafikte gösterilmiştir. Hesaplamalarda yağmur zayıflatması ihmal edilmiştir.



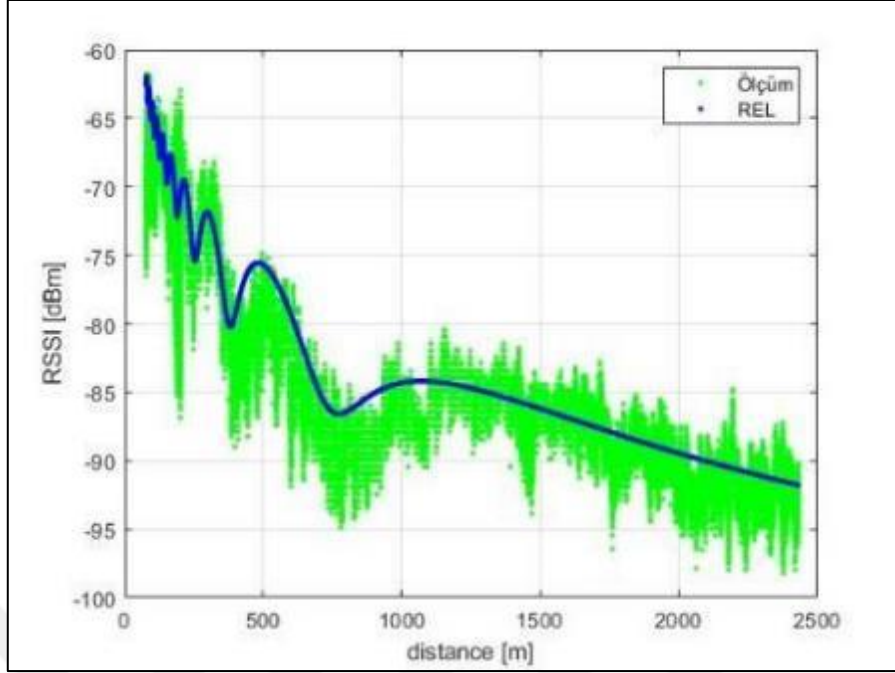
Şekil 46. M1 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{2-ray+\Gamma}$ verilerinin karşılaştırması

Şekil 46’da sadeleştirilmiş 2-ışınlı yol kaybı modelinde ihmal edilen Fresnel yansıma katsayısı hesaplara dahil edilerek mavi renkli grafik çizilmiştir. RSSI hesabında yağmur zayıflatması ihmal edilmiştir.



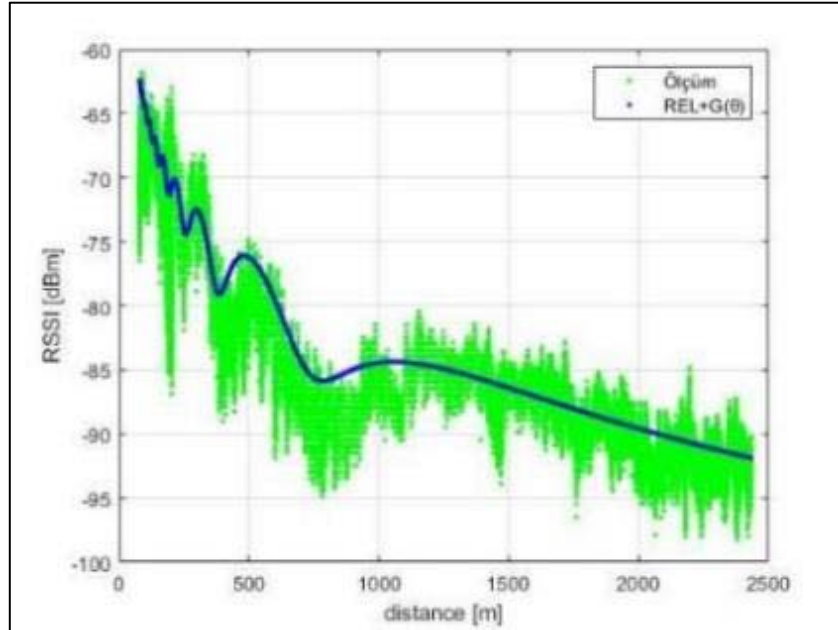
Şekil 47. M1 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{2-ray+\Gamma+G(\theta)}$ verilerinin karşılaştırması

Şekil 47’de 2-ışınlı yol kaybı modeline yansıma katsayısı ve gelme açısına bağlı elde edilen alıcı-verici anten kazançları hesaba katılarak hesaplanan alıcıdaki RSSI verisi, mavi renkli grafikte gösterilmiştir. RSSI hesabında yağmur zayıflatması ihmal edilmiştir.



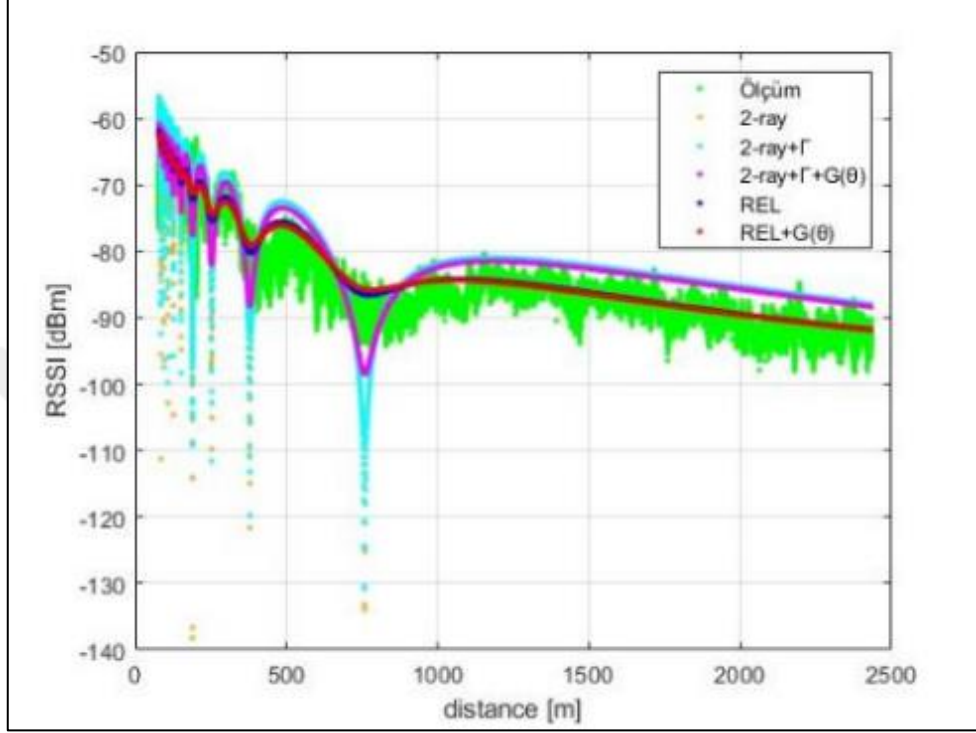
Şekil 48. M1 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{REL}$ verilerinin karşılaştırması

Şekil 48’de 2-ışınlı yol kaybı modeli hesaplamasında etkin yansımaya katsayısı, ıraksaklık ve gölgeleme katsayıları kullanılarak RSSI hesapları yapılmıştır. Gelme açısına bağlı alıcı-verici anten kazançları ve direkt dalga-yansıyan dalganın aldıkları yollar eşit olarak kabul edilmiştir. Bu yaklaşım için yağmur zayıflatması dikkate alınmıştır.



Şekil 49. M1 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{REL+G(\theta)}$ verilerinin karşılaştırması

Şekil 49’da alıcıdaki RSSI hesaplamasında pürüzlülük parametrelerinin yanında gelme açısına bağlı alıcı-verici kazançları ve direkt dalga-yansıyan dalganın aldıkları yollar eşit varsayılmamıştır. Hesaplamalara yağmur zayıflatması dahil edilmiştir.



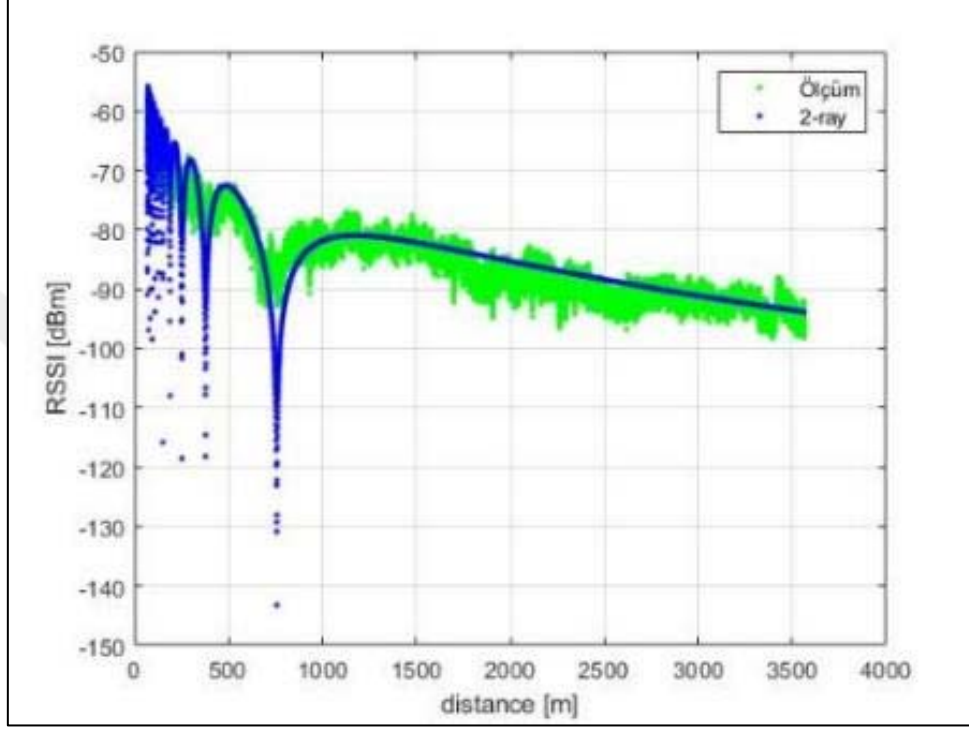
Şekil 50. M1 senaryosu ölçüm ve 2-ışınlı yol kaybı model yaklaşımları verilerinin karşılaştırması

Şekil 50’de M1 senaryo ölçümleri ve beş farklı 2-ışınlı yol kaybı model yaklaşımı verilerinin grafiksel karşılaştırması yapılmıştır. Tablo 13’de beş farklı yaklaşımla incelenen 2-ışınlı yol kaybı modeli ve elde edilen RSSI hesaplama ve M1 senaryosu ölçüm sonuçlarının başarımları verilmiştir.

Tablo 13. M1 senaryosu ve 2-ışınlı yol kaybı modeli başarımları verileri

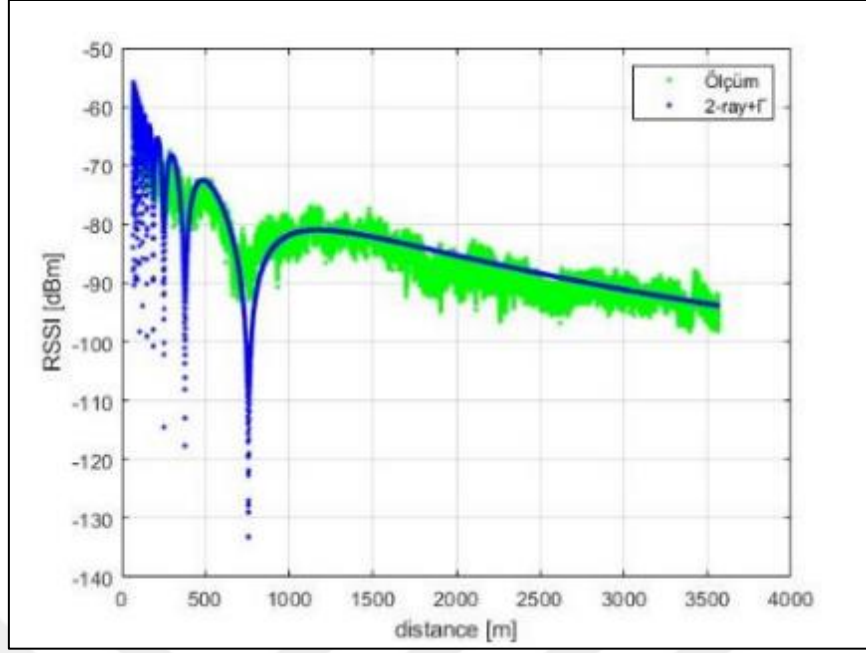
M1	2-ray	2-ray+ Γ	2-ray+ Γ +G(θ)	REL	REL + G(θ)
<i>R_squared</i>	0.6180	0.6317	0.8249	0.9177	0.9183
<i>RMSE [dB]</i>	6.4266	6.3046	4.6448	2.7782	2.7634

M2 senaryo ölçüm sonuçları ve 2-ışınlı yol kaybı modeli yaklaşımları ile alıcıda hesaplanan RSSI değerlerinin her birisi için grafiksel ve topluca başarımlar tablosu gösterimleri aşağıda verilmiştir. Senaryo hava şartları gereği hesaplamalarda yağmur zayıflaması kullanılmamıştır.



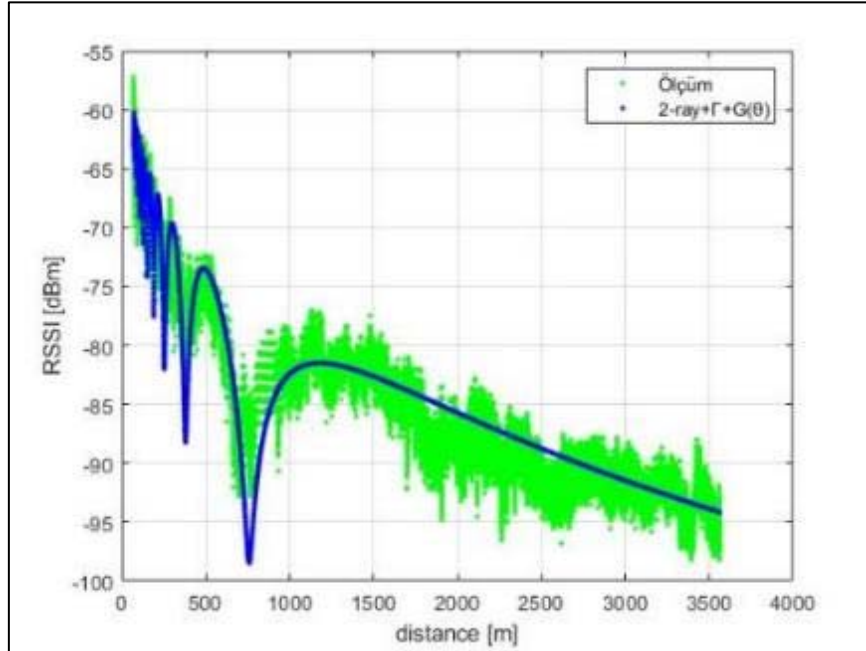
Şekil 51. M2 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{2-ray}$ verilerinin karşılaştırması

Şekil 51’de sadeleştirilmiş 2-ışınlı yol kaybı modeli mavi renkli grafikte gösterilmiştir.



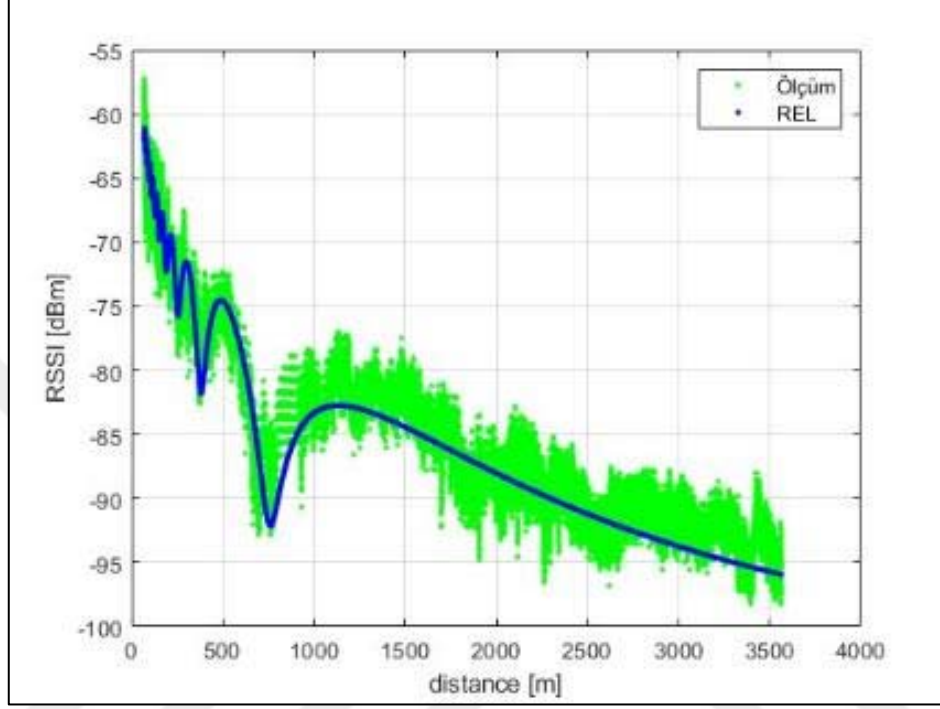
Şekil 52. M2 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{2-ray+\Gamma}$ verilerinin karşılaştırması

Şekil 52’de sadeleştirilmiş 2-ışınlı yol kaybı modelinde ihmal edilen Fresnel yansıma katsayısı hesaplara dahil edilerek mavi renkli grafik çizilmiştir.



