

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TÜRKİYE KIYILARINDA DENİZ SEVİYESİ DEĞİŞİMİNİN GNSS İNTERFEROMETRİK
REFLEKTOMETRİ TEKNİĞİ İLE ARAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ

Cansu BEŞEL

ŞUBAT 2023
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TÜRKİYE KIYILARINDA DENİZ SEVİYESİ DEĞİŞİMİNİN GNSS İNTERFEROMETRİK
REFLEKTOMETRİ TEKNİĞİ İLE ARAŞTIRILMASI**

Cansu BEŞEL

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"DOKTOR (HARİTA MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 23 / 01 / 2023

Tezin Savunma Tarihi : 24 / 02 / 2023

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Emine TANIR KAYIKÇI

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

“Türkiye Kıyılarında Deniz Seviyesi Değişiminin GNSS İnterferometrik Reflektometri Tekniği ile Araştırılması” başlıklı doktora tez çalışması Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği anabilim dalında hazırlanmıştır.

Tez çalışmamın yürütülmesi ve akademik gelişimimde sağladığı değerli katkılar ve her daim yolumu açtığı için saygıdeğer hocam Doç. Dr. Emine TANIR KAYIKÇI’ya en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Kıymetli yönlendirmeleri için tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Mualla YALÇINKAYA ve Prof. Dr. Abdulaziz GÜNEROĞLU’na ve değerli vakitlerini ayıran tez savunma jürisi üyeleri Prof. Dr. Haluk KONAK ve Prof. Dr. Yasemin ŞİŞMAN’a teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasında kullanılan TUDES mareograf ortak yerleşke istasyonu verileri Karadeniz Teknik Üniversitesi ve Harita Genel Müdürlüğü (HGM) arasında yürütülen “Karadeniz Kıyılarındaki Deniz Seviyesi Değişiminin GNSS-IR Tekniği ile Araştırılması” başlıklı iş birliği protokolü kapsamında sağlanmıştır. Bu kapsamda, verilerin temini konusunda destek sağlayan Albay Dr. Erdinç SEZEN ve Müh.Ütgm. İbrahim Haktan KESKİN özelinde HGM, Jeodezi Dairesi Başkanlığı değerli çalışanlarına teşekkür ederim.

Süreç içerisinde manevi desteklerini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Selma ZENGİN KAZANCI, Arş. Gör. Ahmet YAVUZDOĞAN ve Harita Mühendisi Canan HAMZAOĞLU’na, son dönemde kahve saatlerimizi beraber geçirip dertleştiğimiz Arş. Gör. Merve OCAK’a ve her türlü sorunuza çözüm bulan bölümümüz idari personellerine teşekkür ederim.

En özel teşekkürlerimden birini ise akademisyen olmayı lisans birinci sınıfta bana aşıl原因 ve bu yolda çabalamam için ilk ışığı yakan rahmetli dayıma ve dualarıyla her zaman yanımda olan canım dedeme sunuyorum. Son olarak hayatımın her anında yanımda olan, desteğini esirgemeyen, şefkatli ellerini her zaman hissettiğim ve güç aldığım, hakkını ödeyemeyeceğim canım anneme ve babama, zorlandığım anlarda destek alma ihtiyacı hissettiğim Psikolojik Danışman kardeşim Mert’e en derinden teşekkürlerimi sunuyorum.

Cansu BEŞEL
Trabzon, 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Türkiye Kıyılarında Deniz Seviyesi Değişiminin GNSS İnterferometrik Reflektometri Tekniği ile Araştırılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Emine TANIR KAYIKÇI’nın sorumluluğunda tamamladığımı, analizleri kendim 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. 24/02/2023

Cansu BEŞEL

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XVI
SEMBOLLER DİZİNİ	XVIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Motivasyon ve Problemin Tanımı	4
1.3. Çalışmanın Amacı.....	6
1.4. Literatür Taraması.....	7
1.5. Deniz Seviyesi Değişimlerinin Belirlenmesi	16
1.5.1. Deniz Seviyesi Değişimi Ölçme Teknikleri	19
1.6. Türkiye Denizlerinin Genel Yapısı.....	27
1.6.1. Türkiye Denizlerinin İklimsel Yapısı	28
1.6.2. Türkiye Denizlerinin Oşinografik ve Hidrolojik Yapısı.....	30
1.7. Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (GNSS).....	34
1.7.1. GNSS Genel Yapısı	34
1.8. GNSS Sinyal Yansıma Etkisi	40
1.8.1. Yansıyan GNSS Sinyali.....	40
1.8.2. Sinyal Polarizasyonu.....	44
1.8.3. Sinyal Yansıma Yüzeyi	46
1.9. GNSS İnterferometrik Reflektometri (GNSS-IR) Tekniği.....	49
1.9.1. GNSS-IR Genel Yapısı.....	53
1.10. GNSS-IR Uygulamaları.....	56

1.10.1.	Deniz Seviyesi Değişiminin Belirlenmesi	56
1.10.2.	Kar Kalınlığı Belirlenmesi.....	58
1.10.3.	Toprak Nemi Belirlenmesi.....	59
1.10.4.	Ekstrem Doğa Olaylarının Belirlenmesi.....	60
1.10.5.	Temel Gelgit Bileşenlerinin Elde Edilmesi	60
1.11.	Sinyal Gürültü Oranı (SNR)	62
1.11.1.	SNR Analizi.....	64
1.11.2.	SNR Gözlemlerinden Reflektör Yüksekliklerinin Belirlenmesi	66
1.11.2.1.	Lomb-Scargle Periyodogramı (LSP)	67
1.12.	GNSS-IR Verilerinin Kalite Değerlendirmesi.....	71
1.12.1.	Pik-Gürültü Oranı Testi	71
1.12.2.	K-Ortalamlar Kümeleme Algoritması	72
1.12.3.	LSP-MA Yöntemi.....	73
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	74
2.1.	Çalışma Alanı ve Veri.....	74
2.2.	GNSS Verileri Ön Hazırlıklar.....	80
2.3.	SNR Verilerinin Ön İşlemesi.....	81
2.4.	GNSS-IR Tekniği ile Deniz Seviyesi Değişiminin Belirlenmesi	96
2.5.	GNSS-IR Deniz Seviyesi Değişimi Kalite Değerlendirmesi.....	101
2.5.1.	Pik-Gürültü Oranı Testi Uygulanması.....	103
2.5.2.	K-Ortalamlar Kümeleme Algoritmasının Uygulanması	108
2.5.3.	LSP-MA Yönteminin Uygulanması	115
2.6.	Meteorolojik Parametrelerin GNSS Yansıma Sinyali Üzerindeki Etkisinin Belirlenmesi	126
2.7.	GNSS-IR Tekniği ile Gelgit Analizi.....	132
2.7.1.	Gelgit Harmonik Analizi	132
2.7.2.	Küresel Okyanus Gelgit Modelleri ile Karşılaştırma	134
3.	BULGULAR VE İRDELEME	136
3.1.	GNSS-IR Tekniği ile Deniz Seviyesi Değişiminin Belirlenmesi Bulguları	136
3.2.	GNSS-IR Deniz Seviyesi Değişimi Kalite Değerlendirmesi Bulguları.....	138
3.2.1.	Pik-Gürültü Oranı Testi Bulguları	139
3.2.2.	K-Ortalamlar Kümeleme Algoritması Bulguları	146
3.2.3.	LSP-MA Yöntemi Bulguları.....	153

3.3.	Kalite Değerlendirmesi Yöntemlerinin Karşılaştırılması	160
3.4.	Meteorolojik Parametrelerin GNSS Yansıma Sinyali Üzerindeki Etkisinin Belirlenmesi Bulguları.....	173
3.5.	GNSS-IR Tekniği ile Gelgit Analizi Bulguları.....	174
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	176
5.	KAYNAKLAR	182
ÖZGEÇMİŞ		



ÖZET

TÜRKİYE KIYILARINDA DENİZ SEVİYESİ DEĞİŞİMİNİN GNSS İNTERFEROMETRİK
REFLEKTOMETRİ TEKNİĞİ İLE ARAŞTIRILMASI

Cansu BEŞEL

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Emine TANIR KAYIKÇI
2023, 199 Sayfa