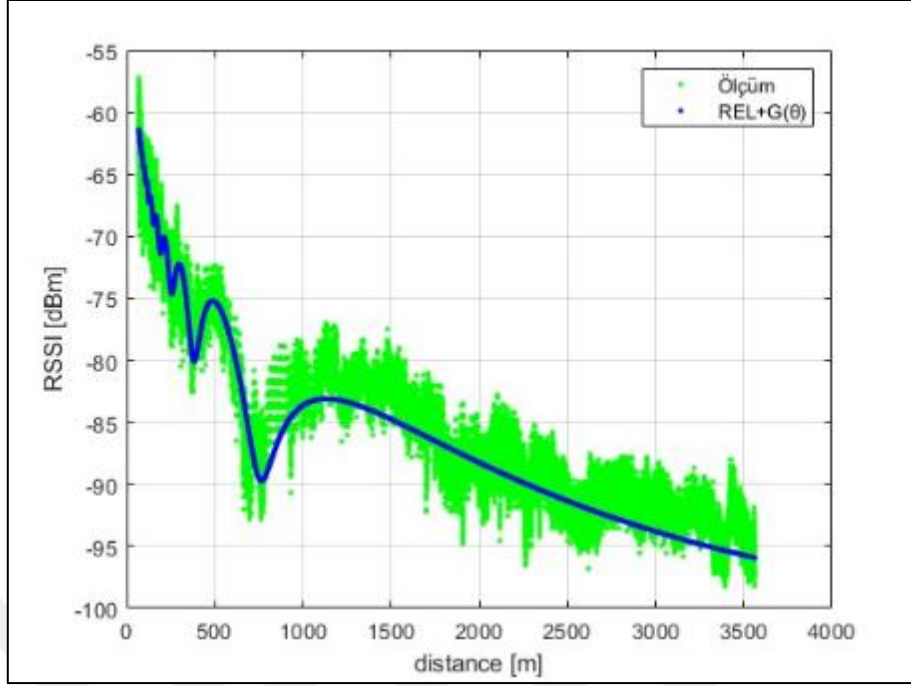
Şekil 53. M2 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{2-ray+\Gamma+G(\theta)}$ verilerinin karşılaştırması

Şekil 53’de 2-ışınlı yol kaybı modeline yansıma katsayısı ve gelme açısına bağlı elde edilen alıcı-verici anten kazançları hesaba katılarak hesaplanan alıcıdaki RSSI verisi mavi renkli grafikte gösterilmiştir.



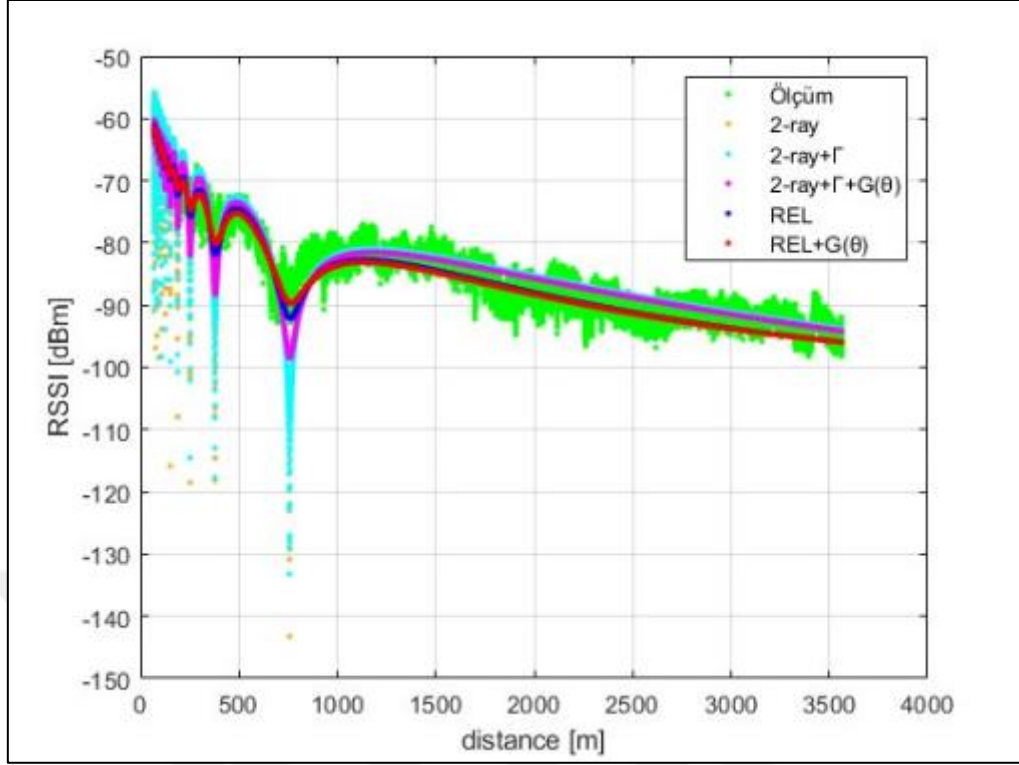
Şekil 54. M2 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{REL}$ verilerinin karşılaştırması

Şekil 54’de 2-ışınlı yol kaybı modeli hesaplamasında etkin yansıma katsayısı, ıraksaklık ve gölgeleme katsayıları kullanılarak RSSI hesapları yapılmıştır. Gelme açısına bağlı alıcı-verici anten kazançları ve direkt dalga-yansıyan dalganın aldıkları yollar eşit olarak kabul edilmiştir.



Şekil 55. M2 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{REL+G(\theta)}$ verilerinin karşılaştırması

Şekil 55’de alıcıdaki RSSI hesaplamasında pürüzlülük parametrelerinin yanında gelme açısına bağlı alıcı-verici kazançları ve direkt dalga-yansıyan dalganın aldıkları yollar eşit varsayılmamıştır.



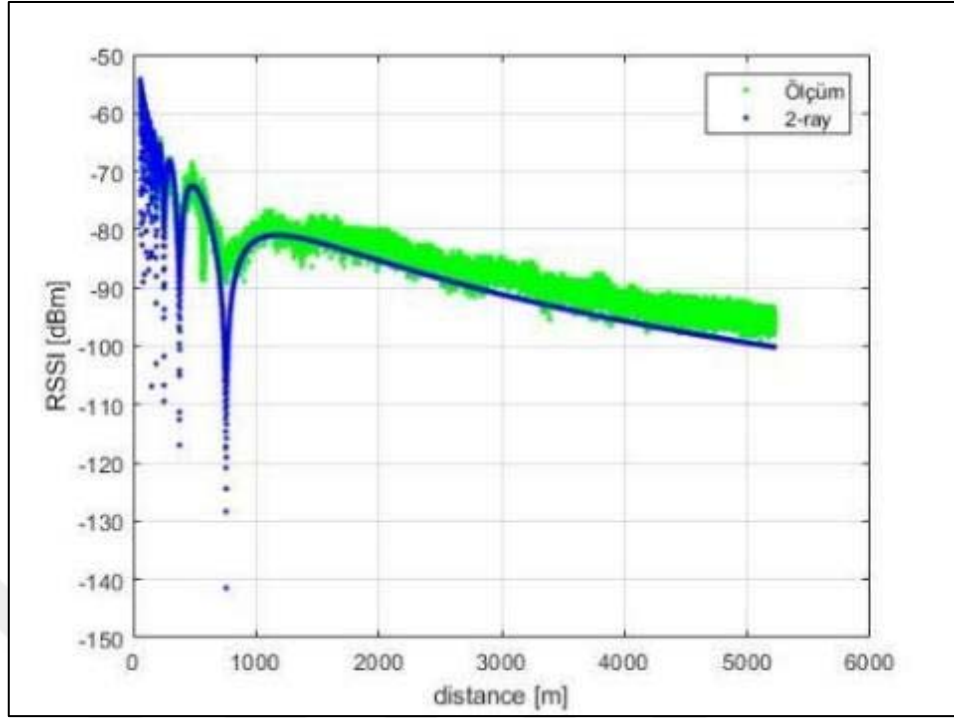
Şekil 56. M2 senaryosu ölçüm ve 2-ışınlı yol kaybı model yaklaşımları verilerinin karşılaştırması

Şekil 56’da M2 senaryo ölçümleri ve 5 farklı 2-ışınlı yol kaybı model yaklaşımı verilerinin grafiksel karşılaştırması yapılmıştır. Tablo 14’de 5 farklı yaklaşımla incelenen 2-ışınlı yol kaybı modeli ve elde edilen RSSI hesaplama ve M2 senaryosu ölçüm sonuçlarının başarımları verilmiştir.

Tablo 14. M2 senaryosu ve 2-ışınlı yol kaybı modeli başarımları verileri

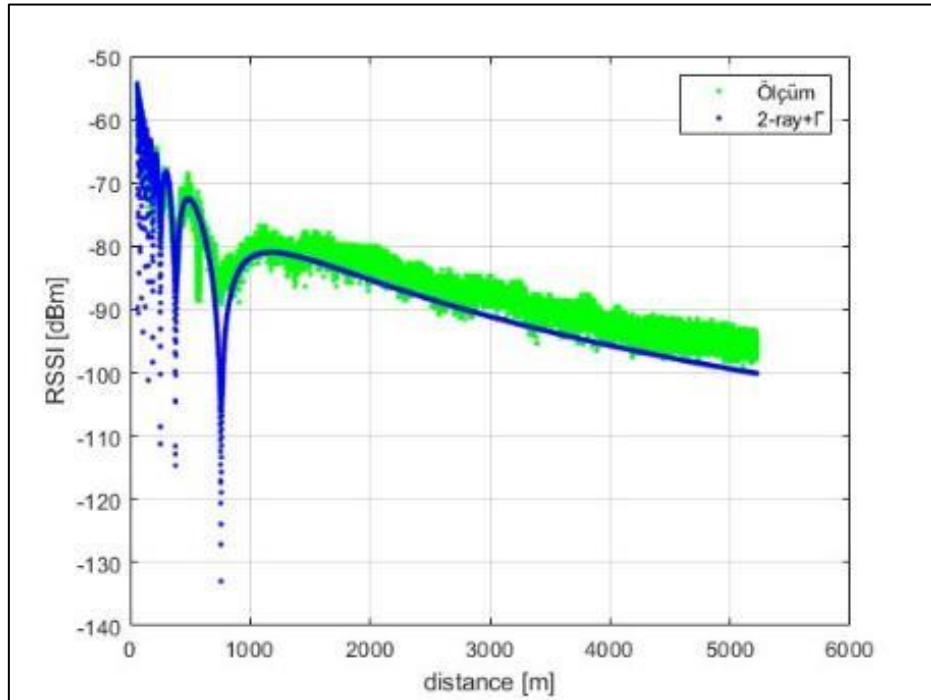
M2	2-ray	2-ray+ Γ	2-ray+ Γ +G(θ)	REL	REL + G(θ)
<i>R_squared</i>	0.7602	0.7659	0.8918	0.9474	0.9528
<i>RMSE [dB]</i>	4.2394	4.1743	2.6590	2.3416	2.3011

M3 senaryo ölçüm sonuçları ve 2-ışınlı yol kaybı modeli yaklaşımları ile alıcıda hesaplanan RSSI değerlerinin her birisi için grafiksel ve topluca başarımları tablosu gösterimleri aşağıda verilmiştir. Senaryo hava şartları gereği hesaplamalarda yağmur zayıflaması kullanılmamıştır.



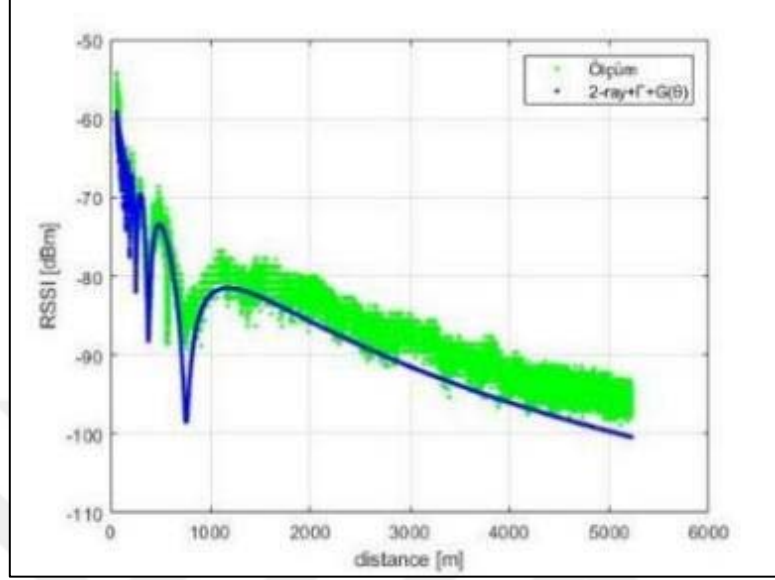
Şekil 57. M3 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{2-ray}$ verilerinin karşılaştırması

Şekil 57’de sadeleştirilmiş 2-ışınlı yol kaybı modeli mavi renkli grafikte gösterilmiştir.



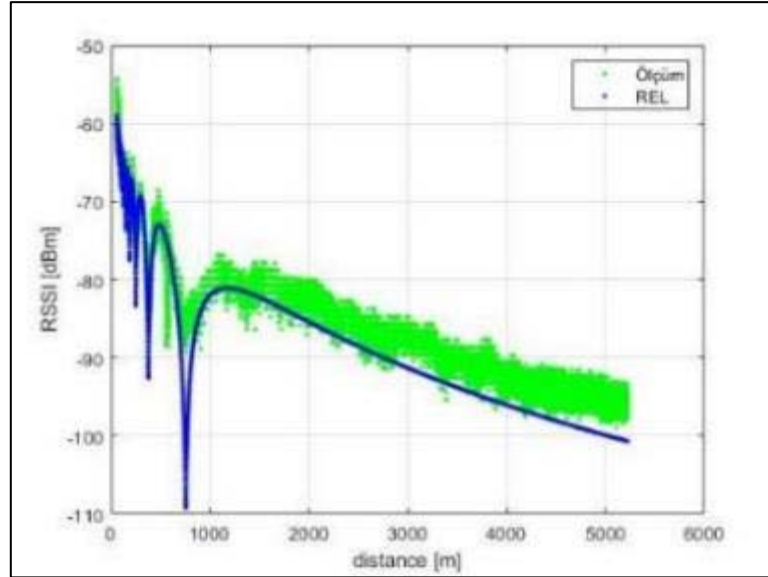
Şekil 58. M3 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{2-ray+\Gamma}$ verilerinin karşılaştırması

Şekil 58’de sadeleştirilmiş 2-ışınlı yol kaybı modelinde ihmal edilen Fresnel yansıma katsayısı hesaplara dahil edilerek mavi renkli grafik çizilmiştir.



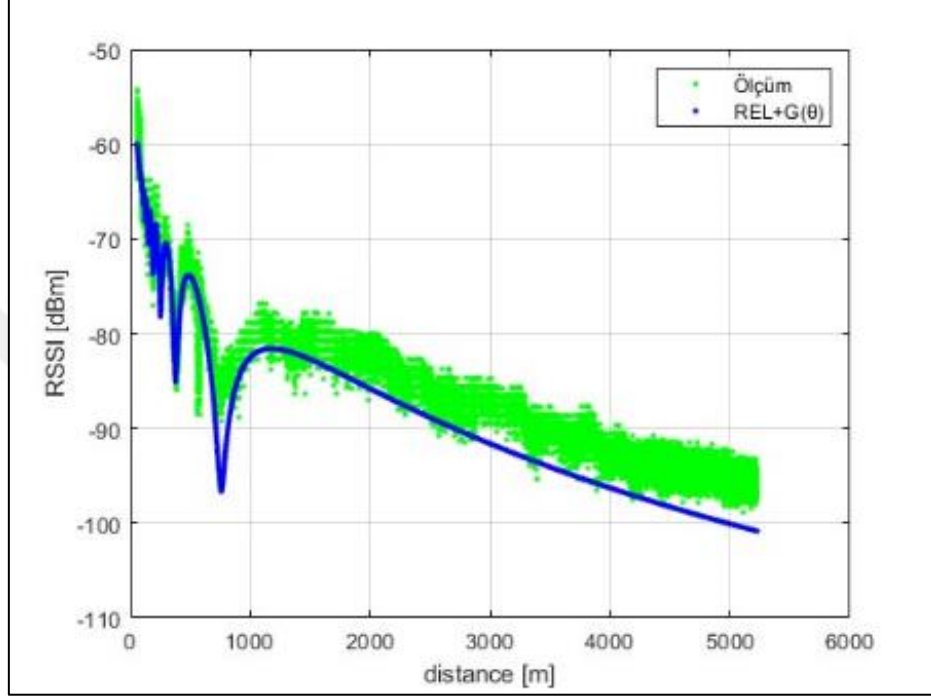
Şekil 59. M3 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{2-ray+\Gamma+G(\theta)}$ verilerinin karşılaştırması

Şekil 59’da 2-ışınlı yol kaybı modeline yansıma katsayısı ve gelme açısına bağlı elde edilen alıcı-verici anten kazançları hesaba katılarak hesaplanan alıcıdaki RSSI verisi, mavi renkli grafikte gösterilmiştir.



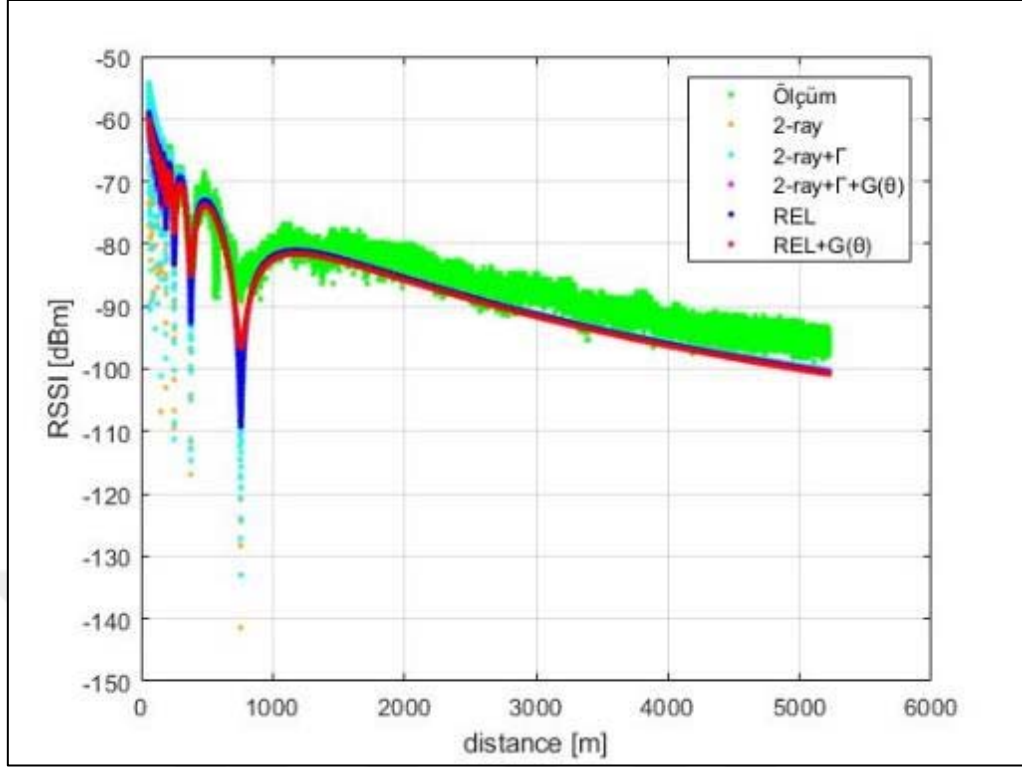
Şekil 60. M3 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{REL}$ verilerinin karşılaştırması

Şekil 60'da 2-ışınlı yol kaybı modeli hesaplamasında etkin yansıma katsayısı, ıraksaklık ve gölgeleme katsayıları kullanılarak RSSI hesapları yapılmıştır. Gelme açısına bağlı alıcı-verici anten kazançları ve direkt dalga-yansıyan dalganın aldıkları yollar eşit olarak kabul edilmiştir.