Deniz seviyesi değişiminin özellikle kıyı alanlarında çevresel, ekonomik ve sosyal açıdan önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, deniz seviyesinde meydana gelen değişimin belirlenmesi son derece önemlidir. Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri İnterferometrik Reflektometri (GNSS-IR) tekniği, yansıyan sinyalleri kullanarak deniz seviyesi değişiminin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Bu tez çalışması dört kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda, Türkiye'nin farklı denizlerinde kıyıda ve kıyıya yakın sabit GNSS istasyonlarından GNSS-IR tekniği ile deniz seviyesi değişimi belirlenmesine uygun istasyonlar tespit edilmiştir. Böylece, Karadeniz'de mareograf ortak yerleşkeli TRBZ ve SNOP, Akdeniz'de IGS ağında bulunan MERS ve Marmara'da TUSAGA-Aktif ağındaki TEKR istasyonları çalışmanın amacına uygun istasyonlar olarak belirlenmiştir. Bu istasyonlardan alınan Sinyal Gürültü Oranı (SNR) verileri kullanılarak GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi değişimleri belirlenmiştir. Ardından, GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi değişimi istasyon yakınında bulunan veya istasyona ortak yerleşkeli mareograf istasyonları kayıtları ile karşılaştırılmıştır. İkinci kısımda, GNSS-IR tekniğinin deniz seviyesi değişimi belirlemedeki performansını iyileştirmek için üç farklı yöntemle kalite değerlendirmesi yapılmıştır. Kalite değerlendirmesi yöntemleri içerisinde en iyi performans çoğunlukla LSP-MA yöntemi ile elde edilmiştir. Üçüncü kısımda, meteorolojik koşulların yansıyan GNSS sinyaline etkisi irdelenmiştir. Dördüncü kısımda ise deniz seviyesi değişiminde önemli bir parametre olan gelgit bileşenlerinin ülkemizde GNSS-IR tekniği ile belirlenebilirliği araştırılmış olup bu konuda GNSS-IR tekniğinin de bir potansiyel oluşturabileceği görülmüştür. Çalışma sonucunda, ülkemizde kıyıda ve/veya kıyıya yakın konumda bulunan sabit GNSS istasyonları kullanılarak GNSS-IR tekniği ile deniz seviyesi değişimi belirlenmesine ve tekniğin performansının iyileştirmesine yönelik özellikle ulusal/uluslararası çalışmalara önemli katkılar sağlanabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Deniz seviyesi değişimi, GNSS İnterferometrik Reflektometri, Sinyal Gürültü Oranı, Kalite değerlendirmesi, Gelgit

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF SEA LEVEL CHANGE IN TURKISH COASTS USING GNSS INTERFEROMETRIC REFLECTOMETRY TECHNIQUE

Cansu BEŞEL

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Departments of Geomatics Engineering
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Emine TANIR KAYIKÇI
2023, 199 Pages

Sea level change is well known to have environmental, economic, and social significance, especially in coastal areas. For this reason, it is extremely important to determine the sea level change. Global Navigation Satellite Systems Interferometric Reflectometry (GNSS-IR) technique enables the determination of sea level change using the reflected signals. This study consists of four parts. In the first part, suitable stations were detected from onshore and nearshore permanent GNSS stations located on different coasts of Turkey to determine sea level changes with the GNSS-IR technique. In this way, TRBZ and SNOP on the Black Sea from co-located GNSS station, MERS station on the Mediterranean coasts from IGS network, and TEKR on the Marmara from the TUSAGA-Active were determined to be suitable for the aim of the study. The sea level changes were retrieved using the signal-to-noise ratio (SNR) data of these stations by the GNSS-IR technique. The GNSS-IR-based sea level changes were then compared to sea level records from nearby tide gauges or co-located tide gauges. In the second part, quality control was performed using three different methods to improve the performance of the GNSS-IR technique in detecting sea level changes. The best performance was mostly obtained from the LSP-MA method. In the third part, the effect of the meteorological conditions was examined on the reflected GNSS signal. In the fourth part, the determination of tidal constituents, an important parameter of sea level change, was investigated with the GNSS-IR technique in our country. It is thought that GNSS-IR techniques may also have the potential to estimate tidal constituents. Consequently, it is demonstrated that significant contributions can be made to national/international studies in the determination of GNSS-IR-based sea level change using onshore and/or nearshore permanent GNSS stations in our country and improvement of the performance of the technique.

Key Words: Sea level change, GNSS Interferometric Reflectometry, Signal-to-noise ratio, Quality control, Tide

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Yeryüzünün hidrolojik döngüsü	3
Şekil 2. Uydu altimetresi ile bölgesel deniz seviyesi trendleri	18
Şekil 3. İlk mareograf istasyonu.....	20
Şekil 4. Kuyulu ve şamandıralı mareograf istasyonu, akustik sensörlü mareograf istasyonu	21
Şekil 5. Radar sensörlü mareograf istasyonu	21
Şekil 6. Türkiye’deki mareograf istasyonları.....	23
Şekil 7. Altimetre misyonları	24
Şekil 8. Uydu altimetre geometrisi.....	24
Şekil 9. Radar sinyalinin deniz yüzeyi ile etkileşimi	25
Şekil 10. Referans yüzeylerine göre yükseklikler	26
Şekil 11. Türkiye denizleri	28
Şekil 12. GPS yörünge düzlemleri ve aktif uyduları.....	36
Şekil 13. GPS uydu sinyali yapısı.....	37
Şekil 14. Galileo sinyal frekansları	39
Şekil 15. Doğrudan gelen sinyal, yansıyan sinyal ve birleşen sinyal vektör diyagramı	41
Şekil 16. Uydu, reflektör ve anten arasındaki konfigürasyonun geometrisi	42
Şekil 17. LHCP ve RHCP polarizasyonu.....	45
Şekil 18. GNSS sinyali için Fresnel katsayıları gücü	46
Şekil 19. Speküler yansıma noktası, GNSS uydusu ve alıcı arasındaki geometri	46
Şekil 20. GNSS sinyalinin Fresnel bölgesi	48
Şekil 21. Yükseklik açısının yansıma yüzeyine etkisi.	49
Şekil 22. GNSS-IR jeodezik alıcıları	50
Şekil 23. Zenit yönlü RHCP anteni ve nadir yönlü LHCP anteninden oluşan GNSS-IR geometrisi.....	51
Şekil 24. Zenit yönlü RHCP anteni anteninden oluşan GNSS-IR geometrisi	52
Şekil 25. Bi-statik radar geometrisi.....	53
Şekil 26. GNSS bi-statik radar geometrisi	54
Şekil 27. Deniz seviyesinin izlenmesinde GNSS-IR	57
Şekil 28. Literatürde GNSS-IR ile deniz seviyesi değişimi belirlenen başlıca istasyonlar	58

Şekil 29. Kar kalınlığı belirlenmesinde GNSS-IR	58
Şekil 30. Toprak neminin belirlenmesinde GNSS-IR.....	59
Şekil 31. Laura kasırgasında GPS, GLONASS ve Galileo uydularından GNSS-IR tekniği ile belirlenen su seviyesi ölçümleri.....	60
Şekil 32. Yansıyan GNSS sinyalinin geometrik gecikmesi	62
Şekil 33. Sinyal yansıma etkisi fazör diyagramı	65
Şekil 34. GNSS-IR tekniği ile reflektör yüksekliğinin belirlenmesi.....	67
Şekil 35. Trendden arındırılmış SNR verilerinin Lomb-Scargle periyodogramı.....	70
Şekil 36. Birden fazla tepe noktasına sahip Lomb-Scargle periyodogramı	70
Şekil 37. K-ortalamlar kümeleme algoritması ile sınıflandırma	72
Şekil 38. Çalışmada kullanılan istasyonlar	78
Şekil 39. Genel iş akış şeması	79
Şekil 40. MERS istasyonu örnek RINEX dosyası	80
Şekil 41. SAME istasyonu 5°-25° uydu yükseklik açısı aralığı.....	83
Şekil 42. SAME istasyonu 1°-25° uydu yükseklik açısı aralığı.....	83
Şekil 43. SNOP istasyonu 5°-25° uydu yükseklik açısı aralığı.....	84
Şekil 44. SNOP istasyonu 5°-15° uydu yükseklik açısı aralığı.....	85
Şekil 45. MERS istasyonu DoY 1, 2020 için görülebilir uydular ve azimut açıları	86
Şekil 46. Uydu yükseklik açısı ve azimut aralıklarına göre Fresnel bölgesi	87
Şekil 47. TUSAGA-Aktif ağı sabit GNSS istasyonları Fresnel bölgeleri	88
Şekil 48. MERS sabit GNSS istasyonu Fresnel Bölgesi.....	89
Şekil 49. Mareograf ortak yerleşkeli SNOP ve TRBZ sabit GNSS istasyonları Fresnel bölgeleri	90
Şekil 50. SNR ve uydu yükseklik açısı ilişkisi	91
Şekil 51. SNR ve doğrudan gelen sinyal ilişkisi	92
Şekil 52. MERS istasyonuna ait SNR salınımları	93
Şekil 53. FASA ve SLEE istasyonları SNR salınımları.....	94
Şekil 54. ANMU ve DATC istasyonları SNR salınımları	94
Şekil 55. GNSS-IR ile deniz seviyesi değişimi belirlemeye uygun istasyonlar	95
Şekil 56. GNSS-IR tekniği ile deniz seviyesi değişiminin belirlenmesi iş akış şeması.....	97
Şekil 57. Birden çok tepe noktası içeren LSP salınımları	99
Şekil 58. Tek tepe noktası içeren LSP salınımları	99

Şekil 59. Pik-Gürültü Oranı testine göre TRBZ sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen ve Trabzon mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi.....	105
Şekil 60. Pik-Gürültü Oranı testine göre SNOP sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen ve Sinop mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi.....	105
Şekil 61. Pik-Gürültü Oranı testine göre MERS sabit GNSS istasyonu GPS gözlemlerinden GNSS-IR ile tahmin edilen ve Erdemli mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi.....	106
Şekil 62. Pik-Gürültü Oranı testine göre MERS sabit GNSS istasyonu Galileo gözlemlerinden GNSS-IR ile tahmin edilen ve Erdemli mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi.....	107
Şekil 63. Pik-Gürültü Oranı testine göre TEKR sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen ve Marmara Ereğlisi mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi.....	108
Şekil 64. K-Ortalamlar Kümeleme algoritması iş akış şeması.....	109
Şekil 65. Reflektör yükseklikleri dağılımı	110
Şekil 66. K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasına göre TRBZ sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen ve Trabzon mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi.....	111
Şekil 67. K-Ortalamlar kümeleme algoritmasına göre SNOP sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen ve Sinop mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi.....	112
Şekil 68. K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasına göre MERS sabit GNSS istasyonu GPS gözlemlerinden GNSS-IR ile tahmin edilen ve Erdemli mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi.....	113
Şekil 69. K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasına göre MERS sabit GNSS istasyonu Galileo gözlemlerinden GNSS-IR ile tahmin edilen ve Erdemli mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi.....	114
Şekil 70. K-Ortalamlar kümeleme algoritmasına göre TEKR sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen ve Marmara Ereğlisi mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi.....	115
Şekil 71. LSP-MA iş akış şeması.....	116
Şekil 72. LSP-MA yöntemine göre TRBZ sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen ve Trabzon mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi	117
Şekil 73. LSP-MA yöntemine göre SNOP sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen ve Sinop mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi	118
Şekil 74. LSP-MA yöntemine göre MERS sabit GNSS istasyonu GPS gözlemlerinden	

GNSS-IR ile tahmin edilen ve Erdemli mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi.....	119
Şekil 75. LSP-MA yöntemine göre MERS sabit GNSS istasyonu Galileo gözlemlerinden GNSS-IR ile tahmin edilen ve Erdemli mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi.....	120
Şekil 76. LSP-MA yöntemine göre TEKR sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen ve Marmara Ereğlisi mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi.....	121
Şekil 77. (a) SC02 GNSS istasyonu, (b) Friday Limanı mareograf istasyonu.....	122
Şekil 78. SC02 istasyonu Fresnel bölgesi	123
Şekil 79. Pik-Gürültü Oranı testine göre SC02 sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen deniz seviyesi değişimi	124
Şekil 80. K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasına göre SC02 sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen deniz seviyesi değişimi.....	125
Şekil 81. LSP-MA göre SC02 sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen deniz seviyesi değişimi.....	126
Şekil 82. Basit Doğrusal Regresyon iş akış şeması.....	127
Şekil 83. Mann-Kendall testi iş akış şeması.....	128
Şekil 84. DSNR genliği ve hava basıncı ilişkisi	128
Şekil 85. DSNR genliği ve hava basıncı ilişkisi. (a) ilk dönem, (b) ikinci dönem	129
Şekil 86. DSNR genliği ve rüzgar hızı ilişkisi	129
Şekil 87. DSNR genliği ve sıcaklık ilişkisi.....	130
Şekil 88. TRBZ istasyonu gelgit bileşeni.....	133
Şekil 89. Pik-Gürültü Oranı testine göre TRBZ ve SNOP sabit GNSS istasyonları GNSS-IR ile tahmin edilen ve mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği.....	139
Şekil 90. Pik-Gürültü Oranı testine göre MERS sabit GNSS istasyonu GPS gözlemlerinden GNSS-IR ile tahmin edilen ve Erdemli mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi saçınım grafiği.....	141
Şekil 91. Pik-Gürültü Oranı testine göre MERS sabit GNSS istasyonu Galileo gözlemlerinden GNSS-IR ile tahmin edilen ve Erdemli mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi saçınım grafiği.....	142
Şekil 92. Pik-Gürültü Oranı testine göre TEKR sabit GNSS istasyonları GNSS-IR ile tahmin edilen ve Marmara Ereğlisi mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişim saçınım grafiği.....	143
Şekil 93. Pik-Gürültü Oranı testine göre SC02 sabit GNSS istasyonları GNSS-IR ile tahmin edilen ve Friday Limanı mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği.....	145

Şekil 94. K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasına göre TRBZ ve SNOP sabit GNSS istasyonları GNSS-IR ile tahmin edilen ve mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi.....	146
Şekil 95. K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasına göre MERS sabit GNSS istasyonu GPS gözlemlerinden GNSS-IR ile tahmin edilen ve Erdemli mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği	148
Şekil 96. K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasına göre MERS sabit GNSS istasyonu Galileo gözlemlerinden GNSS-IR ile tahmin edilen ve Erdemli mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği.....	149
Şekil 97. K-Ortalamlar kümeleme algoritmasına göre TEKR sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen ve Marmara Ereğlisi mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği.....	151
Şekil 98. K-Ortalamlar kümeleme algoritmasına göre SC02 sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen ve Friday Limanı mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği.....	152
Şekil 99. LSP-MA yöntemine göre TRBZ ve SNOP sabit GNSS istasyonları GNSS-IR ile tahmin edilen ve mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği.....	153
Şekil 100. LSP-MA yöntemine göre MERS sabit GNSS istasyonu GPS gözlemlerinden GNSS-IR ile tahmin edilen ve Erdemli mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği.....	155
Şekil 101. LSP-MA yöntemine göre MERS sabit GNSS istasyonu Galileo gözlemlerinden GNSS-IR ile tahmin edilen ve Erdemli mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği.....	156
Şekil 102. LSP-MA yöntemine göre TEKR sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen ve Marmara Ereğlisi mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği.....	157
Şekil 103. LSP-MA yöntemine göre SC02 sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen ve Friday Limanı mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği.....	157
Şekil 104. Kalite değerlendirmesi yöntemlerine göre istasyonlar bazında istasyonlar bazında korelasyon değerleri	160
Şekil 105. Kalite değerlendirmesi yöntemlerine göre istasyonlar bazında karesel ortalama hata değerleri.....	162
Şekil 106. Kalite değerlendirmesi yöntemlerine göre istasyonlar bazında eğim değerleri	164
Şekil 107. Kalite değerlendirmesi yöntemlerine göre istasyonlar bazında R^2 katsayısı ..	166

Şekil 108. GNSS-IR, mareograf ve küresel okyanus gelgit modelleri gelgit genlikleri değişimi.....	174
---	-----



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Deniz seviyesi izleme merkezleri.....	22
Tablo 2. GPS uyduları ve sinyalleri.....	36
Tablo 3. GLONASS uyduları ve sinyalleri.....	38
Tablo 4. BDS Uyduları ve sinyalleri	40
Tablo 5. Temel gelgit bileşenleri	62
Tablo 6. Çalışmada kullanılan sabit GNSS istasyonları bilgileri	75
Tablo 7. Çalışmada kullanılan sabit GNSS istasyonları donanım bilgileri	77
Tablo 8. Çalışmada kullanılan mareograf istasyonları bilgileri.....	78
Tablo 9. TUSAGA-Aktif sabit GNSS İstasyonları azimut ve uydu yükseklik açısı aralıkları	88
Tablo 10. MERS IGS istasyonu azimut ve uydu yükseklik açısı aralıkları.....	89
Tablo 11. Mareograf ortak yerleşkeli SNOP ve TRBZ sabit GNSS istasyonları azimut ve uydu yükseklik açısı aralıkları	90
Tablo 12. Çalışmada kullanılan sabit GNSS istasyonları reflektör yüksekliği aralıkları....	98
Tablo 13. MERS sabit GNSS istasyonu DoY 001, 2020 GPS uyduları reflektör yükseklikleri.....	100
Tablo 14. SC02 GNSS istasyonu ve Friday Limanı mareograf istasyonu bilgileri.....	122
Tablo 15. DSNR ve sıcaklık Mann-Kendall trend analizi.....	131
Tablo 16. DSNR ve rüzgar hızı Mann-Kendall trend analizi	131
Tablo 17. DSNR ve hava basıncı Mann-Kendall trend analizi.....	132
Tablo 18. GNSS-IR tekniği ve mareograf ile elde edilen deniz seviyesi değişimlerinden hesaplanan gelgit genlikleri, faz ve duyarlılıkları	134
Tablo 19. Çalışmada kullanılan küresel okyanus modelleri.....	134
Tablo 20. Mareograf, GNSS-IR ve küresel okyanus gelgit modelleri gelgit genlikleri....	135
Tablo 21. Deniz seviyesi değişimi boşluk oranı.....	138
Tablo 22. Mareograf ortak yerleşke istasyonlarında Pik-Gürültü Oranı testine göre GNSS-IR ve mareograf karşılaştırması	140
Tablo 23. TRBZ istasyonu dönemlere göre GNSS-IR ve mareograf karşılaştırması.....	140
Tablo 24. MERS istasyonunda Pik-Gürültü Oranı testine göre GPS ve Galileo gözlemleri için GNSS-IR ve mareograf karşılaştırması.....	142