Şekil 61. M3 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{REL+G(\theta)}$ verilerinin karşılaştırması

Şekil 61'de alıcıdaki RSSI hesaplamasında pürüzlülük parametrelerinin yanında gelme açısına bağlı alıcı-verici kazançları ve direkt dalga-yansıyan dalganın aldıkları yollar eşit varsayılmamıştır.



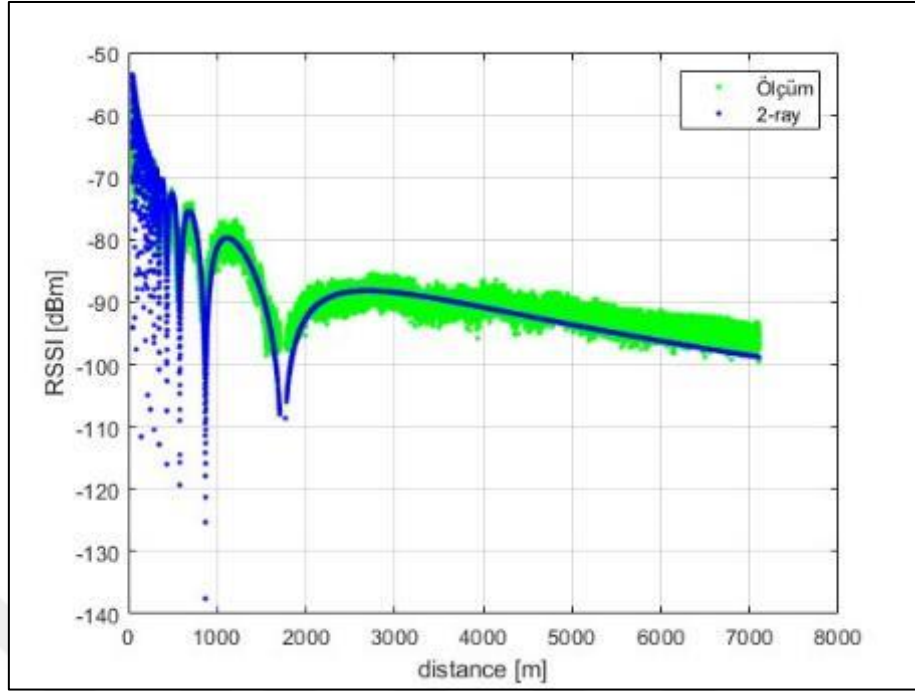
Şekil 62. M3 senaryosu ölçüm ve 2-ışınlı yol kaybı model yaklaşımları verilerinin karşılaştırması

Şekil 62’de M3 senaryo ölçümleri ve 5 farklı 2-ışınlı yol kaybı model yaklaşımı verilerinin grafiksel karşılaştırması yapılmıştır. Tablo 15’de 5 farklı yaklaşımla incelenen 2-ışınlı yol kaybı modeli ve elde edilen RSSI hesaplama ve M3 senaryosu ölçüm sonuçlarının başarımları verilmiştir.

Tablo 15. M3 senaryosu ve 2-ışınlı yol kaybı modeli başarımları verileri

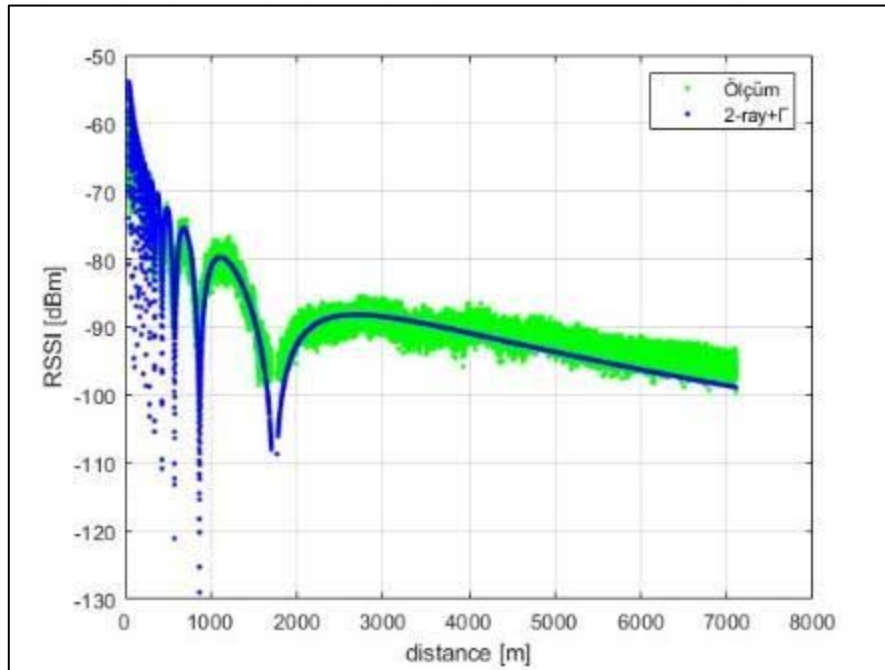
M3	2-ray	2-ray+ Γ	2-ray+ Γ +G(θ)	REL	REL + G(θ)
<i>R_squared</i>	0.8982	0.8985	0.9653	0.9468	0.9715
<i>RMSE [dB]</i>	4.3170	4.3111	3.8114	3.9720	3.9108

M4 senaryo ölçüm sonuçları ve 2-ışınlı yol kaybı modeli yaklaşımları ile alıcıda hesaplanan RSSI değerlerinin her birisi için grafiksel ve topluca başarımları tablosu gösterimleri aşağıda verilmiştir. Senaryo hava şartları gereği hesaplamalarda yağmur zayıflaması kullanılmamıştır.



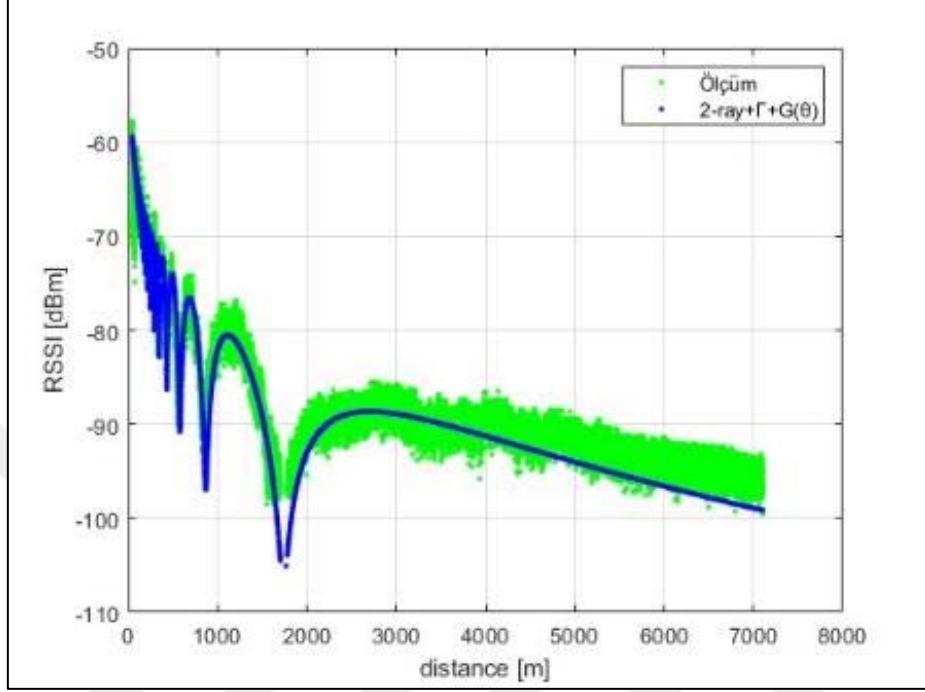
Şekil 63. M4 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{2-ray}$ verilerinin karşılaştırması

Şekil 63’de sadeleştirilmiş 2-ışınlı yol kaybı modeli mavi renkli grafikte gösterilmiştir.



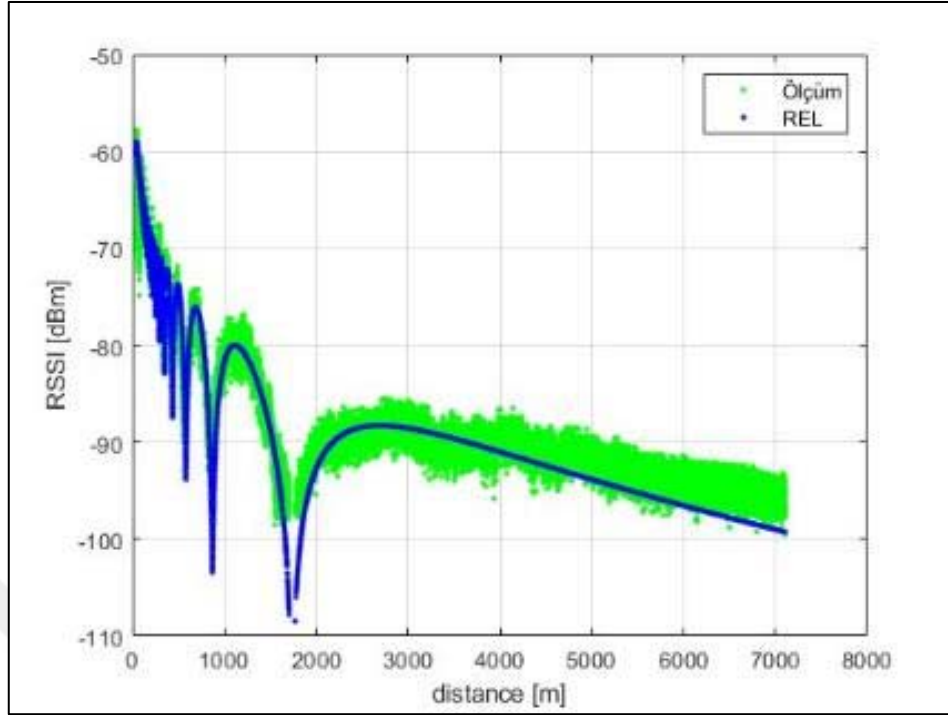
Şekil 64. M4 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{2-ray+\Gamma}$ verilerinin karşılaştırması

Şekil 64’de sadeleştirilmiş 2-ışınlı yol kaybı modelinde ihmal edilen Fresnel yansıma katsayısı hesaplara dahil edilerek mavi renkli grafik çizilmiştir.



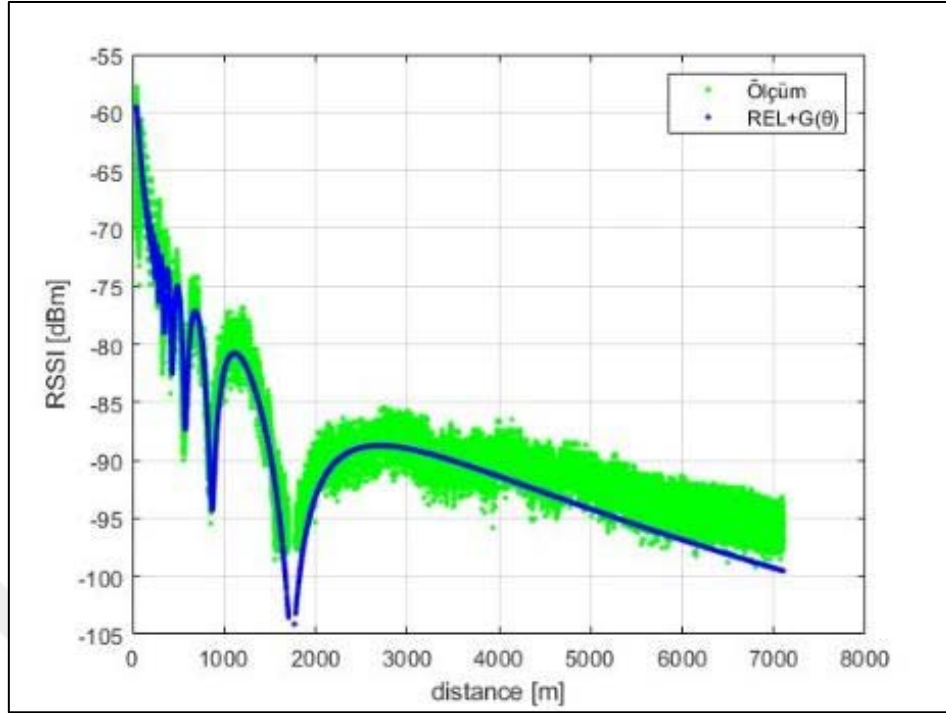
Şekil 65. M4 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{2-ray+\Gamma+G(\theta)}$ verilerinin karşılaştırması

Şekil 65’de 2-ışınlı yol kaybı modeline yansıma katsayısı ve gelme açısına bağlı elde edilen alıcı-verici anten kazançları hesaba katılarak hesaplanan alıcıdaki RSSI verisi, mavi renkli grafikte gösterilmiştir.



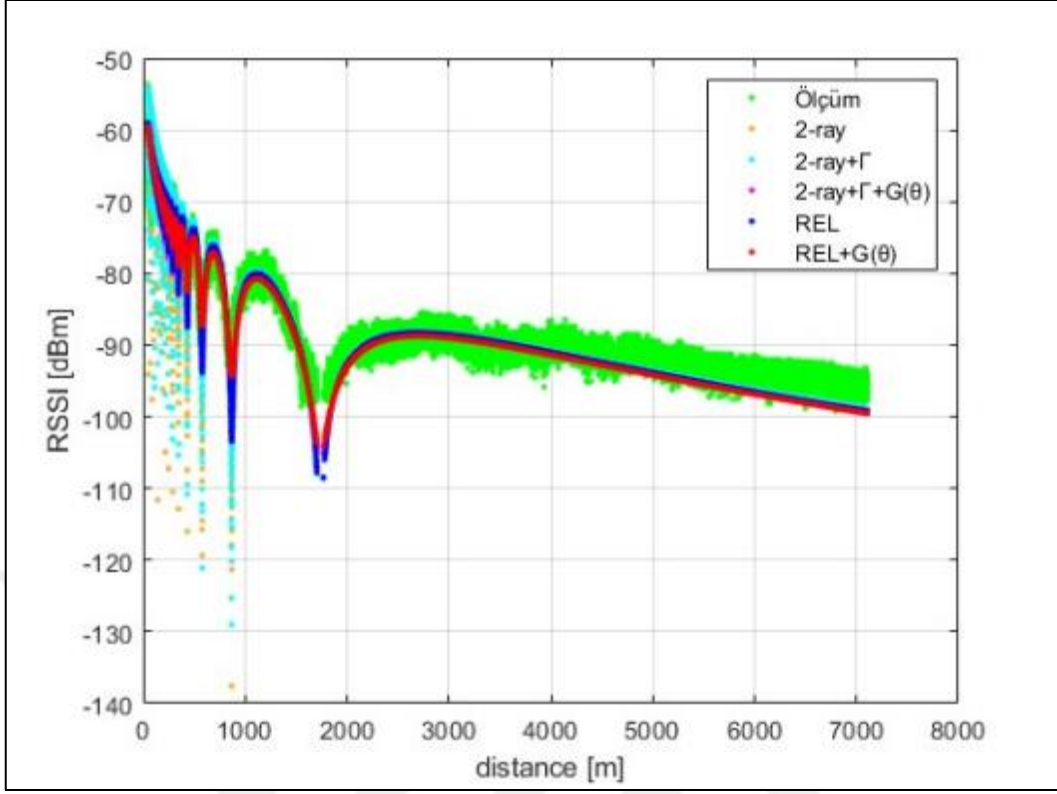
Şekil 66. M4 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{REL}$ verilerinin karşılaştırması

Şekil 66’da 2-ışınlı yol kaybı modeli hesaplamasında etkin yansımaya katsayısı, ıraksaklık ve gölgeleme katsayıları kullanılarak RSSI hesapları yapılmıştır. Gelme açısına bağlı alıcı-verici anten kazançları ve direkt dalga-yansıyan dalganın aldıkları yollar eşit olarak kabul edilmiştir.



Şekil 67. M4 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{REL+G(\theta)}$ verilerinin karşılaştırması

Şekil 67’de alıcıdaki RSSI hesaplamasında pürüzlülük parametrelerinin yanında gelme açısına bağlı alıcı-verici kazançları ve direkt dalga-yansıyan dalganın aldıkları yollar eşit varsayılmamıştır.



Şekil 68. M4 senaryosu ölçüm ve 2-ışınlı yol kaybı model yaklaşımları verilerinin karşılaştırması

Şekil 68’de M4 senaryo ölçümleri ve 5 farklı 2-ışınlı yol kaybı model yaklaşımı verilerinin grafiksel karşılaştırması yapılmıştır. Tablo 16’da 5 farklı yaklaşımla incelenen 2-ışınlı yol kaybı modeli ve elde edilen RSSI hesaplama ve M4 senaryosu ölçüm sonuçlarının başarımları verilmiştir.

Tablo 16. M4 senaryosu ve 2-ışınlı yol kaybı modeli başarımları verileri

M4	2-ray	2-ray+ Γ	2-ray+ Γ +G(θ)	REL	REL + G(θ)
<i>R_squared</i>	0.8982	0.8985	0.9653	0.9468	0.9715
<i>RMSE [dB]</i>	4.3170	4.3111	3.8114	3.9720	3.9108

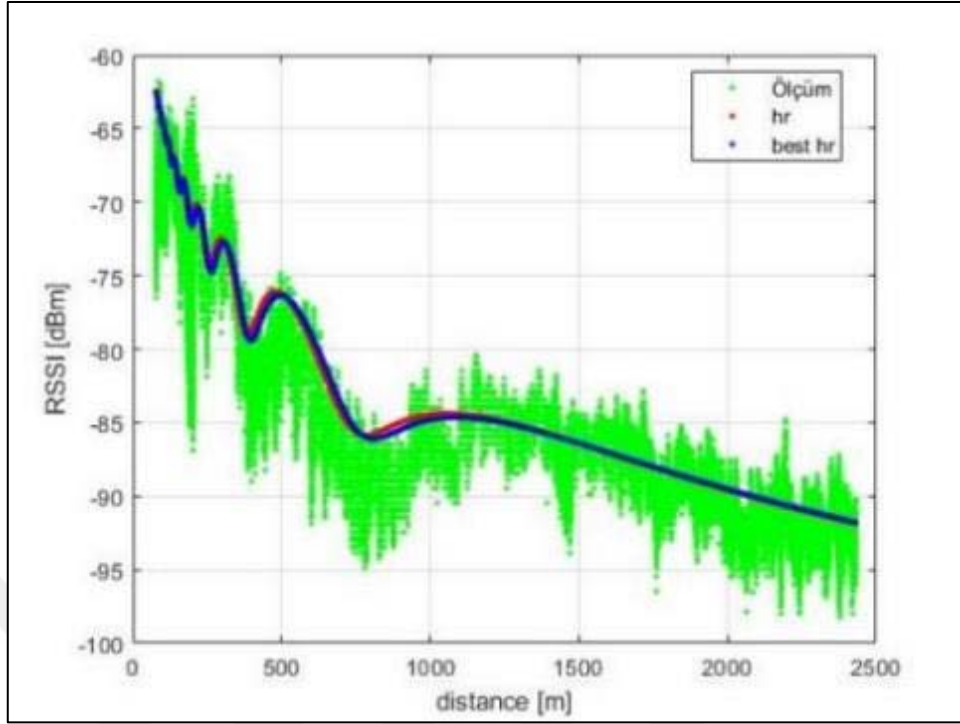
3.3. Değiştirilmiş 2-ışınlı Yol Kaybı Modeli (Modified REL) ve Ölçüm Verilerinin Karşılaştırılması

Su ortamının iletken özelliği ve nispeten düz yüzeyi nedeniyle bu yüzeyden, ciddi anlamda derin zayıflamalara (deep fading) neden olacak radyo dalgalarının yansıması daha güçlü olacaktır. Dalga ve gel-git gibi doğal su hareketleri de iletilen radyo dalgası ile birleşip ek zayıflama etkisi oluşturarak sinyalde daha fazla bozulmalara sebep olur. Gel-git ve dalganın, kıyıya yakın bölgelerde ve denizde bulunan alıcı ya da verici anten yüksekliğinin ortalama su seviyesine göre değişken olduğu durumlarda haberleşme kalitesine olumsuz etkisi dikkate değerdir (Gaitán vd., 2021). Açık deniz ortamında radyo kanalında hızlı değişimler gözlemlenmemektedir. Bu ortamdaki en önemli etkiler; deniz dalgası yüksekliğindeki değişim ve 2-ışınlı yol kaybı modeli için bu çalışmada yapılan tüm yaklaşımlarda sabit kabul edilen nominal alıcı anten yüksekliği “ h_r ”dır. Propagasyon ortamı düşünüldüğünde deniz dalgasından kaynaklı gemi hareketlerinde meydana gelecek değişimlere bağlı olarak haberleşme süresince “ h_r ” değişken olacaktır (Yang vd., 2011). Anten yüksekliklerindeki değişim, alıcıda elde edilecek RSSI işaretinin tepe ve çukurlarında yatay ekseninde kaymaya neden olur (Ang & Wen, 2008). Bu amaçla; liman içinde durgun suda deniz yüzeyine göre tespit edilen nominal alıcı anten yüksekliğinde ($h_r=3.5\text{m}$) bir geliştirme yapılarak alıcıdaki RSSI değerinin değişimi incelenmiştir. Verici anten düzeneği karada ve sabit olduğundan yalnızca alıcı anten yüksekliği için bir değerlendirme yapılmıştır.

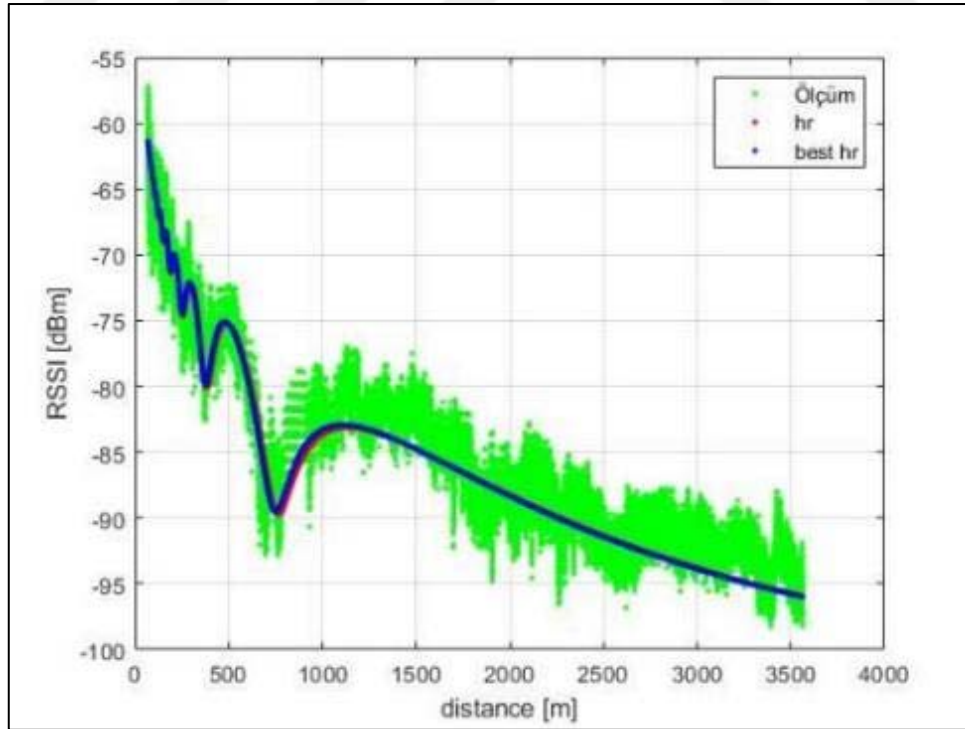
Anten değişiminin alıcıdaki RSSI üzerindeki etkisini ortaya koymak ve başarımı arttırmak amacıyla 2-ışınlı basitleştirilmiş yol kaybı modeli (2-ray) için en düşük RMSE’ye karşılık gelen alıcı anten yüksekliği değeri hesaplanmıştır. Her bir ölçüm senaryosu için elde edilen en iyi h_r (best_ h_r) değeri kullanılarak “REL+G(θ)” olarak etiketlenen 2-ışınlı yol kaybı modeli yaklaşımı yeniden değerlendirilmiştir. Şekil 69’da M1 senaryosu ölçüm ve alıcı anten yüksekliği için “best_ h_r ” ve “ h_r ” kullanılarak elde edilen $RSSI_{REL+G(\theta)}$ verileri grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. Hesaplamalar için denklem 88 kullanılmıştır.

$$RSSI_{REL+G(\theta)}[dBm] = P_t[dBm] + G_{td}[dBi] + G_{rd}[dBi] - L_{FSL}[dB] + F[dB] \pm L_{Diff}[dB] - A[dB] \quad (88)$$

Yol kazanç faktörü hesaplanırken pürüzlülük parametreleri ve gelme açısına bağlı kazançlar işleme dahil edilmiştir. Meteorolojik verilere dayanarak yağmur zayıflatması yalnızca M1 senaryosu için dikkate alınmıştır.

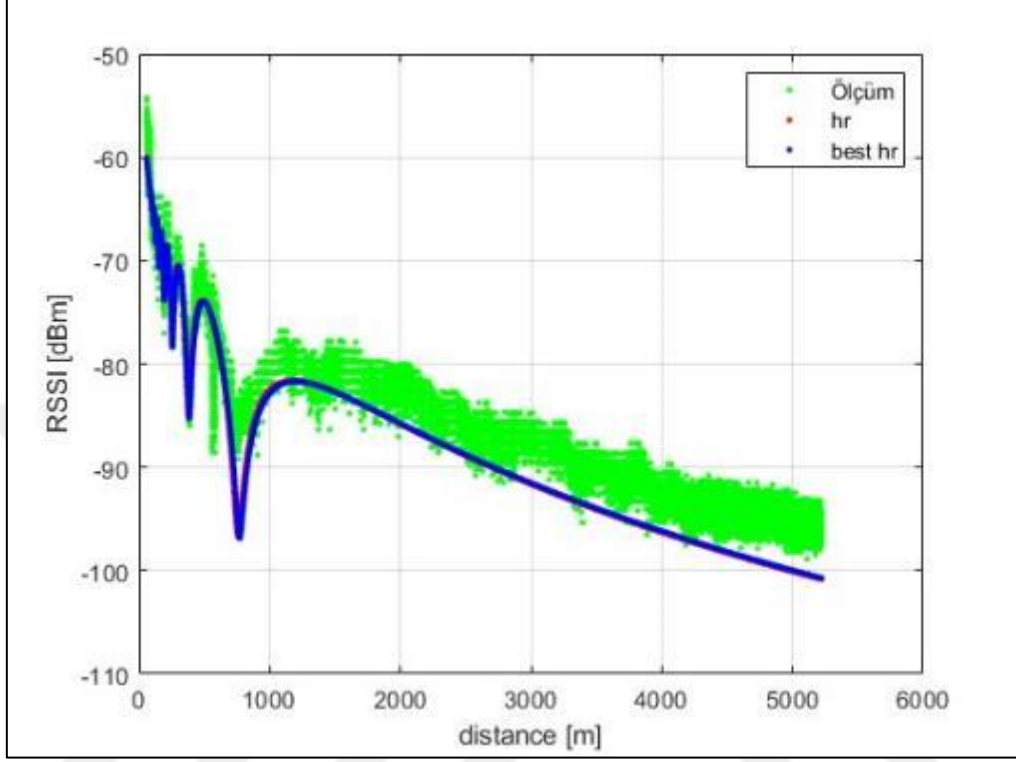


Şekil 69. M1 senaryosu ölçüm, h_r ve $best_h_r$ için $RSSI_{REL+G(\theta)}$ karşılaştırması



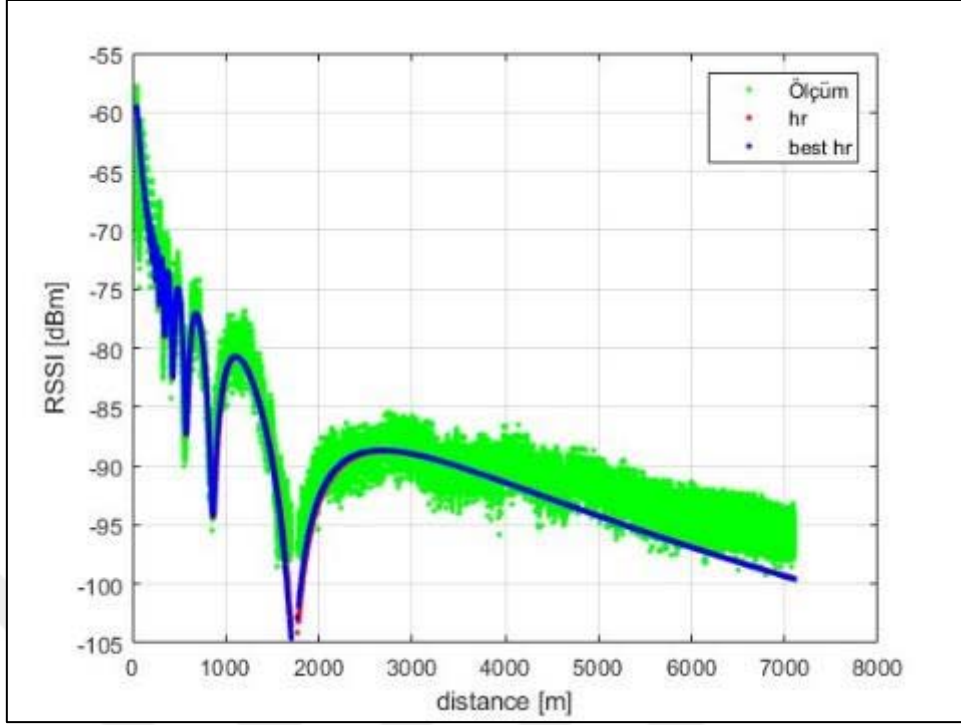
Şekil 70. M2 senaryosu ölçüm, h_r ve $best_h_r$ için $RSSI_{REL+G(\theta)}$ karşılaştırması

Şekil 70’de M2 senaryosu ölçüm ve alıcı anten yüksekliği için “best_ h_r ” ve “ h_r ” kullanılarak elde edilen $RSSI_{REL+G(\theta)}$ verileri grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.



Şekil 71. M3 senaryosu ölçüm, h_r ve best_ h_r için $RSSI_{REL+G(\theta)}$ karşılaştırması

Şekil 71’de M3 senaryosu ölçüm ve alıcı anten yüksekliği için “best_ h_r ” ve “ h_r ” kullanılarak elde edilen $RSSI_{REL+G(\theta)}$ verileri grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.



Şekil 72. M4 senaryosu ölçüm, h_r ve $best_h_r$ için $RSSI_{REL+G(\theta)}$ karşılaştırması

Şekil 72’de M4 senaryosu ölçüm ve alıcı anten yüksekliği için “ $best_h_r$ ” ve “ h_r ” kullanılarak elde edilen $RSSI_{REL+G(\theta)}$ verileri grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. Tablo 17’de tüm senaryolar için alıcı anten yüksekliği h_r ve $best_h_r$ alınarak elde edilen iki adet $RSSI_{REL+G(\theta)}$ verisi dikkate alınarak başarımlar hesaplanmıştır. $best_h_r$ büyüklükleri ile hesaplanan $RSSI_{REL+G(\theta)}$ değerleri $RSSI_{Modified REL}$ olarak adlandırılmıştır.

Tablo 17. h_r ve $best_h_r$ için hesaplanan $RSSI_{REL+G(\theta)}$ başarımlar sonuçları

Ölçüm Senaryosu	$RSSI_{Modified REL}$			$RSSI_{REL+G(\theta)}$		
	$best_h_r$ [m]	RMSE [dB]	R_squared	h_r [m]	RMSE [dB]	R_squared
M1	3.61	2.7161	0.9213	3.5	2.7634	0.9183
M2	3.43	2.2585	0.9567	3.5	2.3011	0.9528
M3	3.55	3.8723	0.9699	3.5	3.9108	0.9715
M4	3.47	2.5387	0.9562	3.5	2.5528	0.9525

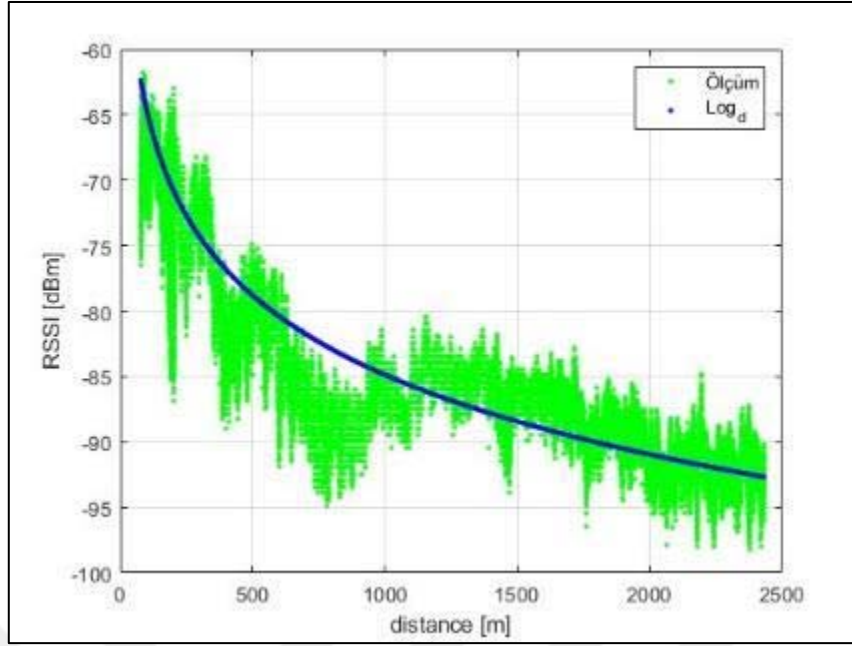
Tablo 17 incelendiğinde M1 ve M2 deki alıcı anten yüksekliğindeki değişimin M3 ve M4’dekinden fazla olduğu, buna bağlı olarak M1 ve M2’deki başarımların iyileşmesinin M3 ve M4’e göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum; M1 ve M2 senaryosu için M3 ve M4’e göre kabul edilen daha büyük deniz durumu derecesi ve β_0 değeri ile örtüşmektedir. Hesaplanan $best_h_r$ değeri ortalama bir değişimi göstermektedir.

3.4. Log-distance Yol Kaybı Modeli ve Ölçüm Verilerinin Karşılaştırılması

Log-distance yol kaybı modeli ve her bir senaryo ölçüm sonucu ile bu model sonucu alıcıda elde edilecek RSSI değerleri tek tek grafiklerle ve topluca başarımlar olarak karşılaştırılmıştır. Log-distance modeli iç ve dış ortam yol kaybı hesaplamalarında kullanılmaktadır. İç ortam çalışmalarında $d_0 = 1m$ yaklaşımı sıklıkla yapılmaktadır (Feuerstein vd., 1994; Wang vd., 2012; Oyie & Afullo, 2018). Yine dış ortam için d_0 , 4m ve 10m gibi değerlerle tespit kriteri belirtilmeden hesaplamalara katılmıştır (Gao vd., 2020; Reyes-Guerrero & Mariscal, 2014). Bu çalışmada Log-distance yol kaybı modeli için gerekli parametrelerden d_0 , senaryo ölçüm sonuçlarındaki mesafe verisi için en küçük değer (alıcı-verici arası en yakın mesafe); n parametresi için de en küçük RMSE için kestirim ile hesaplanmıştır (Fernández, 2012). Ölçümler esnasında denizin derinliği ve kıyı yapısı izin verdiği derecede vericiye en yakın konuma ulaşılmaya çalışılmıştır. Log-distance modeli sonucu alıcıda hesaplanan $RSSI_{Log_d}[dBm]$ denklem 89 ile bulunmuştur. $PL[dB]$, Log-distance modeli ile hesaplanan yol kaybını ifade etmektedir.