Tablo 25. TEKR istasyonunda Pik- Gürültü Oranı testine göre GNSS-IR ve mareograf karşılaştırması	144
Tablo 26. SC02 istasyonunda Pik- Gürültü Oranı testine göre GNSS-IR ve mareograf karşılaştırması	145
Tablo 27. Mareograf ortak yerleşke istasyonlarında K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasına göre GNSS-IR ve mareograf karşılaştırması	147
Tablo 28. MERS istasyonunda K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasına göre GPS ve Galileo gözlemleri için GNSS-IR ve mareograf karşılaştırması.....	149
Tablo 29. TEKR istasyonunda K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasına göre GNSS-IR ve mareograf karşılaştırması.....	151
Tablo 30. SC02 istasyonunda K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasına göre GNSS-IR ve mareograf karşılaştırması	152
Tablo 31. Mareograf ortak yerleşke istasyonlarında LSP-MA yöntemine göre GNSS-IR ve mareograf karşılaştırması.....	154
Tablo 32. MERS istasyonunda LSP-MA yöntemine göre GPS ve Galileo gözlemleri için GNSS-IR ve mareograf karşılaştırması	156
Tablo 33. TEKR istasyonunda LSP-MA yöntemine göre GNSS-IR ve mareograf karşılaştırması	158
Tablo 34. SC02 istasyonunda LSP-MA yöntemine göre GNSS-IR ve mareograf karşılaştırması	159
Tablo 35. Kalite değerlendirmesi yöntemleri sonuçları	168
Tablo 36. SC02 istasyonunda uygulanan yöntemler ve sonuçları.....	171
Tablo 37. GNSS-IR, mareograf gelgit genlikleri ile küresel okyanus gelgit modelleri gelgit genlikleri arasındaki farklar	175

SEMBOLLER DİZİNİ

ADT	: Absolute Dynamic Topography- Mutlak Dinamik Topoğrafya
BDS	: BeiDou Navigation Satellite System
ADT	: Absolute Dynamic Topography- Mutlak Dinamik Topoğrafya
BDS	: BeiDou Navigation Satellite System
CDMA	: Code Division Multiple Access- Kod Bölmeli Çoklu Erişim
CNES	: Centre National D'Etudes Spatiales
CYGNSS	: Cyclone Global Navigation Satellite System- Siklon Küresel Konumlama Uydu Sistemi
DSNR	: Trendden Arındırılmış Sinyal Gürültü Oranı
ESA	: European Space Agency- Avrupa Uzay Ajansı
EuroGOO	: European Global Ocean Observing System- Avrupa Küresel Okyanus Gözlem Sistemi
FDMA	: Frequency Division Multiply Access- Frekans Bölmeli Çoklu Erişim
FFZ	: First Fresnel Zone- Birinci Fresnel Bölgesi
Galileo	: European Global Navigation Satellite System- Avrupa Küresel Navigasyon Uydu Sistemi
GEO	: Geostationary Earth Orbit-Yer Sabit Yörünge
GLONASS	: Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GLOSS	: Global Sea Level Observing System- Küresel Deniz Seviyesi Gözlem Sistemi
GNSS	: Global Navigation Satellite Systems-Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri
GNSS-IR	: Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri İnterferometrik Reflektometri
GPS	: Global Positioning System-Küresel Konumlama Sistemi
IGS	: International GNSS Service- Uluslararası GNSS Servisi
IGSO	: Inclined Geosynchronous Orbit- Eğimli Yer Senkronize Yörünge
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change
IOC	: UNESCO Intergovernmental Oceanographic Commission- UNESCO Hükümetlerarası Oşinografik Komisyon

ITRF	: International Terrestrial Reference System -Uluslararası Yersel Referans Ağı
KOH	: Karesel Ortalama Hata
LHCP	: Left Hand Circularly Polarised- Sol El Dairesel Polarizasyonlu
LOS	: Line-of-Sight- Açık Görüş Hattı
LSP	: Lomb-Scargle Periyodogramı
MA	: Moving Average- Hareketli Ortalama
MEO	: Medium Earth Orbit- Orta Uzaklıklı Yörünge
MDT	: Mean Dynamic Topography- Ortalama Dinamik Topoğrafya
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
NOAA	: National Oceanic and Atmospheric Administration
UK-DMC	: UK Disaster Monitoring Constellation- Birleşik Krallık Afet İzleme Uydusu
PARIS	: Passive Reflectometry and Interferometry System- Pasif Reflektometri ve İnterferometri Sistemi
PRN	: Pseudo Random Noise
PSMSL	: Permanent Service for Mean Sea Level- Ortalama Deniz Seviyesi Sürekli Servisi
QZSS	: Quasi-Zenith Satellite System
RHCP	: Right Hand Circularly Polarised- Sağ El Dairesel Polarizasyonlu
RINEX	: Receiver INdependent Exchange Format- Alıcıdan Bağımsız Değişim Formatı
SLA	: Sea Level Anomaly-Deniz Seviyesi Anomalisi
SNR	: Signal to Noise Ratio- Sinyal Gürültü Oranı
SONEL	: Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales
SSH	: Sea Surface Height-Deniz Yüzeyi Yüksekliği
TUDES	: Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi
TUDKA	: Türkiye Ulusal Düşey Kontrol Ağı
VLM	: Vertical Land Motion-Düşey Yer Kabuğu Hareketi
θ	: Uydu Yükseklik Açısı
φ	: Faz Ofseti
A	: Genlik
h	: Reflektör Yüksekliği

λ	: GNSS Taşıyıcı Dalgaboyu
f	: Frekans
f_{L1}	: L1 frekansı
f_{L2}	: L2 frekansı
k	: Kanal Numarası
A_D	: Doğrudan Gelen Sinyal
A_R	: Yansıyan Sinyal
Φ_B	: Faz Hatası
$\Delta\Phi_R$	: Doğrudan Gelen Sinyalle Yansıyan Sinyal Arasındaki Faz Farkı
az^S	: Azimut Açısı
δ	: Yol Gecikmesi
Γ_H	: Yatay Polarizasyon İçin Fresnel Yansıma Katsayısı
Γ_V	: Dikey Polarizasyon İçin Fresnel Yansıma Katsayısı
η	: Kompleks Dielektrik Sabiti
σ	: Yansıtıcı Ortam İletkenliği
Γ_O	: Eş Polarizasyonlu Dairesel Yansıma Katsayısı
Γ_X	: Çapraz Polarizasyonlu Dairesel Yansıma Katsayısı
S	: Speküler Yansıma Noktası
a	: Fresnel Bölgesinin Büyük Yarı Ekseni
b	: Fresnel Bölgesinin Küçük Yarı Ekseni
G_T	: Verici Anten Kazanımı
G_r	: Alıcı Anten Kazanımı
p_{pq}^{coh}	: Eş Fazlı Bileşen
p_{pq}^{incoh}	: Eş Fazlı Olmayan Bileşen
H_0	: Ortalama Deniz Seviyesi
α	: Başlangıç Faz Açısı
β	: Başlangıç Faz Açısı
τ	: Geometrik Gecikme
P_d	: Doğrudan Gelen Sinyalin Gücü
P_r	: Yansıyan Sinyalin Gücü
B	: Gürültü Bant Genişliği
C/N_0	: Taşıyıcı-Gürültü Yoğunluk Oranı
A_c	: Girişim Yapan Sinyalin Genliği

ψ	: Faz Farkı
ofac	: Aşırı Örneklem Faktörü
hifac	: En Yüksek Frekans Faktörü
$r_{GNSSIRmar}$	: Pearson Korelasyon Katsayısı



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

İklim geniş bir bölgede uzun yıllar boyunca değişmeyen ortalama hava koşulları olarak tanımlanmaktadır. Aynı zamanda iklim yeryüzündeki tüm canlılar, atmosfer, kara ve su yüzeyleri ile ilişkili ve oldukça karmaşık yapıda bir sistemdir (MGM, 2015). Yerküre'nin jeolojik başlangıcından itibaren alansal ve zamana bağlı olarak değişme eğilimi göstermektedir (Türkeş, 2010, 2013). İklimdeki bu değişime hem kendi iç dinamikleri hem de dış etmenlerdeki değişiklikler etki etmektedir. İklimi değiştiren üç temel faktörden söz edilmektedir. Bu faktörler; gelen güneş radyasyonundaki değişiklikler, yansıtılan güneş radyasyonundaki değişiklikler, yerküreden uzaya geri dönen uzun dalga radyasyonundaki değişiklikler şeklindedir (MGM, 2015). İklim sistemi, doğal olaylara göre şekillenmekte olup zamanla sistem içerisine insan kaynaklı etkiler de eklenmiştir. Fosil yakıt kullanımının başlaması, arazi kullanımındaki değişiklikler ve ormansızlaşma gibi faaliyetler sonucu atmosferde bulunan sera gazının artması insan faaliyetleri sonucu meydana gelen etki olarak gösterilmektedir. Sera gazının artması ile yeryüzündeki sıcaklıklar yükselmekte ve iklimde değişiklikler oluşmaktadır. İklim değişikliği günümüzün en önemli çevre sorunlarından biridir ve ikliminin doğal salınımının dışında meydana gelmektedir (Demircan, 2022). Yeryüzündeki tüm canlılar bu değişimden çoktan etkilenmeye başlamıştır. İklim değişikliği sadece artan ortalama sıcaklık değildir, aynı zamanda deniz seviyesinin yükselmesi, ekstrem doğa olayları, değişen ekosistemler ve vahşi yaşam alanlarının hepsi değişen iklimin belirtileridir. Ülkemizde de iklim değişikliğinin etkileri yaşanmaktadır. İklim değişikliğinin ülkemiz açısından etkileri özetle aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