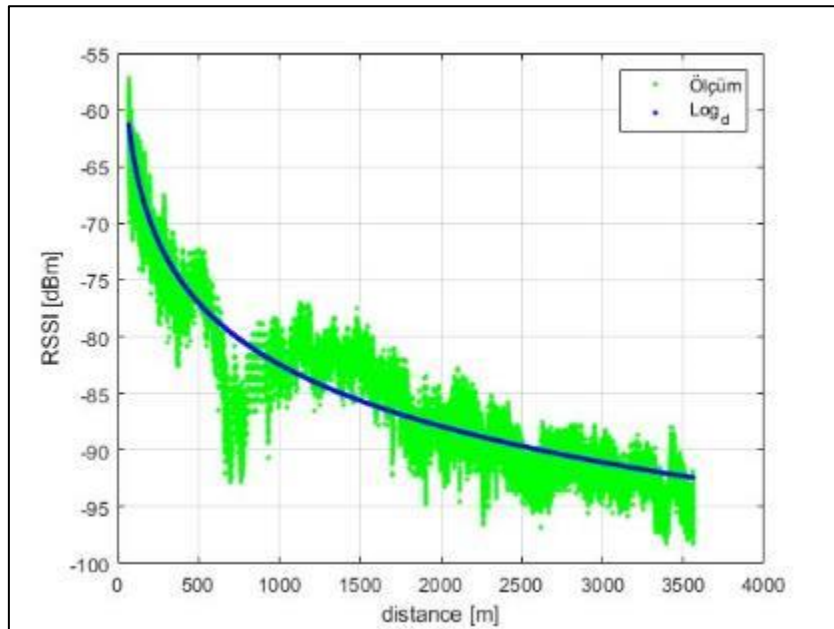
$$RSSI_{Log_d}[dBm] = P_t[dBm] + G_{td}[dBi] + G_{rd}[dBi] - PL[dB] \quad (89)$$

Şekil 75’de M1 senaryosu için ölçüm verileri ve Log-distance yol kaybı modeli ile alıcıda hesaplanan RSSI değerleri grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.



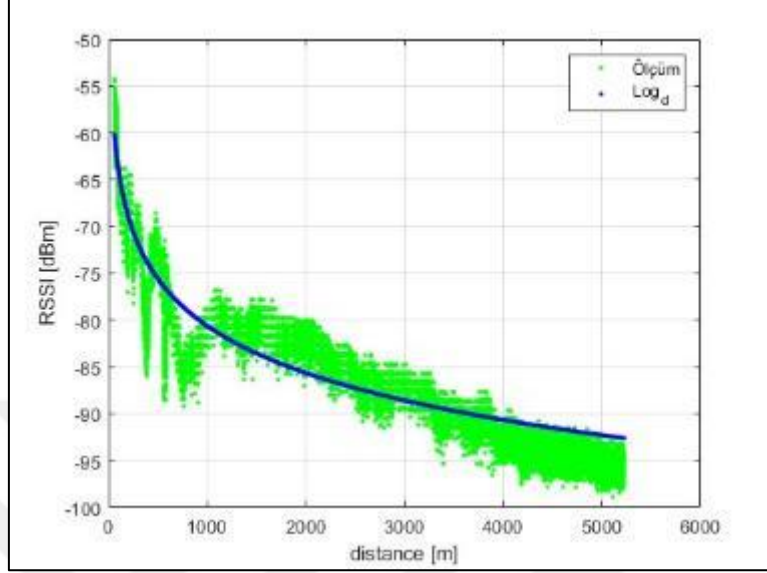
Şekil 73. M1 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{Log_d}$ karşılaştırması

Şekil 74’de M2 senaryosu için ölçüm verileri ve Log-distance yol kaybı modeli ile alıcıda hesaplanan RSSI değerleri grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.



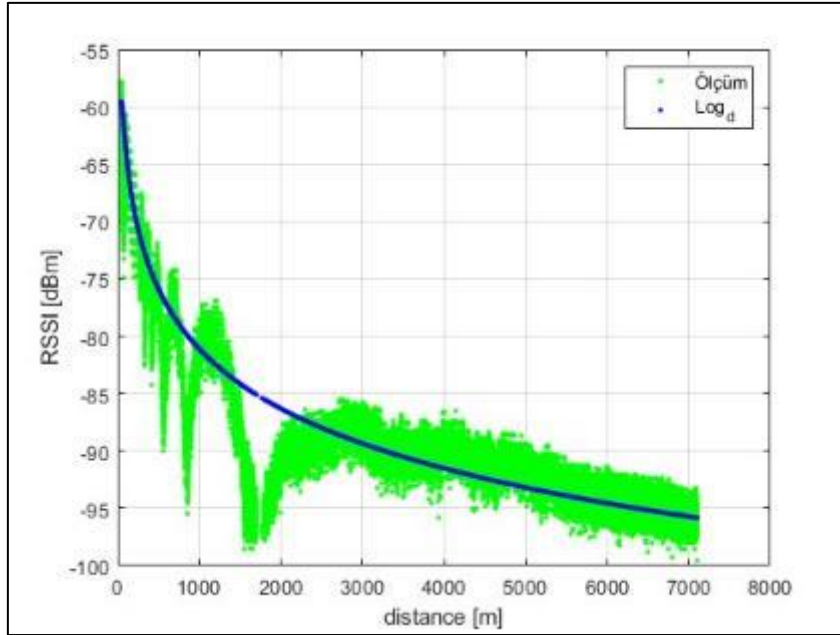
Şekil 74. M2 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{Log_d}$ karşılaştırması

Şekil 75’de M3 senaryosu için ölçüm verileri ve Log-distance yol kaybı modeli ile alıcıda hesaplanan RSSI değerleri grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.



Şekil 75. M3 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{Log_d}$ karşılaştırması

Şekil 76’da M4 senaryosu için ölçüm verileri ve Log-distance yol kaybı modeli ile alıcıda hesaplanan RSSI değerleri grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.



Şekil 76. M4 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{Log_d}$ karşılaştırması

4 farklı senaryo için alıcıda Log-distance yol kaybı modeli uygulanması sonucu elde edilen RSSI verileri RMSE ve R_squared değerleri ile incelenerek, modelin başarımı Tablo 18’de ortaya koyulmuştur.

Tablo 18. d_0 ve n değerlerine karşılık hesaplanan $RSSI_{Log_d}$ başarımları

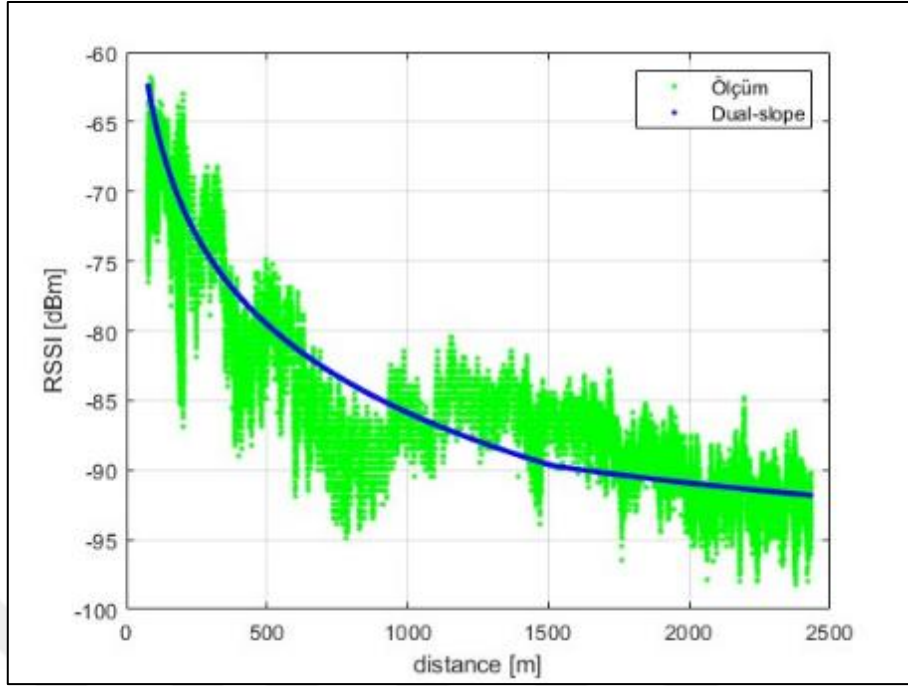
Ölçüm Senaryosu	n	d_0 [m]	RMSE [dB]	R_squared
M1	2.02	77.03	3.0978	0.8884
M2	1.81	68.24	2.4488	0.9058
M3	1.67	59.98	2.6067	0.8866
M4	1.73	47.59	3.0145	0.8194

3.5. Dual-Slope Yol Kaybı Modeli ve Ölçüm Verilerinin Karşılaştırılması

Dual-slope yol kaybı modeli ile alıcıda hesaplanan RSSI değerleri ve her bir senaryo için elde edilen ölçüm verileri tek tek grafiklerle ve topluca başarımlar olarak karşılaştırılmıştır. Dual-slope yol kaybı modelinin parametrelerinden n_1 ve n_2 en düşük RMSE değeri için kestirim yapılarak, d_0 değeri de log-distance yol kaybı modelinde olduğu gibi alıcı ve vericinin en yakın oldukları konuma karşılık gelen mesafeye göre tespit edilmiştir. d_{break} noktası, Fresnel bölgesi teorisi ile hesaplanmıştır. Bu noktanın seçimi için kestirim, gözle tespit ve farklı hesaplamalar da kullanılmaktadır (El-Sallabi vd., 2018). Dual-Slope modeli sonucu alıcıda hesaplanan $RSSI_{dual}[dBm]$ denklem 90 ile bulunmuştur. $PL_{dual} [dB]$, Dual-Slope modeli ile hesaplanan yol kaybını ifade etmektedir.

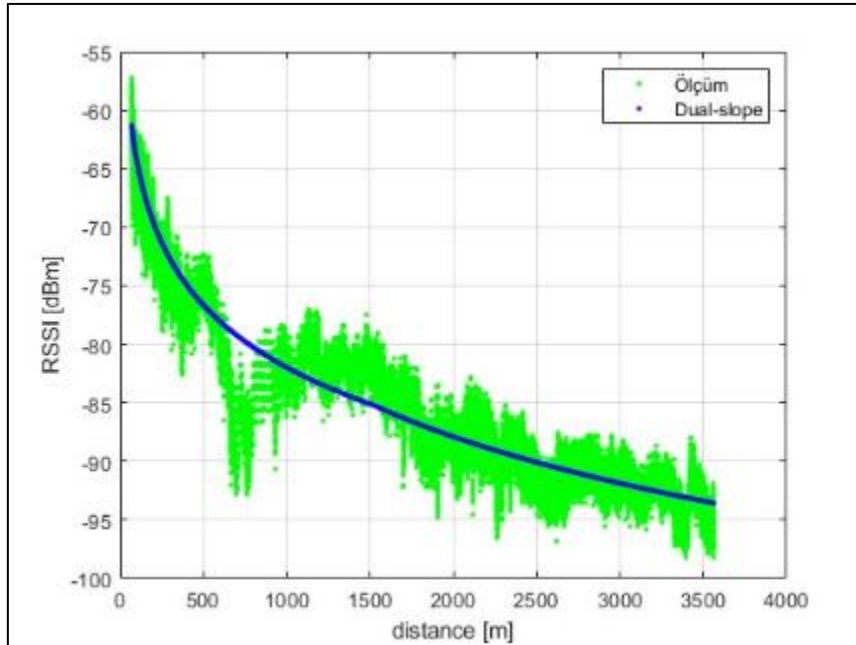
$$RSSI_{dual}[dBm] = P_t[dBm] + G_{td}[dBi] + G_{rd}[dBi] - PL_{dual}[dB] \quad (90)$$

Şekil 77’de M1 senaryosu için ölçüm verileri ve Dual-slope yol kaybı modeli ile alıcıda hesaplanan RSSI değerleri grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.



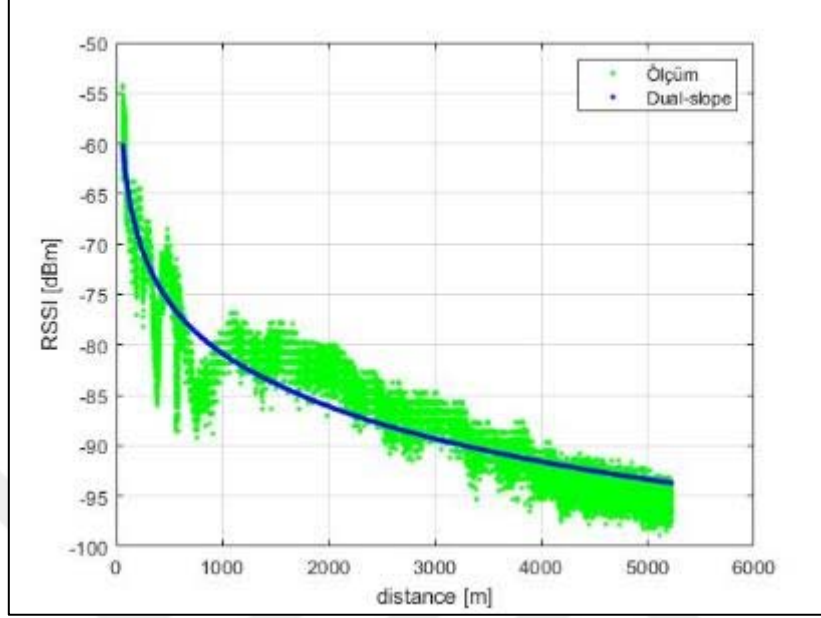
Şekil 77. M1 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{dual}$ karşılaştırması

Şekil 78’de M2 senaryosu için ölçüm verileri ve Dual-slope yol kaybı modeli ile alıcıda hesaplanan RSSI değerleri grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.



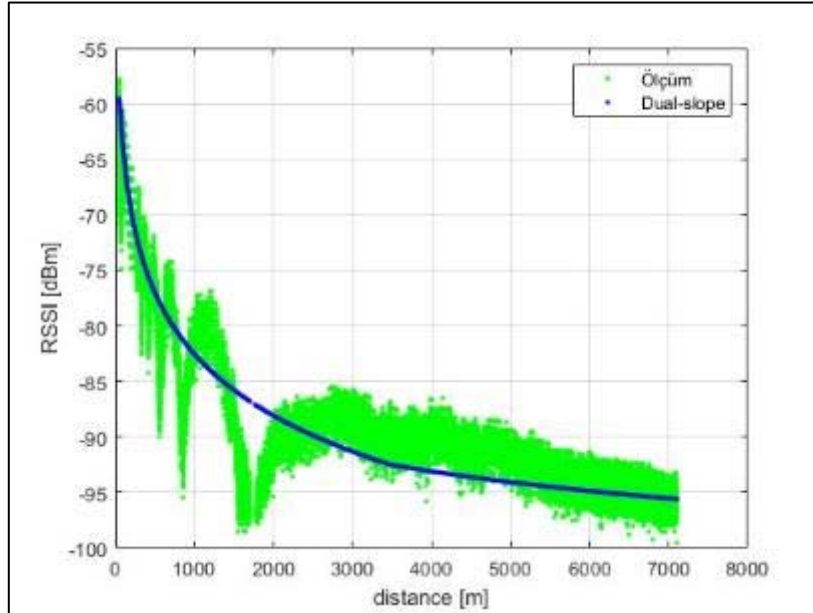
Şekil 78. M2 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{dual}$ karşılaştırması

Şekil 79’da M3 senaryosu için ölçüm verileri ve Dual-slope yol kaybı modeli ile alıcıda hesaplanan RSSI değerleri grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.



Şekil 79. M3 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{dual}$ karşılaştırması

Şekil 80’de M4 senaryosu için ölçüm verileri ve Dual-slope yol kaybı modeli ile alıcıda hesaplanan RSSI değerleri grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.



Şekil 80. M4 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{dual}$ karşılaştırması

Dört farklı senaryo için alıcıda Log-distance yol kaybı modeli uygulanması sonucu elde edilen RSSI verileri RMSE ve R_squared değerleri ile incelenerek, modelin başarımı Tablo 19’da ortaya koyulmuştur.