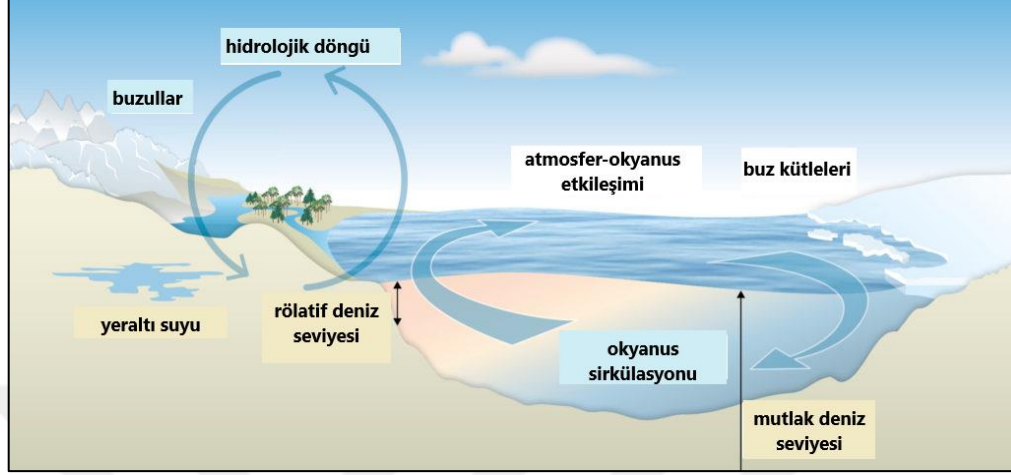
- Fırtına, şiddetli yağış, sel, sıcak hava dalgaları gibi afetlerin sayılarında artış görülmektedir. 2021 yılında ülkemizde görülen kuraklık ve yine aynı yıl Batı Karadeniz sel felaketi bu durumu destekler niteliktedir.
- “Meteoroloji Genel Müdürlüğü 2021 Yılı İklim Değerlendirmesi” raporuna göre 2021 yılı Türkiye sıcaklık ortalaması 14.9°C olarak gerçekleşmiş olup bu değer 1981-2010 sıcaklık ortalaması olan 13.5°C'nin üzerindedir (URL-1, 2022).

- Ekstrem olayların sayısına bakıldığında ise 1024 olay ile en fazla ekstrem olay yaşanan yıl 2021 olmuştur. Özellikle son yirmi yılda ekstrem olay trendleri artış eğilimindedir (URL-1, 2022).
- Yaşanan afetlerin yol açtığı zararların maliyetlerinde artış vardır.

İklim değişikliği beraberinde getirdiği sonuçlarla ülkeler için bir kalkınma problemi haline gelmiştir. Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları Değerlendirme Raporu 2019'da İklim Değişikliği ve Etkileri ile Mücadele İçin Acilen Eyleme Geçmek başlığı altında belirlenen ve ülkemiz için geçerli olan üç temel hedef bulunmaktadır. Bu hedefler özetle; (1) iklim değişikliği sonucu ortaya çıkabilecek tehlikeler ve doğal afetlere yönelik dayanıklılık ve uyum kapasitesinin güçlendirilmesi, (2) iklim değişikliğine karşı alınacak önlemlerinin ulusal politika, strateji ve planlama süreçlerine dahil edilmesi, (3) iklim değişikliğinin önlenmesi, iklim değişikliğine bağlı etkilerin azaltılması, uyum sağlama ve erken uyarı gibi konularda eğitim, farkındalık oluşturulması, hem bireysel hem de kurumsal kapasitenin geliştirilmesi şeklindedir (URL-2, 2022). Bu açıdan, ülkemizde iklim değişikliğini anlama, iklim değişikliği etkilerinin gözlemlenmesi, iklim değişikliği etkilerini azaltma, iklim değişikliğine uyum gibi konularda bilinç oluşturulmasına yönelik farklı disiplinlerce yapılan çalışmalarla sağlanan katkıların hem ulusal hem uluslararası anlamda değerli olduğu düşünülmektedir.

İklim değişikliğinin etkisiyle atmosfer ve okyanuslar ısınmaktadır. Bunun sonucunda kar ve buz kütleleri zarar görmekte, rüzgar frekansları değişmektedir. Buzullarda meydana gelen erime ile okyanus ve deniz suyu seviyelerinde yükselme yaşanmaktadır. Bunların yanında küresel ısınmanın diğer etkileri de (deniz suyunun ısı genleşmesi, atmosferik değişimler ve okyanus sirkülasyonu gibi) deniz seviyesini etkilemeyi sürdürecektir. Dünya'nın iklimi hidrolojik döngü tarafından belirlenmektedir ve aynı zamanda hidrolojik döngü hava olaylarından da sorumludur. Su, buharlaşma ile okyanuslardan atmosfere ulaşmakta olup buradan yağışlar ile yeryüzüne iletilmektedir. Su buharı, yağmur gibi yoğunlaştığında buharda depolanan gizli ısı serbest kalmakta ve havayı ısıtıp atmosferik dolaşıma neden olmaktadır (Şekil 1). Kara ve denizlerdeki sıcaklık artışı ile meteorolojik kaynaklı afet sayısı artmakta olup tekrar sürelerinde azalma meydana gelmektedir. Üstelik meteorolojik afetler denizlerde biriken enerji sebebiyle kıyılarda daha şiddetli olup zararlara yol açmaktadır (Demircan, 2022). Hidrolojik süreçler zamanla değişebilmektedir ve bu zamansal değişiklik kendisini küresel deniz seviyesi değişiklikleri olarak gösterebilmektedir. İklim değişikliğinin en önemli sonuçlarından biri olan yükselen deniz

seviyesi, özellikle kıyı alanlarındaki ekosistem ve yaşanabilirliği değiştirme potansiyeline sahip olduğundan her zaman önemli bir yere sahiptir.



Şekil 1. Yeryüzünün hidrolojik döngüsü (IPCC, 2013)

Küresel ısınma sonucu küresel ortalama deniz seviyesinin yükselmesinde iki faktör etkilidir. Birincisi dünyadaki buzulların erimesi ile suyun okyanusa akması iken ikincisi suyun ısınması ile okyanus hacminin genişlemesidir. Bunların yanında deniz seviyesinin yükselmesine daha az katkıda bulunan üçüncü faktör; toprak nemi, göller ve nehirler olmak üzere karadaki su miktarının azalmasıdır (URL-3, 2022). Günümüzde küresel ve bölgesel deniz seviyesi değişiminin ve unsurlarının (okyanus termal genişmesi, buz tabakası kaybı, buz kütle değişimi vd.) doğru değerlendirilmesi oldukça kıymetlidir.

Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) uydularından gelen sinyaller küresel çapta farklı yüzeylerin uzaktan algılanması için güçlü bir seçenektir. Temelde, GNSS sinyalinin uydudan doğrudan yeryüzündeki GNSS alıcısına ulaşması istenir, ancak bazen sinyal antene ulaşmadan önce bir veya birden çok yüzeyden yansımaktadır. Bu yansıma, sinyal yansıma etkisi olarak adlandırılmakta olup konumlama uygulamaları için büyük hata kaynaklarından biri olarak gösterilmektedir (Georgiadou ve Kleusberg, 1988). Diğer yandan, bu yansıma etkisi GNSS İnterferometrik Reflektometri (GNSS Interferometric Reflectometry, GNSS-IR) tekniği ile kullanılarak yeryüzüne dair faydalı bilgiler elde etmeye olanak sağlamaktadır. GNSS-IR tekniği, uygulama alanına göre bir GNSS anteninin çevresindeki özellikleri çıkarmak için sinyal yansıma etkisinin kullanılması ilkesine dayanmaktadır. GNSS anten ve alıcıları yüzeyin uzaktan algılanması

için oldukça uygundur. Birçok araştırmacı farklı yüzeylerin yansımalarına ilişkin çalışmalar gerçekleştirmektedir. Yaklaşık son yirmi yılda GNSS-IR tekniği ile deniz seviyesi, toprak nemi, kar/buz kalınlığı gibi çeşitli parametrelerin izlemesine hızla artan bir ilgi olmuştur.