Tablo 19. d_0 , n_1 , n_2 ve d_{break} değerlerine karşılık hesaplanan $RSSI_{dual}$ başarımları sonuçları

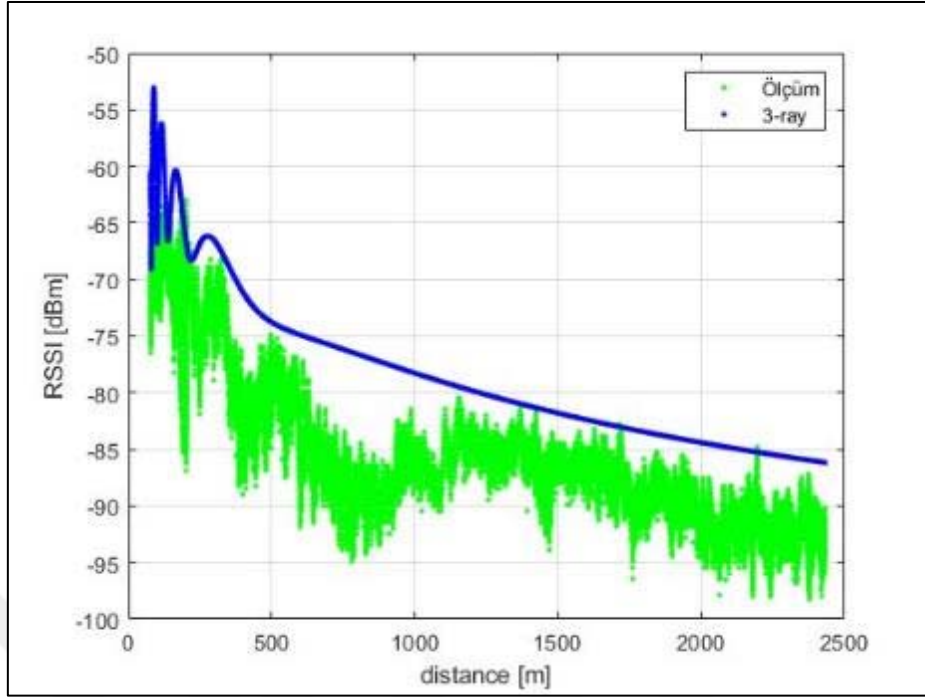
Ölçüm Senaryosu	n_1	n_2	d_0 [m]	d_{break} [m]	RMSE [dB]	R_squared
M1	2.05	1.52	77.03	1515.7	3.1128	0.8800
M2	1.74	2.41	68.24	1515.7	2.3580	0.9154
M3	1.53	2.39	59.98	1515.7	2.5882	0.8927
M4	1.79	0.81	47.59	3475.7	2.9531	0.8071

3.6. 3-ışınlı Yol Kaybı Modeli ve Ölçüm Verilerinin Karşılaştırılması

3-ışınlı yol kaybı modeli ile alıcıda hesaplanan RSSI değerleri ve senaryolara ait ölçüm verileri tek tek grafiksel (h_r) ve topluca başarımları (h_r ve $best_{h_r}$) olarak karşılaştırılmıştır. h_e , buharlaşma kanal yüksekliği değeri h_r ve $best_{h_r}$ için en düşük RMSE değeri için kestirilmiştir (Lee vd., 2014). h_e yüksekliği sınırları 0-40m arasında değişmektedir. Yüksek h_e değerleri 1-2 GHz gibi nispeten küçük frekanslarda etkili olurken düşük buharlaşma kanalı yüksekliği yalnızca daha yüksek frekanslarda etkilidir (Paulus, 1989). Karadeniz’de (İstanbul ve Bulgaristan kıyıları) yapılan 2 farklı çalışma sonucunda buharlaşma kanalının yaz ve sonbahar mevsimlerinde daha etkin olduğu, kış ve ilkbahar mevsimlerinde bu etkinin azaldığı ortaya konulmuştur. Bu durum havadaki nem miktarının mevsimsel değişimine bağlanmaktadır (Mentes & Kaymaz, 2007; Sirkova, 2015). Bu çalışma için ölçümler Aralık ve Mart aylarında yapılmıştır. Ölçümler sonucu elde edilen veriler ve yapılan hesaplamalar sonucu alıcıda elde edilen $RSSI_{3-ray}$ değerleri denklem 91’deki gibi hesaplanmıştır.

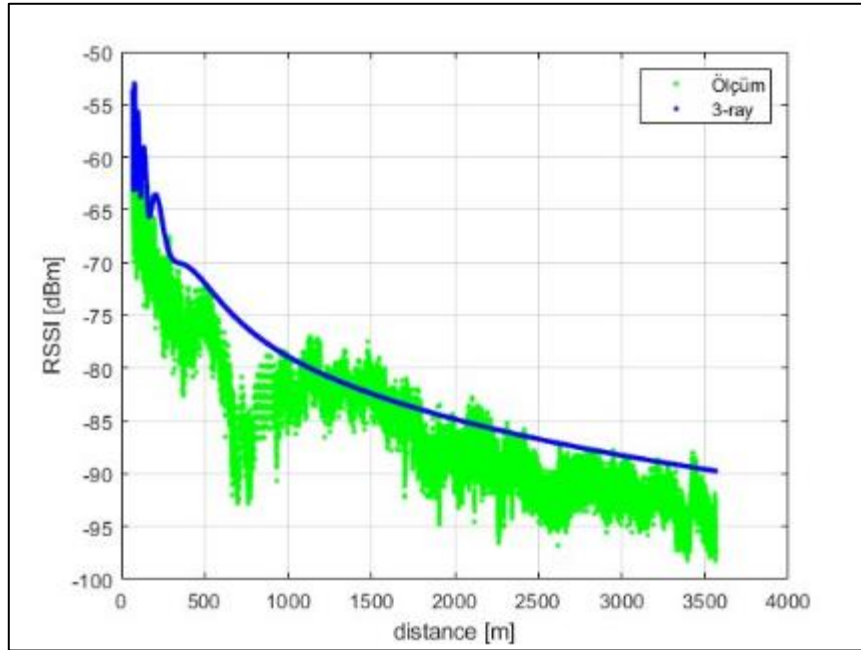
$$RSSI_{3-ray}[dBm] = P_t[dBm] + G_{td}[dBi] + G_{rd}[dBi] + L_{3-ray}[dB] \quad (91)$$

Şekil 83’de M1 senaryosu için ölçüm verileri ve 3-ışınlı yol kaybı modeli ile alıcıda hesaplanan RSSI değerleri grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.



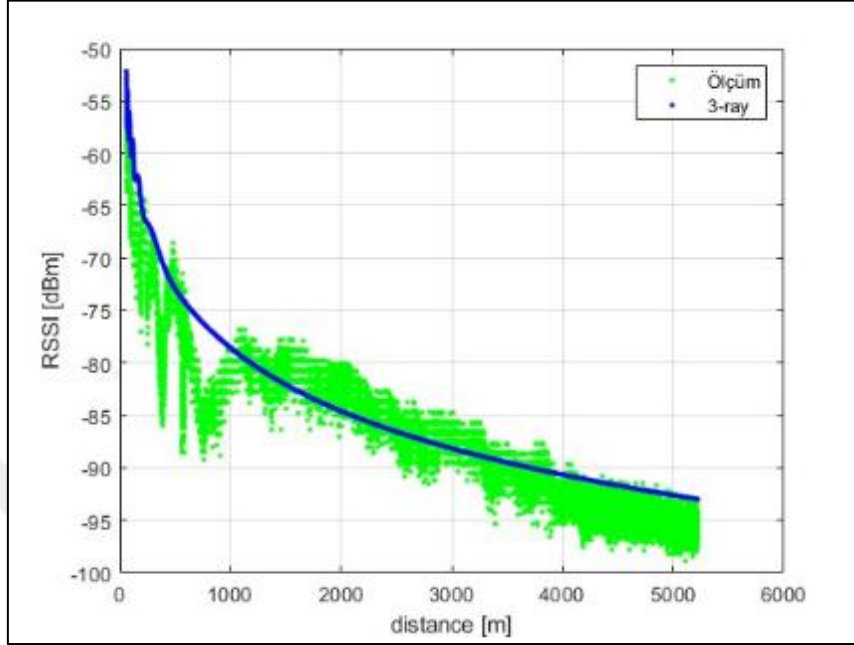
Şekil 81. M1 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{3-ray}$ karşılaştırması

Şekil 82’de M2 senaryosu için ölçüm verileri ve 3-ışınlı yol kaybı modeli ile alıcıda hesaplanan RSSI değerleri grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.



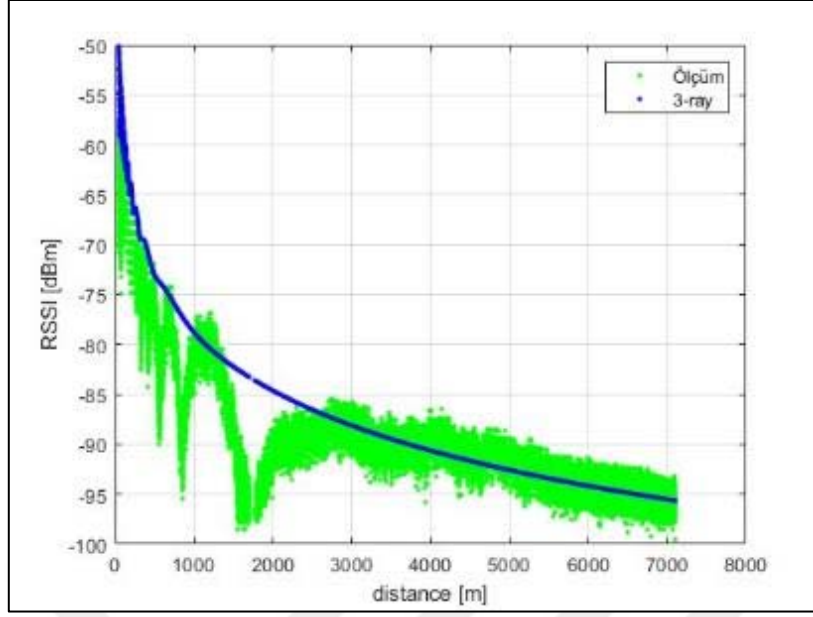
Şekil 82. M2 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{3-ray}$ karşılaştırması

Şekil 83’de M3 senaryosu için ölçüm verileri ve 3-ışınlı yol kaybı modeli ile alıcıda hesaplanan RSSI değerleri grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.



Şekil 83. M3 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{3-ray}$ karşılaştırması

Şekil 84’de M4 senaryosu için ölçüm verileri ve 3-ışınlı yol kaybı modeli ile alıcıda hesaplanan RSSI değerleri grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.



Şekil 84. M4 senaryosu ölçüm ve $RSSI_{3-ray}$ karşılaştırması

Her bir senaryo için alıcıda 3-ışınlı yol kaybı modeli uygulanması sonucu elde edilen RSSI verileri, RMSE ve R_squared değerleri h_r ve $best_{h_r}$ 'ye göre ayrı ayrı incelenerek, modelin başarımı Tablo 20'de ortaya koyulmuştur.

Tablo 20. h_e değerlerine karşılık hesaplanan $RSSI_{3-ray}$ başarımları sonuçları

Ölçüm Senaryosu	h_e [m] (h_r)	h_e [m] ($best_{h_r}$)	RMSE [dB] (h_r)	R_squared (h_r)	RMSE [dB] ($best_{h_r}$)	R_squared ($best_{h_r}$)
M1	3.39	3.73	7.3673	0.8774	7.4067	0.8571
M2	3.58	3.5	4.5091	0.8933	4.5115	0.8936
M3	3.47	5.83	2.9284	0.8877	2.9307	0.8875
M4	3.49	13.31	3.9049	0.8183	3.9058	0.8180

3.7. Önerilen Parçalı Yol Kaybı Modeli ve Ölçüm Verilerinin Karşılaştırılması

Mevcut yol kaybı modelleri, tüm propagasyon ortamını tek parçalı veya çok parçalı yaklaşımlarla incelemektedir. Log-distance yol kaybı modeli için bir üstel n katsayısının tüm haberleşme kanalını karakterize edemeyeceği ve bu amaçla ortamın 2 farklı parçada incelenmesi (Dual-Slope yol kaybı modeli) gerektiği yapılan çalışmalarda önerilmektedir

(Fernández, 2012; Feuerstein vd., 1994; Oyie & Afullo, 2018; Ito vd., 2007; Zöchmann vd., 2017). Dual-Slope yol kaybı model başarımını arttırmak için n , n_1 ve n_2 katsayılarını birlikte kullanan 3 parçalı bir inceleme de yapılmıştır (Khaled vd., 2022). Başka bir çalışmada haberleşme kanalı, 2-ışınlı ve 3-ışınlı yol kaybı modelleri ile parçalı olarak incelenmiştir (Lee vd., 2014). Ayrıca propagasyon ortamının 3 bölgeye ayrılıp, 2-ışınlı yol kaybı modelinin her bir bölge için düzenlendiği çalışmalar da mevcuttur (Reyes-Guerrero vd., 2011; Jaekel vd., 2017). Parçalı model yaklaşımı ile tahmin başarımının arttığı literatür incelendiğinde görülmektedir.

Ölçüm sonuçları grafikleri incelendiğinde; işaretlerin belli bir noktaya kadar 2-ışınlı yol kaybı modeline, bu nokta sonrası log-distance yol kaybı modeline daha uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada incelenen değiştirilmiş 2-ışınlı yol kaybı modeli (Modified REL) ve log-distance modelleri ile iki parçalı bir yaklaşım yapılarak yeni bir model önerilmiştir. 2 parçanın birleşim noktası olarak tespit edilen d_{break} için hem Fresnel bölgesi hesaplaması ($4h_t h_r / \lambda$) hem de en düşük RMSE için kestirim yöntemi uygulanmıştır. Hesaplanan ve kestirilen d_{break} değerleri ile elde edilen başarımlar arasında kayda değer bir fark oluşmadığından grafiksel gösterimler hesaplanan d_{break} değerine göre, tablo olarak verilecek başarımlar ise hem hesaplanan hem de kestirilen d_{break} için verilmiştir. Birinci parça için ele alınan değiştirilmiş 2-ışınlı yol kaybı modeli ve d_{break} hesabı için $best_{h_r}$ değerleri kullanılmıştır. Log-distance yol kaybı modeli ile incelenen ikinci parçada ihtiyaç duyulan n katsayısı, önerilen parçalı model RSSI değerleri için en düşük RMSE değerine göre kestirilmiştir. d_{break} noktasına göre parçalı modellere ait mesafeler aşağıdaki eşitliklere göre belirlenmiştir.

$$d_{S1} = d \leq d_{break} : 1. \text{ parça mesafe}$$

$$d_{S2} = d > d_{break} : 2. \text{ parça mesafe}$$

d_0 değeri olarak d_{S2} 'nin ilk değeri, $PL(d_0)$ da Modified REL'in ikinci kısım için ilk RSSI değeri olarak alındı. d_{S2} mesafesi için n kestiriminde bu d_0 ve $PL(d_0)$ değerleri kullanıldı. Bu durumda d_{S1} mesafesinde Modified REL, d_{S2} mesafesinde Log-distance modeli kullanılmış oldu. $d \leq d_{break}$ mesafesi için alıcıda hesaplanan $RSSI_{ModREL_{S1}}$ değerleri denklem 92 ile ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned}
RSSI_{Mod_{REL_{S1}}} [dBm] \\
= P_{t_{S1}} [dBm] + G_{td_{S1}} [dBi] + G_{rd_{S1}} [dBi] - L_{FSPL_{S1}} [dB] + F_{S1} [dB] \\
\pm L_{Diff_{S1}} [dB] - A_{S1} [dB]
\end{aligned} \tag{92}$$

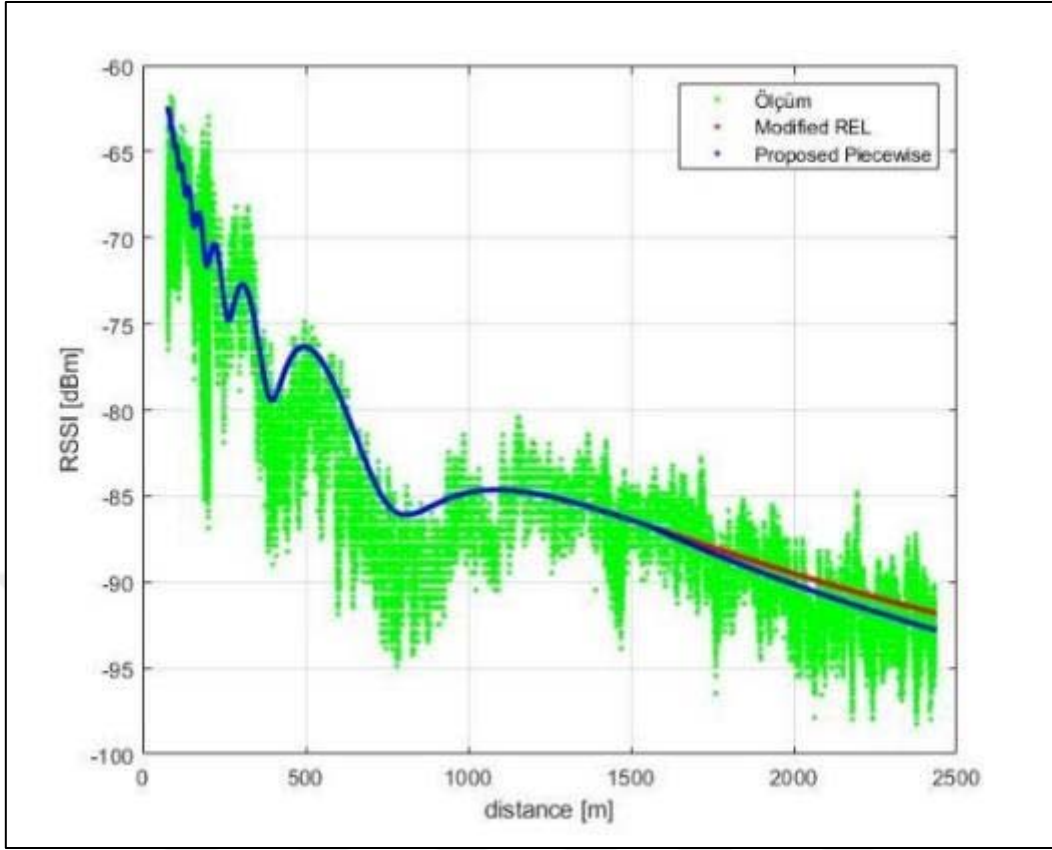
$d > d_{break}$ mesafesi için alıcıda hesaplanan $RSSI_{Log_{d_{S2}}}$ değerleri denklem 93 ile ifade edilmiştir. PL_{S2} terimi ikinci parça için Log-distance modeli ile hesaplanan yol kaybını göstermektedir.

$$RSSI_{Log_{d_{S2}}} [dBm] = P_{t_{S2}} [dBm] + G_{td_{S2}} [dBi] + G_{rd_{S2}} [dBi] - PL_{S2} [dB] \tag{93}$$

Her iki parça birleştirilerek alıcıda hesaplanacak $RSSI_{Proposed}$ değerleri aşağıdaki denkleme göre ele alınmıştır.