1.2. Motivasyon ve Problemin Tanımı

Geleneksel olarak jeodezi; üç boyutlu ve zaman değişkenli uzayda, çekim alanı ile yeryuvarının ve öteki gök cisimlerinin ölçülmesi için üç boyutlu koordinat sistemlerinin tanımlanması, jeodezik ağların tasarlanması ve ölçülmesi ile uğraşan bilim dalı olarak tanımlanabilir. Günümüzde jeodezi bilimi, geleneksel jeodezik uygulamaların yanında, geniş bir alanda, modern jeodezik faaliyetleri kapsamaktadır. Bu anlamda jeodezi; konumsal ve zamansal ölçekte, farklı ölçüm sistemlerini ve gelişmiş analiz tekniklerini kullanarak yeryüzündeki değişimin izlenmesinde önemli rol oynamaktadır (Müller ve Pail, 2022). Bu açıdan deniz seviyesi değişimi, iklim değişikliği çalışmalarının yanı sıra çevresel, sosyal ve ekonomik alanda pek çok uygulamaya katkı sağlayan bir bilim dalı olan jeodezinin de temel ilgi alanlarından biridir. Jeodezide referans yüzey olarak alınan jeoid, okyanus yüzeyi ile en fazla örtüşen yüzey olarak kabul edilmektedir. Su yüzeyinde okyanus akıntıları veya atmosferik kuvvetler olmasaydı okyanus yüzeyi tam olarak jeoid ile çakışık olurdu (Douglas, 2001). Geleneksel jeodezik yaklaşıma göre, uzun dönemli ortalama deniz seviyesinin değişmediği varsayılmış ve düşey kontrol ağlarının datumu olarak kullanılmıştır. Ancak ilerleyen zamanlarda küresel okyanus ve deniz seviyesindeki gözlemlenen yüksek artış hızları, deniz seviyesinin düşünüldüğü gibi değişmeyen bir yüzey olmadığını göstermiştir. Bu anlamda, jeodezik düşey datum tanımlanması ve jeoidin belirlenmesi açısından deniz seviyesinde meydana gelen değişimlerinin belirlenmesi ve yorumlanması büyük önem taşımaktadır. Diğer yandan jeodezi ve deniz seviyesi değişimi ilişkisi yalnızca bu bakımdan değil, aynı zamanda jeodezik yöntem ve tekniklerin deniz seviyesi değişiminin belirlenmesine katkı sağlaması açısından da kıymetlidir. Deniz seviyesi değişimi temelde geleneksel mareograf ve uydu altimetre yöntemleri kullanılarak belirlenmektedir. Fakat Bölüm 1.5.1’de detaylı olarak açıklandığı üzere her iki yöntemin de bazı eksik yanları bulunmaktadır. Hızla ilerleyen GNSS teknolojisi, deniz seviyesi gibi yüzey değişikliklerini izlemek için GNSS-IR tekniğinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu sayede GNSS-IR tekniği deniz seviyesi değişiminin belirlenmesine yeni bir yön kazandırmıştır. Bilim dünyasında sağladığı avantajlar dolayısıyla tekniğin bölgesel/küresel kullanımına,

geliştirilmesi ve iyileştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Tekniğin detayları Bölüm 1.9’da anlatılmıştır. Buradan hareketle, deniz seviyesinin hem jeodezik çalışmalarda önemli oluşu hem de jeodezik tekniklerin deniz seviyesi değişiminin belirlenmesine katkı sağlaması bu doktora tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde temel motivasyon unsuru olmuştur. Ülkemizde yapılan deniz seviyesi değişimi çalışmaları, mareograf ve uydu altimetre gözlemlerinden yararlanarak gerçekleştirilmektedir. Bu tez çalışması sürecinde üretilen araştırma makaleleri (Beşel ve Kayıkçı, 2021; Beşel ve Tanır Kayıkçı, 2022) ile Türkiye’de ilk kez kıyılarımızda bulunan GNSS istasyonlarının GNSS-IR tekniği ile deniz seviyesi değişiminin belirlenmesine katkısı ve elverişli bulunan GNSS istasyonları ile deniz seviyesi değişiminin belirlenmesi gerçekleştirilmiştir.

GNSS-IR tekniği, yeryüzünün çevresel incelenmesinde elbette önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Fakat halen çözülmesi gereken bazı problemler vardır. Sinyal Gürültü Oranı (Signal-to-noise ratio, SNR) yöntemine dayalı GNSS-IR ile deniz seviyesi değişiminin belirlenmesinde temelde Lomb-Scargle periyodogramı (LSP) kullanılmaktadır ve araştırmacılar elde edilen sonuçların doğruluk ve güvenilirliğini geliştirmeye odaklanmıştır. Bunun için LSP yöntemine alternatif olarak B-spline yöntemi (Strandberg vd., 2016), Deneysel Mod Ayırıştırma (Empirical Mode Decomposition, EMD yöntemi) (S. Zhang vd., 2019), Kalman filtreleme (Strandberg vd., 2019), dalgacık analizi (Wang vd., 2018) gibi farklı yöntemler denenmektedir. Bunların yanı sıra, verilerin işlenmesinde doğruluk, duyarlık ve güvenilirlik analizleri ile kalite değerlendirmesi yapılması önemlidir. Veri işleme sırasında parametre kontrolü veya veri işlemeden sonra gürültünün filtrelenmesi sonuçların doğruluğunu ve etkinliğini önemli ölçüde iyileştirebilmektedir. Bu anlamda, uluslararası literatürde GNSS-IR tekniğine dayalı uygulamaların geliştirilmesi, elde edilen sonuçların doğruluğunun araştırılması ve iyileştirilmesine yönelik araştırmalara rastlanmaktadır. Bu doktora tez çalışmasının bir diğer motive edici unsuru, kalite değerlendirmesi ile GNSS-IR performansının geliştirilmesi olmuştur. Bu anlamda, literatürde sıklıkla kullanılan kalite değerlendirmesi yönteminin yanında bu tez çalışması kapsamında geliştirilen, LSP ve Hareketli Ortalamalar (Moving Average, MA) yöntemlerinin kombinasyonu olan LSP-MA yönteminin ve daha önce GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi değişiminin belirlenmesinde kullanımına rastlanılmayan K-Ortalamalar Kümeleme algoritmasının GNSS-IR tekniğinin performansının iyileştirilmesine katkısı incelenmiştir. Çalışma kapsamındaki analizler KTÜ Mühendislik Fakültesi tarafından sağlanan güncel MATLAB lisansı ile MATLAB ortamında yazılan kodlarla yapılmıştır.

1.3. Çalışmanın Amacı

Türkiye, üç tarafı denizlerle çevrili olan bir ülkedir ve bu anlamda zaman içerisinde deniz seviyesinde meydana gelen değişim ve bu değişimin belirlenmesine yönelik çalışmaların oldukça önemli olduğu düşünülmektedir. Bu çalışma, GNSS-IR tekniği ile ülkemiz kıyılarında (1) deniz seviyesi değişiminin belirlenmesi, (2) gelgit bileşenlerinin hesaplanması, (3) GNSS yansıma sinyalleri üzerindeki meteorolojik bazı etkilerin incelenmesi ve (4) GNSS-IR tekniğine dayalı sonuçlarının iyileştirilmesine yönelik kullanılan yöntemlerle hem ulusal hem de uluslararası alanda çalışmalara katkı sağlamak üzere gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda tez çalışmasının başlıca amaçları;

- Ülkemizde kıyıda ve/veya kıyıya yakın sabit GNSS istasyonlarının tespiti ve tespit edilen istasyonların GNSS-IR tekniğine dayalı olarak deniz seviyesi değişimi belirlenmesine elverişli olup olmadığının araştırılması,
- GNSS-IR ile deniz seviyesi değişimi belirlenmesine elverişli sabit GNSS istasyonlarında GNSS-IR analizi için en uygun azimut ve uydu yükseklik açısı aralıklarının belirlenmesi,
- Ülkemizde GNSS-IR tekniği ile deniz seviyesi değişiminin belirlenmesi ve böylece ülkemizde yapılan deniz seviyesi değişimi çalışmalarına yeni bir yön kazandırılması,
- GNSS-IR deniz seviyesi değişimi kestirim doğruluğunu iyileştirmeye yönelik mevcut yöntemlerin yanında yeni yöntemlerin denenmesi ve geliştirilmesi ile kalite değerlendirmesinin yapılması,
- Deniz seviyesi değişiminde önemli bir parametre olan gelgit etkisi için ülkemizde GNSS-IR tekniğinin gelgit bileşenlerinin belirlenmesine katkısının araştırılması,
- Deniz yüzeyindeki pürüzlülüğün etkilenebilen GNSS yansıma sinyalleri üzerinde pürüzlülüğe neden olabilecek bazı meteorolojik parametrelerin incelenmesi,
- GNSS-IR ile deniz seviyesi değişiminin belirlenmesine yönelik uluslararası literatüre ülkemizden de katkı sağlanması

şeklinde sıralanabilir. Her bir amaca ilişkin yapılan çalışmalar ilerleyen bölümlerde verilmiştir.