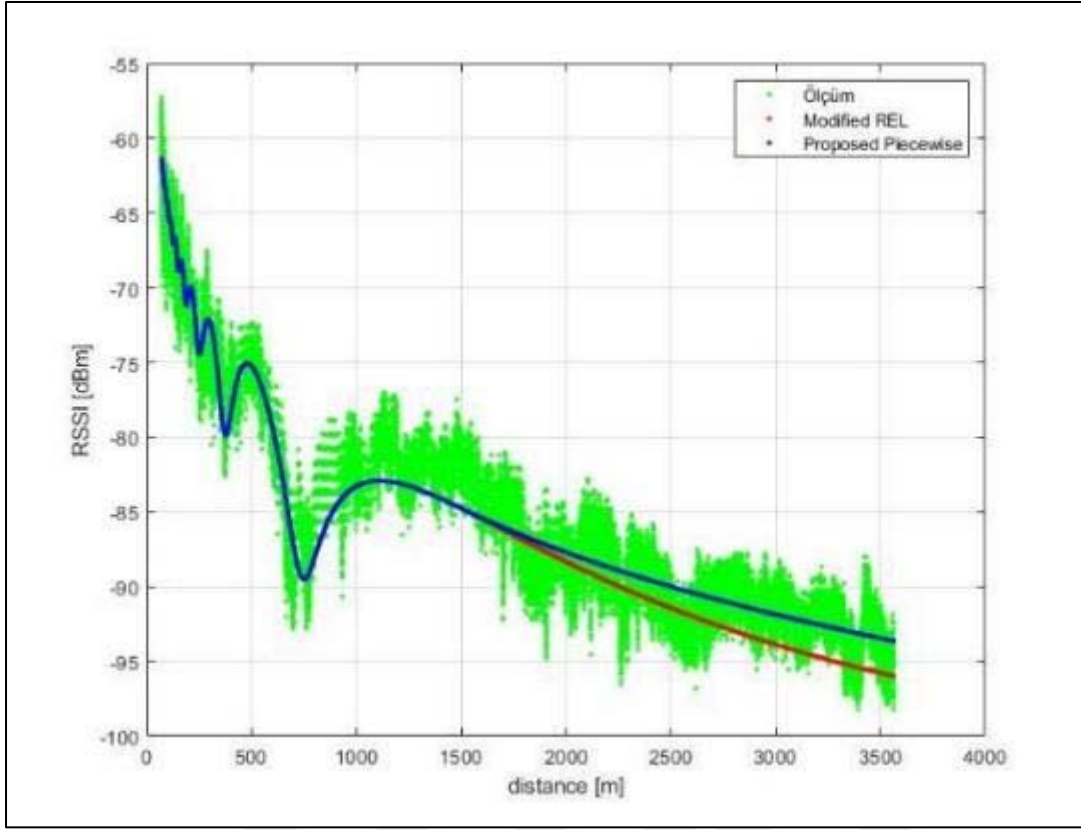
$$RSSI_{Proposed} [dBm] = RSSI_{Modified_{REL_{S1}}} [dBm] + RSSI_{Log_{d_{S2}}} [dBm] \tag{94}$$

Önerilen parçalı model ve Modified REL model RSSI değerleri ile her bir senaryo için elde edilen ölçüm verileri grafiksel ve başarımlar olarak karşılaştırılmıştır. Grafiklerde $RSSI_{Proposed}$ mavi çizgiyle, $RSSI_{Modified_{REL}}$ kırmızı çizgi ile gösterilmiştir. M1 senaryosu için ölçüm verileri ve alıcıda hesaplanan $RSSI_{Proposed}$ ve $RSSI_{Modified_{REL}}$ değerleri grafiksel olarak Şekil 85'de karşılaştırılmıştır.



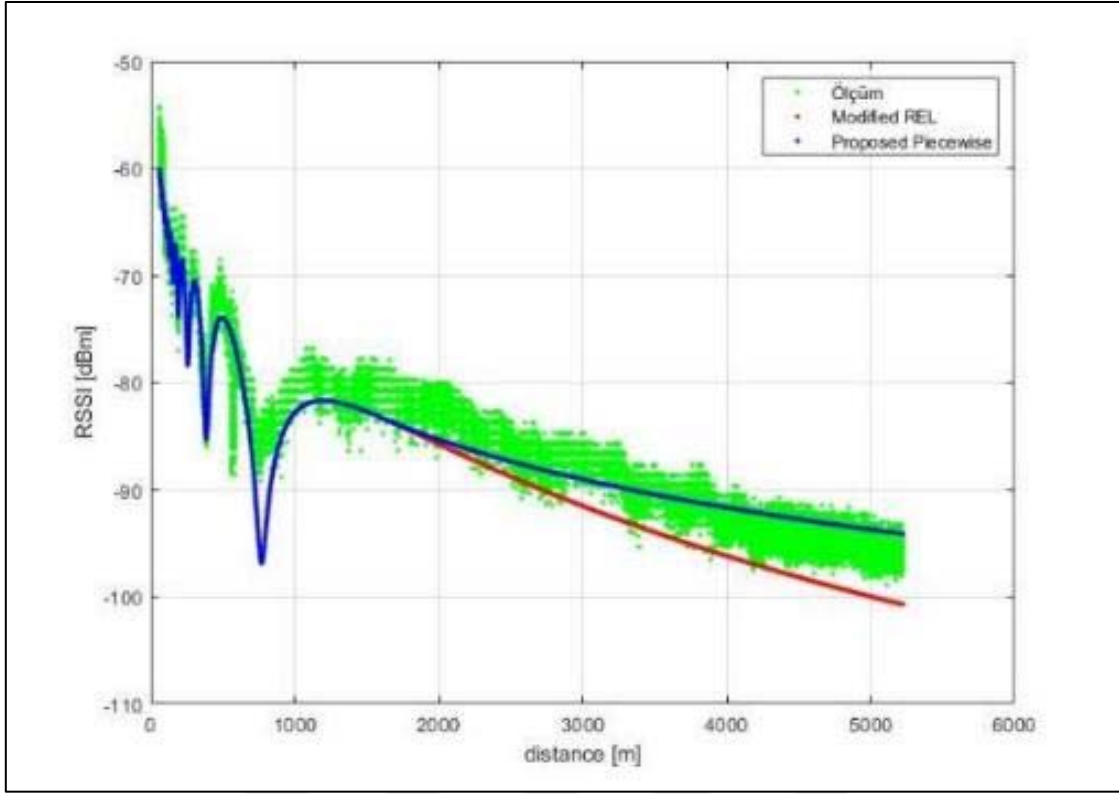
Şekil 85. M1 senaryosu ölçüm, $RSSI_{Proposed}$ ve $RSSI_{Modified REL}$ karşılaştırması

M2 senaryosu için ölçüm verileri ve alıcıda hesaplanan $RSSI_{Proposed}$ ve $RSSI_{Modified REL}$ değerleri grafiksel olarak Şekil 86’da karşılaştırılmıştır.



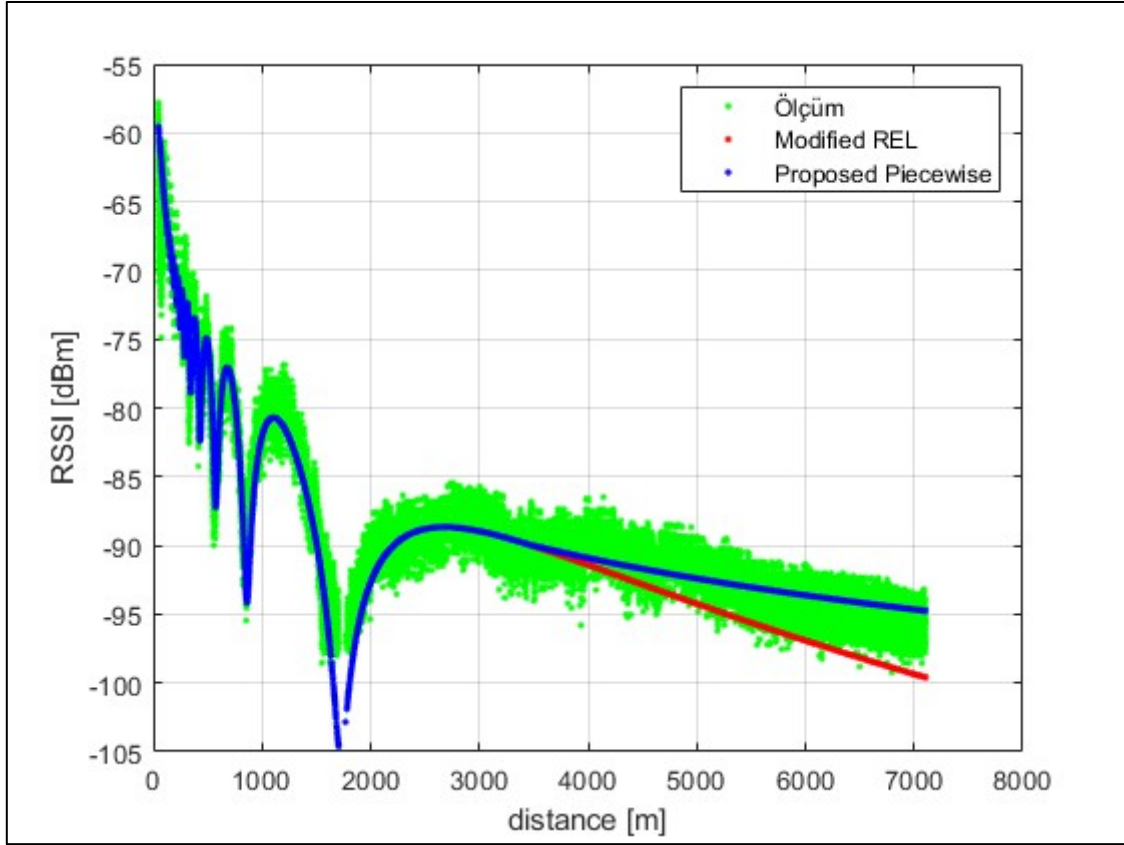
Şekil 86. M2 senaryosu ölçüm, $RSSI_{Proposed}$ ve $RSSI_{Modified REL}$ karşılaştırması

M3 senaryosu için ölçüm verileri ve alıcıda hesaplanan $RSSI_{Proposed}$ ve $RSSI_{Modified REL}$ değerleri grafiksel olarak Şekil 87’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 87. M3 senaryosu ölçüm, $RSSI_{Proposed}$ ve $RSSI_{Modified REL}$ karşılaştırması

M4 senaryosu için ölçüm verileri ve alıcıda hesaplanan $RSSI_{Proposed}$ ve $RSSI_{Modified REL}$ değerleri grafiksel olarak Şekil 88’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 88. M4 senaryosu ölçüm, $RSSI_{Proposed}$ ve $RSSI_{Modified REL}$ karşılaştırması

Her bir senaryo için alıcıda önerilen parçalı model ve Modified REL modelleri uygulanması sonucu elde edilen RSSI verileri RMSE ve R_squared değerleri, hesaplanan ve kestirilen d_{break} mesafelerine göre ayrı ayrı incelenerek, modelin başarımı Tablo 21’de ortaya koyulmuştur.

Tablo 21. Hesaplanan ve kestirilen d_{break} için $RSSI_{Proposed}$ ve $RSSI_{Modified REL}$ başarımları sonuçları

	Modified REL	Proposed Piecewise				
	-	d_{break} hesaplama		d_{break} kestirim		-
	RMSE	d_{break} [m]	RMSE	d_{break} [m]	RMSE	$best_{h_r}$ [m]
	R_squared	n	R_squared	n	R_squared	
M1	2.7161	1563.4	2.6778	1590	2.6777	3.61
	0.9213	3.11	0.9212	3.16	0.9213	
M2	2.2585	1485.4	1.9245	1490	1.9245	3.43
	0.9567	2.36	0.9469	2.37	0.9472	
M3	3.8723	1537.4	2.4178	1590	2.4153	3.55
	0.9699	2.11	0.9296	2.12	0.9302	
M4	2.5387	3445.9	1.6529	3190	1.6463	3.47
	0.9562	1.54	0.9460	1.55	0.9454	

Tablo 21 incelendiğinde tüm senaryolar için önerilen parçalı modelin başarımları artışı sağladığı görülmektedir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tüm senaryolar için elde edilen ölçüm sonuçları ve farklı yöntemlerle alıcıda hesaplanan RSSI tahminleri bir önceki bölümde gösterilmiştir. Alıcı ve verici anten yüksekliğinin önemli parametreler olduğu propagasyon sistemleri göz önüne alındığında 13.3m verici anten yüksekliği için elde edilen 7km'lik menzıl, M4 senaryosu için tahmin edilebilir bir sonuçtur. Aynı hava ve deniz durumlarında M3 senaryosu için 5.8m verici anten yüksekliğinde haberleşme menzili kısalmıştır. Ancak M3 senaryosunda elde edilen 5km'lik menzıl, benzer verici anten yüksekliğine sahip M1 ve M2 senaryolarına göre daha uzundur. Bu durum; M3 ve M4 senaryolarındaki deniz durumunun daha sakin, deniz dalgası yüksekliğinin daha düşük ve buna bağlı olarak yansıma, kırınım, saçılım ve gölgeleme gibi kayıpların da daha az olmasıyla açıklanabilir.

M1 ve M2 senaryo ölçüm sonuçları incelendiğinde ise M1 senaryosunda 2.5km olan menzilin M2 senaryosunda 3.5km'ye çıktığı görülmektedir. Yine benzer deniz durumu şartlarında yapılan bu iki ölçüm sonucunda menzilde ortaya çıkan fark, M1 senaryosu için rüzgâr hızının M2 senaryosuna göre daha fazla olması ve sonucunda deniz dalga yapısındaki değişim nedeniyle β_0 (RMS surface slope) değerinin yüksekliği ve M1 senaryosu esnasında havanın yağmurlu olması etkilerinden kaynaklanmaktadır.

Her bir senaryoda elde edilen modülasyonlara bağlı grafikler incelendiğinde 1/2 BPSK modülasyonunun zayıflamaya karşı daha iyi bir başarımla sergilediği beklenen bir sonuç olarak gözlemlenmiş ve değerlendirmeler için 1/2 BPSK modülasyon sonuçları kullanılmıştır. Verici antenin karada otomobil üzerine, alıcı antenin denizde tekne üzerine sabitlendiği ölçüm düzeneğinde gidiş ve dönüş yönünde yapılan ölçümler arasında tekne ekipman ve güvertesinden kaynaklanabilecek yansımaları en aza indirebilmek için dönüş ölçümleri kullanılmıştır.

Serbest uzay ve basitleştirilmiş 2-ışınlı yol kaybı modelleri hem kara hem deniz radyo dalgası propagasyon sistemlerinde alıcıdaki RSSI değerinin tahmin edilmesi için sıklıkla kullanılmaktadır. Bu iki yöntemin başarımla sonuçları incelendiğinde, her ne kadar basitleştirilmiş 2-ışınlı model serbest uzay yol kaybı modeline göre daha iyi başarımla elde etse de propagasyon kanalının belirlenmesi için sınırlı tahminde bulunabildikleri görülmektedir.

Basitleştirilmiş 2-ışınlı yol kaybı modeli, yol kazanç ya da örüntü propagasyon faktörü (F)'nün parametrelerinde yapılan varsayım ve kabuller ile sadeleştirilerek elde edilmektedir. Bu ihmaller sonucunda model başarımının düşeceği açıktır. Bu amaçla basitleştirilmiş 2-ışınlı model de dahil olmak üzere beş farklı 2-ışınlı model yaklaşımı ölçüm verileri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Her bir parametrenin eklenmesiyle model başarımının arttığı açıkça görülmektedir. Deniz ortamı düşünüldüğünde dalga değişiminin alıcı anten yüksekliğine etkisi göz önüne alınmalıdır. Bu durumu hesaplamalara katmak için ortalama bir alıcı anten yüksekliği kestirimi yapılmış ve özellikle REL ve REL+G(θ) yaklaşımları için başarımlar hesapları yeniden yapılarak anten yüksekliğindeki değişimin etkisi gözlemlenmiştir. Ortalama olarak RMSE'ye bağlı yapılan *best_h_r* kestirimi ile ortaya konan Modified REL modelinin başarımı diğer yaklaşımlara göre yüksek çıkmıştır. Bu sonuca bakılarak; deniz üzeri dalga yapısının (β_0 ve σ_h) ve buna bağlı anten hareketlerinin daha ayrıntılı bir modeli ile başarımın artacağı söylenebilir. Bunun için de lazer ya da hassas yükseklik bilgisi veren GPS donanımları ile deniz dalgası yüksekliği verisinin ayrıntılı olarak elde edilmesi gelecek çalışmalarda yeni modellerin ortaya koyulması için elzemdir.

İç ve dış ortamlar için yol kaybı hesabında kullanılan bir diğer yöntem olan Log-distance yol kaybı modeli ve iki parçalı inceleme yapılan Dual-Slope yol kaybı modelleri de ölçüm verileri ile başarımlar açısından karşılaştırılmıştır. Tüm propagasyon yolunun tek bir n parametresi yerine 2 farklı üstel parametre ile incelenmesi başarımı arttırmıştır. Bu iki yöntem için gerekli parametrelerden d_0 'ın tespiti için alıcı – verici arası mesafenin en küçük olduğu değer kullanılmıştır. Bu mesafeler yakın alan bölgesi (near field zone) dışındadır. İki parçalı yaklaşımda bir önemli unsur da d_{break} noktasının belirlenmesidir. Hesaplama ve en düşük RMSE'ye göre kestirim yöntemleri benzer başarımlar sonuçları vermiştir. Başarımlar olumlu etkileyecek farklı d_{break} hesapları değerlendirilebilir.

Deniz üzerindeki nem ve sıcaklık değişimlerinden kaynaklı olarak özellikle sıcak ve tropikal iklim bölgelerinde oluşan buharlaşma kanalının etkisini hesaplamalara dahil eden 3-ışınlı yol kaybı modeli de her bir senaryo ölçümü için elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Tahmin başarımı serbest uzay yol kaybına benzer şekilde nispeten kötüdür. M2, M3 ve M4 senaryolarında M1 senaryosuna göre hava sıcaklığının daha fazla oluşu ve M1 senaryosu kış mevsiminde iken M2, M3 ve M4 senaryolarının ilkbahar da ölçülmesi havadaki nem miktarını etkileyeceğinden M1 senaryosu için 3-ışınlı model başarımı daha düşüktür. Yerde deniz yüzeyinden ve havada buharlaşma olduğundan yansıyan dalgalar için birer yansıma katsayısı kullanılarak yansıyan bileşenlerin genlik ve faz bilgileri

de hesaba katılarak yöntem geliştirilebilir. Ayrıca Modified REL modelinde olduğu gibi anten kazançları da üst yansıma noktasının oluşturduğu gelme açısına bağlı olarak hesaplamalara katılmalıdır. Karadeniz özelinde buharlaşma oluşunu dikkate alarak yapılacak propagasyon kanalı çalışmaları için yaz mevsimi seçilmesi önemlidir.