1.4. Literatür Taraması

GNSS sinyalleri kullanılarak deniz seviyesi ölçümlerinin yapılması başlangıçta bir şamandıra üzerine GNSS anteni ve alıcısının kurulması ve sürekli olarak konumunun ölçülmesi esasına dayanmaktaydı. Hein vd., (1990), European Remote Sensing (ERS-1) radar altimetre uydusunun kalibrasyonu için bir şamandıra üzerine yerleştirmiş olduğu Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System, GPS) alıcısı ile dalga yüksekliği ve şamandıranın okyanus akıntıları ile hareketini tahmin etmiştir. Günümüzde halen GNSS şamandıraları; deniz seviyesi izleme, tsunami belirleme, uyarı sistemleri ve uydu altimetre kalibrasyonu gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Kuo vd., 2012; Zhou vd., 2020; Kato vd., 2022). Herhangi bir ek araca gerek kalmadan, serbestçe GNSS sinyalleri kullanılarak deniz seviyesinin uzaktan algılanması ilk olarak 1993 yılında başlamıştır (Martin-Neira, 1993). Bu çalışmanın ana fikri; deniz seviyesi altimetresi için hem doğrudan gelen GNSS sinyallerini alan hem de deniz yüzeyinden yansıyan sinyalleri alan alçak Dünya yörüngesinde uzay kaynaklı bir sistemin geliştirilmesidir. Bu sayede GNSS Reflektometri (GNSS Reflectometry, GNSS-R) tekniğinin temelleri atılmıştır. Zaman içerisinde, yansıyan sinyallerin çeşitli hava platform araçları ile alınmasıyla GNSS-R tekniği gelişmiştir. Komjathy vd., (1998), hava aracından (aircraft) alınan GPS yansıyan sinyalleri ile rüzgar hızının belirlenmesinin olabirliğini araştırmıştır. Ardından 2000 yılında yine hava aracı ile deniz buzu bilgisi sağlanmıştır (Komjathy vd., 2000). Lowe vd., (2002), GPS ile yüksek doğrulukta okyanus altimetresi için hava aracından alınan yansıyan sinyalleri kullanmıştır. Yersel tabanlı GPS ölçümleri ise ilk kez Anderson, (2000)'de okyanus üzerinde doğrudan gelen ve yansıyan GPS sinyalleri arasındaki SNR girişim desenlerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. GNSS tabanlı mareograf ise ilk kez Larson, Löfgren, vd., (2013) tarafından tek bir alıcıdan alınan SNR gözlemlerine dayalı olarak bağıl deniz seviyesi değişimini belirlemek için sunulmuştur. GNSS sisteminin sürekli iyileştirilmesi, yansıyan GNSS sinyallerini kullanan yeni bir uzaktan algılama teknolojisi görevi gören GNSS-R tekniğinin ortaya çıkmasına neden olmuştur ve yersel ve uzay tabanlı olmak üzere birçok uygulama alanında kullanımına başlanılmıştır. Yersel tabanlı uygulamalarda tek jeodezik alıcı kullanıldığında doğrudan gelen sinyal ile yansıyan sinyal bu alıcıda birleştiği için zamanla GNSS-IR kavramı oluşmuştur. Zaman içerisinde GNSS-IR tekniğinden yararlanarak deniz seviyesi değişiminin belirlenmesi konusunda etkin bir çalışma alanı oluşmuştur. Birçok bilim insanı tarafından SNR verilerinden yararlanarak GNSS-IR tabanlı deniz seviyesi

değişiminin belirlendiği ve elde edilen sonuçların mareograf kayıtları ile karşılaştırıldığı farklı çalışmalar yapılmıştır (Larson, Ray, vd., 2013; Larson vd., 2017; Löfgren, 2014; Puente ve Valdés, 2019; Roussel vd., 2015; Santamaría-Gómez ve Watson, 2017; Santamaría-Gómez vd., 2015; Zheng vd., 2021). Literatürde yersel tabanlı GNSS-IR çalışmaları SNR veya faz gecikmesi analizlerine dayalı olarak gerçekleştirilmektedir. Her iki yöntemin avantaj ve dezavantajları Bölüm 1.9'da açıklanmıştır.

Bu bölümde (1) GNSS-IR tekniğinin geliştirilmesi, (2) GNSS-IR tekniğinin iyileştirilmesi, (3) GNSS-IR tekniğinin deniz seviyesi izleme uygulamaları haricindeki kullanım alanları, (4) Türkiye'de GNSS-IR uygulamaları konularında olmak üzere toplam 4 alt bölümde literatür özeti sunulmuştur.

(1) GNSS-IR tekniğinin geliştirilmesi: Bu bölümde literatürde SNR ve faz gecikmesi analizlerine dayanarak yapılmış olan GNSS-IR tabanlı deniz seviyesi değişiminin belirlendiği bazı çalışmalar sunulmuştur;

Löfgren vd., (2009), Onsola Uzay Gözlem Evi (İsveç)'nde bulunan test alanına 2008 yılında kurulmuş olan çift jeodezik alıcılı GNSS istasyonundan alınan 40 saatlik denizden yansıyan GNSS sinyallerini kullanmıştır. Çalışmada, faz gecikmesi analizi kullanılarak deniz seviyesi değişimi belirlenmiş ve sonuçlar ortak yerleşkeli mareograf istasyonundan elde edilen deniz seviyesi kayıtları ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda mareograf kayıtlarından elde edilen deniz seviyesi gözlemlerinin GNSS tabanlı elde edilen deniz seviyesi gözlemlerinden daha iyi olduğu değerlendirilmiş ve buna göre GNSS tabanlı elde edilen deniz seviyesi gözlemlerindeki olası sistematik etkilerin daha fazla araştırılması gerektiği sonucuna varmıştır. Daha sonra Löfgren vd., (2011), aynı GNSS istasyonda 100'den daha fazla veri toplayarak deniz seviyesi değişimini belirlemiş ve elde edilen bu verilerinin mareograf istasyonundan elde edilen deniz seviyesi değişim verileriyle 0.96 düzeyinde yüksek bir korelasyona sahip olduğunu göstermiştir.

Löfgren vd., (2014), farklı bölgelerde konumlandırılmış beş adet GPS istasyonundan alınan SNR verileri ile deniz seviyesi değişimini hesaplamıştır. İstasyonların bulunduğu konumun, uydu yükseklik açısı, azimut aralıkları ve alıcı anteni ile yansıtıcı yüzey arasındaki düşey mesafenin GNSS-IR tekniği üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. GNSS dayalı deniz seviyesi ile mareograf arasında 0.89 ila 0.99 arasında değişen değerlerde çok yüksek korelasyonlar olduğu görülmüştür.

Larson vd., (2013), Friday limanı ve Onsola Uzay Gözlem Evi'nde bulunan iki GPS istasyonundan alınan üç aylık SNR verileri ve ortak yerleşkeli mareograf istasyonları

kayıtlarını kullanarak deniz seviyesi değişimini elde etmiştir. GPS SNR gözlemlerinden ve ortak yerleşkeli mareograf istasyonundan elde edilen deniz seviyesi değişimi farklarının Karesel Ortalama Hata (KOH)'sı Onsala Uzay Gözlem Evi istasyonunda yaklaşık ± 5 cm iken, Friday limanında yaklaşık ± 10 cm olarak bulunmuştur.

Santamaría-Gómez vd., (2015), sekiz adet GPS istasyonuna ait hem L1 hem de L2 sinyallerinden alınan SNR verilerini kullanarak deniz seviyesi değişimi belirlemiştir. Elde edilen sonuçları mareograf verileri ile karşılaştırmış, her iki teknikle elde edilen deniz seviyesi değişimlerinin mutlak farklarını dört istasyonda 3 cm ve altında bulmuştur. Çalışma sonucunda ayrıca GPS veri kayıt aralığının 1 sn veya 30 sn olarak alınmasının sonuçları önemli ölçüde etkilemediği görülmüştür.

Tabibi vd., (2021), Haiti'de bulunan Commercial Off-The-Shelf (COST) GNSS istasyonundan alınan SNR verilerinden ITRF2014 datumunda deniz seviyesi kestirimi yapmıştır. GNSS-IR deniz seviyesi gözlemlerini OTT Radar Seviye Sensörü (Radar Level Sensor, RLS) ile karşılaştırmış, iki teknikten elde edilen deniz seviyesi değişim farklarının KOH'sı ± 3.43 cm, iki teknikten elde edilen deniz seviyesi değişimleri arasındaki korelasyon ise 0.96 olarak bulunmuştur.

Yukarıda sunulan literatür özetinden de anlaşıldığı üzere GNSS-IR konusunda yapılan ilk çalışmalar çoğunlukla GPS sinyallerinden yararlanılması esasına dayanmaktaydı. Fakat zaman içerisinde GLONASS (Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) (Roussel vd., 2015; Tabibi vd., 2017), Galileo (Wang, He, vd., 2019), ve BDS (Beidou Navigation Satellite System) (Jin vd., 2017; Yang vd., 2019) gibi diğer GNSS sistemleri ve QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) (Ansari vd., 2022) gibi bölgesel sistemler de benzer çalışmalarda kullanılmıştır. Löfgren ve Haas (2014), GPS ve GLONASS sinyallerini kullanarak L1 ve L2 frekanslarında hem SNR hem de faz gecikmesi analizleri ile deniz seviyesi belirlemiştir. Elde ettiği deniz seviyesi değişimlerini ortak yerleşkeli mareograf istasyonu ile karşılaştırması sonucunda, her iki sistem ve frekans bandında 0.86 ila 0.97 arasında yüksek korelasyon bulmuştur. Son zamanlarda ise çoklu GNSS'in geliştirilmesi yersel tabanlı GNSS-IR araştırmacılarını çoklu GNSS kombinasyonlarına yöneltmiştir (Chen vd., 2019; Roussel vd., 2015; Zheng vd., 2021). Wang vd., (2019) BRST istasyonunda deniz seviyesi değişimini tahmin etmek için dört GNSS sistemini içeren çoklu GNSS kombinasyon algoritması kullanarak tek bir sisteme dayalı deniz seviyesi kestirimlerine göre doğruluğun yaklaşık %40 ila %75 oranında geliştiğini göstermiştir.