Modified REL modelinin ve iki parçalı yaklaşımın başarımlar üzerindeki olumlu etkisini birleştirmek amacıyla hesaplanan bir kırılma noktası için iki parçalı model önerisinde bulunulmuştur. Beklenen şekilde önerilen model, başarımlar artışı sağlamaktadır. Rayleigh pürüzlülük kriteri gereği pürüzlülük etkisi kıyıya daha yakın bölgelerde etkindir. Yine bu kriter kapsamında belirlenen noktadan sonrasındaki yüzey düzgün olarak kabul edilebilir denmektedir. Yüzeyin pürüzlülük derecesinin mesafeye bağlı bu değişimi propagasyon ortamının iki parçalı incelenmesini teşvik etmektedir. Yüzey yansıma katsayısının hesabı için gerekli bağlı dielektrik katsayısı ve iletkenlik parametrelerinin genel tablolardan değil de değerlendirilecek frekans dikkate alınarak ölçüm yapılan bölgeye özgü tespit edilmesi de çalışmanın doğruluğunu pekiştirecektir.

İletişimin insanlar için her açıdan olmazsa olmazlar arasında olduğu günümüzde deniz haberleşme sistemlerinin geliştirilmesi önemlidir. Bu amaçla da incelenmesi için çokça zorluk barındıran deniz ortamı propagasyon kanalının tam anlamıyla modellenmesi gereklidir. Deniz ortamı için en önemli etken deniz dalgalarıdır. Tablo 22, 23, 24 ve 25’de her bir ölçüm senaryosu için modellere bağlı başarımlar sonuçları karşılaştırma için verilmiştir.

Tablo 22. M1 senaryosu için incelenen yöntemlere ait tahmin başarımları

	FSPL	2-ray	2-ray + Γ	2-ray + G(θ)	REL	REL + G(θ)	Modified REL	Log_distance	Dual-Slope	3-ray	Proposed Piecewise
R_2	0.88	0.61	0.63	0.82	0.91	0.91	0.92	0.88	0.88	0.87	0.92
RMSE	3.10	6.42	6.30	4.64	2.77	2.76	2.71	3.09	3.11	7.36	2.67

Tablo 23. M2 senaryosu için incelenen yöntemlere ait tahmin başarımları

	FSPL	2-ray	2-ray + Γ	2-ray + G(θ)	REL	REL + G(θ)	Modified REL	Log_distance	Dual-Slope	3-ray	Proposed Piecewise
R_2	0.90	0.76	0.76	0.89	0.94	0.95	0.95	0.90	0.91	0.89	0.94
RMSE	3.49	4.23	4.17	2.65	2.34	2.30	2.25	2.44	2.35	4.50	1.92

Tablo 24. M3 senaryosu için incelenen yöntemlere ait tahmin başarımları

	FSPL	2-ray	2-ray + Γ	2-ray + G(θ)	REL	REL + G(θ)	Modified REL	Log_distance	Dual-Slope	3-ray	Proposed Piecewise
R_2	0.88	0.89	0.89	0.96	0.94	0.95	0.95	0.90	0.91	0.89	0.92
RMSE	5.71	4.31	4.31	3.81	3.97	2.30	2.25	2.44	2.35	4.50	2.41

Tablo 25. M4 senaryosu için incelenen yöntemlere ait tahmin başarımları

	FSPL	2-ray	2-ray + Γ	2-ray + G(θ)	REL	REL + G(θ)	Modified REL	Log_distance	Dual-Slope	3-ray	Proposed Piecewise
R_2	0.81	0.85	0.86	0.94	0.93	0.95	0.95	0.81	0.80	0.81	0.94
RMSE	5.72	3.31	3.22	2.55	2.61	2.55	2.53	3.01	2.95	3.90	1.65

Modified REL ve Proposed modeller için $best_{h_r}$ değerleri kullanılmıştır. Tablo 22 ve 23 için başarımların değerleri incelendiğinde pürüzlülük parametrelerinin M1 ve M2

senaryoları için sisteme dahil edilmesi en yüksek başarımları sağlamıştır. M1 ve M2 senaryoları M3 ve M4'e göre daha dalgalı deniz durumuna sahiptir. Yine Tablo 24 ve 25 incelendiğinde deniz durumundan beklenildiği gibi anten kazançlarının açığa bağlı değerlendirilmesi pürüzlülük parametrelerinin hesaba katılmasından daha fazla başarımları sağlamıştır. Ancak bu en önemli etkeni oluşturan faktörler çok fazladır. Rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, deniz dibi yapısı ve derinlik bunlardan bazılarıdır. Denizden bağımsız olarak sıcaklık ve neme bağlı atmosferik zayıflatma da ayrıca irdelenmelidir. Bahsedilen tüm parametreleri dikkate alan bir yol kaybı modeli olmadığı için deniz ortamı haberleşmesi konusunda yeni geliştirmeler yapılmalıdır.



5. KAYNAKLAR

- Ang, C. & Wen, S. (2008). Signal strength sensitivity and its effects on routing in maritime wireless networks. *IEEE Conference on Local Computer Networks*, Montreal. doi:10.1109/LCN.2008.4664169
- Bansal, R. (2006). *Fundamentals of Engineering Electromagnetics*. Florida: Taylor & Francis Group.
- Barton, D. K. (2013). *Radar Equations for Modern Radar*. Norwood: Artech House.
- Bekkadal, F. (2009). Emerging maritime communications Technologies. *International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications*, Lille. doi:10.1109/ITST.2009.5399329
- Boithias, L. (1987). *Radio Wave Propagation*. Paris: North Oxford Academic Publishers Ltd.
- Cohda Wireless, (2017). *MK5 OBU Cohda Wireless Technical Specifications*.
- Coker, A., Straatemeier, L., Rogers, T., Valdez, P., Cooksey, D. & Griendling, K. (2013). Maritime Channel Modeling and Simulation for Efficient Wideband Communication Systems between Autonomous Unmanned Surface Vehicles. *SPAWAR Systems Center Pacific, San Diego, CA*. Technical Report 2035.
- Collin, R. E. (1985). *Antennas and Radiowave Propagation*. New York: McGraw Hill Book Company.
- El-Sallabi, H., Aldosary, A., Basahl, Y. & Chamberland, J. (2018). Improvement in Accuracy of Breakpoint Distance Model for Path Loss Prediction. *Progress in Electromagnetics Research Symposium*. doi:10.23919/PIERS.2018.8597923
- Fernández, J. R., Quispe, M., Kemper, G., Samaniego, J. & Diaz, D. (2012). Adjustments of Log-Distance Path Loss Model for Digital Television in Lima. *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*. doi:10.14209/sbrt.2012.109
- Feuerstein, M. J., Blackard, K. L., Rappaport, T. S., Seidel, S. Y. & Xia, H. H. (1994). Path loss and delay spread models as functions of antenna height for microcellular system design. *Vehicular Technology Society 42nd VTS Conference- Frontiers of Technology*, Denver. doi:10.1109/VETEC.1992.245384
- Gaitán, M., Pinto, L. R., Santos, P. M. & Almeida, L. (2019). On the Two-Ray Model Analysis for Overwater Links with Tidal Variations. *Simpósio de Informatica*, Portugal.

- Gaitán, M., Santos, P. M., Pinto, L. R. & Almeida, L. (2020). Experimental evaluation of the two-ray model for near-shore WiFi-based network systems design. *Vehicular Technology Conference*, Antwerp. doi: 10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9129548
- Gaitán, M., d'Orey, P. M., Santos, P. M., Ribeiro, M., Pinto, L. R., Almeida, L. & Sousa, J. B. (2021). Wireless radio link design to improve near-shore communication with surface nodes on tidal waters. *EEE/MTS Oceans*, San Diego. doi:10.23919/OCEANS44145.2021.9706046
- Habib, A. & Moh, S. (2019). Wireless Channel Models for Over-The-Sea Communication: A Comparative Study. *Applied Sciences*, 9(3), 443. doi:10.3390/app9030443
- Haspert, K. & Tuley, M. (2011). Comparison of Predicted and Measured Multipath Impulse Responses. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 47(3), 1696-1709.
- Hoerack, G. (2015), *Wideband Propagation Channel Model for Ship-to-Shore Communications Considering Sea Surface Effects*. Graz University of Technology, Institut für Hochfrequenztechnik, Master's Thesis, Graz.
- Huang, F., Liao, X. & Bai, Y. (2016). Multipath Channel Model for Radio Propagation over Sea Surface. *Wireless Personal Communications*, 90, 245-257. doi:10.1007/s11277-016-3343-4
- Ishtaiwi, M., Hajjyahya, M. & Habbash, S. (2021). Electrical Properties of Dead Sea Water. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 9, 3049-3101. doi:10.4236/jamp.2021.912201
- Ito, Y., Taga, T., Muramatsu, J. & Suzuki, N. (2007). Prediction of Line-of-Sight Propagation Loss in Inter-Vehicle Communication Environments. *International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Athens. doi:10.1109/PIMRC.2007.4394280
- ITU-R P.527-3. (1992). *Electrical Characteristics of the Surface of the Earth*.
- ITU-R P.1411-12. (2023). *Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz*.
- ITU-R P.1546. (2005). *Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz*.
- Jaeckel, S., Raschkowski, L., Wu, S., Thiele, L. & Keusgen, W. (2017). An Explicit Ground Reflection Model for mm-Wave Channels. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops*, San Francisco. doi: 10.1109/WCNCW.2017.7919093
- Jenn, D. (2012). *Electromagnetic Wave Propagation*. Antennas and Propagation, Naval Postgraduate School, Lecture Notes, Volume 5.

- Karasawa, Y. & Shiokawa, T. (1984). Characteristics of L-Band Multipath Fading due to Sea Surface Reflection. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 32(6), 618-623. doi:10.1109/TAP.1984.1143365
- Khaled, Z., Ajib, W. & Mcheick, H. (2022). Log Distance Path Loss Model: Application and Improvement for Sub 5 GHz Rural Fixed Wireless Networks. *IEEE Access*, 10, 52020-52029. doi:10.1109/ACCESS.2022.3166895
- Kuzuligil, K. (2021). *Araçlar Arası (V2V) Haberleşme Kanalı'nın Ölçülmesi ve Modellenmesi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Lee, Y. H., Dong, F. & Meng, Y. S. (2014). Near Sea-Surface Mobile Radiowave Propagation at 5 GHz: Measurements and Modeling. *Radioengineering Journal*, 23(3), 824-830.
- Li, C., Yu, J., Xue, J., Chen, W., Wang, S. & Yang, K. (2021). Maritime Broadband Communication: Wireless Channel Measurement and Characteristic Analysis for Offshore Waters. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(7), 783. doi:10.3390/jmse9070783
- Li, F., Shui, Y., Liang, J., Yang, K. & Yu, J. (2023). Ship-to-ship maritime wireless channel modeling under various sea state conditions based on REL model. *Frontiers in Marine Science*. doi:10.3389/fmars.2023.1134286
- Lopes, M. J., Teixeira F., Mamede J. B. & Compos R. (2014). Wi-Fi Broadband Maritime Communications Using 5.8 GHz Band. *Underwater Communications and Networking*, 5-9.
- Mehrnia, N. & Ozdemir, M. K. (2018). Ray Tracing-Based Maritime Channel Analysis for Millimeter Radiowaves. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 40(1), 108-130. doi:10.1007/s10762-018-0536-9
- Mentes, S. & Kaymaz, Z. (2007). Investigation of Surface Duct Conditions over Istanbul, Turkey. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(3), 318-337.
- Miller, A. R., Brown, R. M. & Vegh, E. (1983). *A New Derivation for the Rough Surface Reflection Coefficient and for the Distribution of Sea Wave Elevations*. Naval Research Laboratory, Washington D.C., accession number: A134774.
- Mobile Mark, (2018). *MGW-303 Series Antenna Technical Specifications*.
- Olsen, R. L., Rogers D. V. & Hodge D. B. (1978). The aRb Relation in the Calculation of Rain Attenuation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 26(2), 318-329. doi:10.1109/TAP.1978.1141845
- Oyie, N. O. & Afullo, T. (2018). A Comparative Study of Dual-Slope Path Loss Model in Various Indoor Environments at 14 to 22 GHz. *Progress in Electromagnetics Research Symposium*, Toyama. doi:10.23919/PIERS.2018.8597901

- Parsons, J. D. (2000). *The Mobile Radio Propagation Channel*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Paulus, R. A. (1989). *Specification for Evaporation Duct Height Calculations*. Naval Ocean Systems Center, 35. accession number: ADA213841.
- Picquenard, A. (1974). *Radio Wave Propagation*. London: The Macmillan Press Ltd.
- Rappaport, T. S. (2002). *Wireless Communications Principles and Practice*. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Ren, J., Chen, B., Zhan, g Y. & Huang, F. (2014). Maritime super Wi-Fi coverage based on TVWS. *International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering*. 1618 (1), 565-568.
- Resmî Gazete. (2012). *Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu, Kısa Mesafe Erişimli Telsiz (KET) Cihazları Hakkında Yönetmelik*. Resmî Gazete Sayı: 28408.
- Reyes-Guerrero, J. C., Bruno, M., Mariscal, L. A. & Medouri, A. (2011). Buoy-to-ship experimental measurements over sea at 5.8 GHz near urban environments. *Mediterranean Microwave Symposium*. doi:10.1109/MMS.2011.6068590
- Reyes-Guerrero, J. C. & Mariscal L. A. (2014). 5.8 GHz Propagation of Low-Height Wireless Links in Sea Port Scenario. *Electronics Letters*, 50(9), 710-712. doi: 10.1049/el.2014.0098
- Sirkova, I. (2015). Duct occurrence and characteristics for Bulgarian Black sea shore derived from ECMWF data. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 135. doi: 10.1016/j.jastp.2015.10.017
- Sun, Z., Ning, H., Tang, J., Xie, Y., Shi, P., Wang, J. & Wang, K. (2016). Anomalous propagation conditions of electromagnetic wave observed over Bosten Lake, China in July and August, 2014. *Chinese Physics B*, 25 (2). doi:10.1088/1674-1056/25/2/024101
- Trabzon DHMİ, (2018). *T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Devlet Hava Meydanları İşletmesi, Trabzon Havalimanı*. Meteorolojik veriler, Trabzon.
- Ulaby, F. T. & Long, D. G. (2014). *Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing*. United States of America: The University of Michigan Press.
- Unni, S., Raj, D., Sasidhar, K. & Rao, S. (2015). Performance measurement and analysis of long range Wi-Fi network for over-the-sea communication. *13th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt)*. doi:10.1109/WIOPT.2015.7151030
- Wang, J., Zhou, H., Li, Y. & Sun, Q. (2018). Wireless Channel Models for Maritime Communications. *IEEE Access*, 99, 1-1. doi:10.1109/ACCESS.2018.2879902

- Wang, W., Hoerack, G., Jost, T., Raulefs, R., Walter, M. & Fiebig, U. (2015). Scattering Phenomena of the Propagation Channel at 5.2 GHz on the Baltic Sea. *Deutsche Luft- und Raumfahrtkongress*.
- Wang, W., Jost, T., Raulefs, R. & Fiebig, U. (2017). Ship-to-Ship Broadband Channel Measurement at 5.2 GHz on North Sea. *European Conference on Antennas and Propagation*. doi:10.23919/EuCAP.2017.7928737
- Wang, Y., Lu, W. J. & Zhu, H. (2012). An Empirical Path-Loss Model for Wireless Channels in Indoor Short-Range Office Environment. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2012(1). doi:10.1155/2012/636349
- Yamamoto, B., Wong, A., Agcanas, P. J., Jones, K., Gaspar, D., Andrade, R. & Trimble, A. Z. (2019). Received Signal Strength Indication (RSSI) of 2.4 GHz and 5 GHz Wireless Local Area Network Systems Projected over Land and Sea for Near-Shore Maritime Robot Operations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(9), 290. doi: doi.org/10.3390/jmse7090290
- Yang, K., Roste, T., Bekkadal, F. & Husby, K. (2011). Long-Distance Propagation Measurements of Mobile Radio Channel over Sea at 2 GHz. *Vehicular Technology Conference*. doi:10.1109/VETECF.2011.6092910
- Yang, K., Molisch, A. F., Ekman, T. & Roste, T. (2013). A Deterministic Round Earth Loss Model for Open-Sea Radio Propagation. *Vehicular Technology Conference*. doi:10.1109/VTCSpring.2013.6691821
- Yang, K., Zhaou, N., Molisch, A. F., Roste, T., Eide, E., Ekman, T., Yu, J., Fang, Li. & Chen, W. (2018). Propagation measurements of mobile radio channel over sea at 5.9 GHz. *International Conference on Intelligent Transportation Systems Telecommunications*. doi:10.1109/ITST.2018.8566837
- Yilmaz, V. S., Bilgin, G., Aydin, E. & Kara, A. (2017). Design considerations for near to the ground communication system and associated Sub-GHz low profile antenna. *IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*. doi:10.1109/ICECS.2017.8292059
- Zhao, X. & Huang, S. (2010). Influence of Sea Surface Roughness on the Electromagnetic Wave Propagation in the Duct Environment. *Radioengineering Journal*, 19(4).
- Zhao, Y., Ren, J. & Chi, X. (2013). Maritime Mobile Channel Transmission Model Based on ITM. *2nd International Symposium on Computer, Communication, Control and Automation*. doi:10.2991/3ca-13.2013.93
- Zhibin, G., Liu, B., Cheng, Z., Chen, C. & Huang, L. (2020). Marine mobile wireless channel modeling based on improved spatial partitioning ray tracing. *China Communications*, 17(3), 1-11. doi:10.23919/JCC.2020.03.001
- Zöchmann, E., Guan, K. & Rupp, M. (2017). Two-Ray Models in mmWave Communications. *International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*, Sapporo. doi:10.1109/SPAWC.2017.8227681

URL-1, (2024, Eylül 17). *Beaufort Scale*: <https://www.weather.gov/pqr/beaufort> adresinden alınmıştır.



ÖZGEÇMİŞ

Ekrem Eyüboğlu, İlköğrenimini Fatih İlk Okulu'nda bitirdikten sonra ortaokul ve lise eğitimini 2000 yılında Yunus Emre Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2001-2002 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2006 yılında bu bölümden mezun oldu. 2007 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2010 yılında "TV/Radyo Vericilerinden Kaynaklanan Elektrik Alan Şiddeti Ölçmeleri ve Sonuçların Değerlendirilmesi" başlıklı yüksek lisans tezini sunmasının ardından doktora eğitimine başladı. 2007 yılından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır. İyi derece İngilizce bilmektedir.

Eyuboglu, E., Hasirci Tugcu, Z., Kuzulugil, K. & Cavdar, I. H. (2024). Modified REL-Based Piecewise Path Loss Modeling Approach for Shore-to-Ship Communication at 5.6 GHz. *Applied Sciences*, 14(22), 10324. <https://doi.org/10.3390/app142210324>