(2) GNSS-IR tekniğinin iyileştirilmesi: Geçen zaman içinde GNSS-IR tekniğinin performansının geliştirilmesine yönelik birçok çalışma da yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Bu bölümde GNSS-IR tekniğinin performansının iyileştirilmesine yönelik yapılmış bazı uygulama ve araştırmalar sunulmuştur;

Larson, Ray, vd., (2013)'de, PBAY istasyonunda GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi gözlemlerine pik-gürültü-oranı testi uygulayarak bir kalite kontrolü yapılmış ve üç eşik değerinden küçük olan yansımaları anlamsız kabul ederek analize dahil etmemiştir.

Strandberg vd., (2016), tek jeodezik alıcıdan alınan SNR verilerinin B-spline ile eğri uydurmaya dayanan ters modelleme ile GNSS-IR deniz seviyesi değişimi belirleme performansının artırılmasını amaçlamıştır. Sonuç olarak Onsola (İsveç) istasyonunda 1.4 cm ve Spring Bay'da ise 3.1 cm standart sapma ile geliştirilen yöntemin deniz seviyesi kestirim doğruluğunun artırdığı görülmüştür.

Santamaría-Gómez ve Watson (2017), SNR verilerine genişletilmiş Kalman filtresi algoritması uygulamıştır. Bu yeni yaklaşımla uydu yükseklik açısına göre SNR salınımlarındaki küçük ama önemli değişikliklerin tahmin edilmesi sağlanmış olup aynı zamanda yaklaşık 3 cm KOH elde etmiştir. Strandberg vd., (2019) tarafından yapılan çalışmada da kokusuz Kalman filtre ve ters modelleme yaklaşımı kullanılarak İsveç'te bulunan GTGU ve Avustralya'da bulunan SBPY istasyonlarında gerçek zamanlı deniz seviyesi tahmin edilmiştir. Çalışma sonucunda GTGU istasyonunda Kalman filtre yaklaşımının deniz buzu varlığını önceki yöntemler ve geleneksel uzaktan algılama tekniklerine göre daha yüksek zamansal çözünürlükte belirlediği gösterilmiştir.

Wang vd., (2018), GNSS istasyonundan alınan SNR verilerine önce dalgalık ayrışımı uygulayıp ardından LSP yöntemini uygulamıştır. Sonuç olarak önerilen yöntemin kısa periyotlu SNR verileri için daha uygun bulunmuştur.

Song vd., (2019), periyodogramın kalite kontrolüne yönelik bir araştırma olup, rehber dayalı kalite kontrol stratejisi ile analiz performansının geliştiğini göstermiştir.

Lee vd., (2019), Tayvan'daki üç GNSS istasyonundan alınan GPS L1 sinyaline ait SNR verilerini kullanmıştır. LSP analizini gelgit değişiminin düşük olduğu bölgedeki istasyonlarda, LSP analizi ile harmonik analizi ise yüksek olduğu bölgedeki istasyonlarda uygulamıştır. LSP analizi ile harmonik analizin bir arada kullanılmasının GNSS tabanlı deniz seviyesi gözlemleri ve mareograf kayıtları arasındaki korelasyonu yükselttiği görülmüştür.

S. Zhang vd., (2019), EMD yöntemini SNR verileri analizinde uygulamıştır. Geliştirilen algoritmanın düşük uydu yükseklik açılarındaki doğruluğu artırdığı görülmüştür.

Geremia-Nievinski vd., (2020), bağımsız araştırma grupları tarafından, Uluslararası Jeodezi Birliği (IAG) çalışma grubu 4.3.9 kapsamında SNR verileri kullanılarak GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi değişimi sonuçlarını karşılaştırmıştır. Buna göre tüm grupların GNSS-IR tekniği ile belirlenen deniz seviyesi değişimi ve mareograf verileri arasında yüksek oranda korelasyon elde ettiği görülmüştür.

Zheng vd., (2021), iki yıllık zaman aralığındaki SNR verilerinden çoklu-GNSS için ters çözüm ile Doğu Afrika kıyılarındaki deniz seviyesi değişimini belirleyerek yapılan tersine çözümün doğruluğunu incelenmiştir.

Farzaneh vd., (2021), dominant frekansın çıkarılmasında ilk kez En Küçük Kareler Harmonik Tahminini (Least Square Harmonic Estimation, LS-HE) kullanarak deniz seviyesi belirlemiştir.

Li vd., (2021), LSP yöntemine alternatif olarak Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform, FFT) ve Doğrusal Olmayan En Küçük Kareler yöntemlerini uygulayarak kar kalınlığı belirlemiştir. LSP yöntemi ile karşılaştırıldığında, bu iki yöntemin birleştirilmesinin doğruluğu %10 geliştirdiği değerlendirilmiştir.

Beşel ve Tanır Kayıkçı (2021), Türkiye'nin Akdeniz kıyısında bulunan MERS istasyonu GPS L1 SNR ve L5 SNR verilerinden hem LSP analizi hem de LSP ile MA kombinasyonu ile geliştirilen LSP-MA yöntemi ile deniz seviyesi değişimini hesaplamıştır. LSP-MA yöntemi ile GNSS-IR ile elde edilen deniz seviyesinin performansının yükseldiği belirlenmiştir.

Hu vd., (2021), deniz seviyesi yüksekliklerinin belirlenmesinde Varyasyonel Mod Ayırıştırma (Variational Mode Decomposition, VMD) ile GNSS-IR tekniğini birleştiren yeni bir yöntem sunmuştur. SNR verileri VMD tekniği ile ayrıştırılıp verinin trendini temsil eden İç Mod Fonksiyonu (Intrinsic Mode Function, IMF) çıkarılarak SNR salınımlarının elde edilmesi için kalan IMF bileşenleri yeniden yapılandırılmıştır. Deneysel sonucunda 4.86 cm KOH ve 0.97 korelasyonla VMD'nin doğruluk ve kararlılık açısından iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Zheng vd., (2022), GNSS-IR ile Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (Autoregressive Integrated Moving Average, ARIMA) modelinin birleştirilmesi ile saatlik deniz seviyesi tahmini gerçekleştirilmiştir.

(3) GNSS-IR tekniğinin deniz seviyesi izleme uygulamaları haricindeki kullanım alanları: GNSS-IR tekniğinin deniz seviyesi değişimi haricindeki temel kullanım alanlarından diğerleri; toprak nemi (Bilich vd., 2007; Larson vd., 2008; Larson vd., 2008; Zhang, vd., 2021) ve kar/buz kalınlığının (Ghiasi vd., 2020; Larson vd., 2009; Larson ve Nievinski, 2013; Larson ve Small, 2016) belirlenmesi olmuştur. Bu alanların yanında sürekli olarak farklı alanlarda kullanılabilirliğine ilişkin çalışmalar da yürütülmektedir. Aşağıda bu çalışmaların bir kısmı sunulmuştur.

Zhang vd., (2021), SNR verilerine uyguladığı kümeleme algoritması ve Grubbs kriteri ile kar kalınlığı tahmini yapmıştır. Çalışma sonucunda geliştirilmiş GNSS-IR sonuçlarının ölçülen kar kalınlığı ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Jia vd., (2020), rastgele orman ve destek vektör makinesi makine öğrenmesi yöntemlerine dayanarak GNSS-IR ile toprak nemi belirlenmesinin uygunluğunu araştırmıştır. Destek vektör makinesinin toprak neminin çıkarılmasında potansiyele sahip olduğu sonucuna varmıştır.

Larson (2013), Okmok ve Redoubt volkanik dağlarındaki volkanik duman bulutunu SNR verilerini kullanarak belirlemiştir. Bunun için SNR verilerindeki değişimi gözlemlemiştir.

Karegar ve Kusche (2020), COVID-19 pandemisinde yaşanan kapanma sürecinde Boston'da bir otopark yakınında bulunan GNSS istasyonunu kullanarak park edilmiş araçlarda dahil olmak üzere, GNSS alıcısının yakınındaki hareketli ortama karşı duyarlılığını test etmek için GNSS-IR tekniğinden yararlanmıştır. Diğer yandan, yüzey pürüzlülüğünün (otopark) yansıyan sinyal üzerindeki etkisi belirlenmiş oldu. Buna göre sokağa çıkma yasağının başlamasıyla birlikte araç sayısındaki azalma ile otoparktan yansıyan sinyallerin gücünün arttığı ve yüzey pürüzlülüğünün azaldığı görülmüştür.

Holden ve Larson (2021), TGHO istasyonundan alınan SNR verilerinden yararlanarak Taupo gölüne ait göl yüzeyi yüksekliklerini hesaplayarak tekniğin güvenilir uzun dönem göl yüzeyi tahmini sağladığını göstermiştir.

Diğer yandan can kaybı ve ciddi yıkıcı etkilere sahip olan deprem ve tsunami afetleri erken uyarı uygulamaları için GNSS verilerinden üretilen üç boyutlu konum bilgilerinden yararlanılmaktadır (Melgar vd.,2016). GNSS-IR tekniğinin de başta yukarıda belirtilen afetler olmak üzere ekstrem doğa olaylarının belirlenmesine yönelik kullanımına dair çalışmalar mevcuttur.

Peng vd., (2019), ilk kez ekstrem hava kaynaklı deniz seviyesinde meydana gelen değişimi belirlemeye çalışmıştır. Çalışma sonucunda ekstrem hava kaynaklı fırtına kabarmasının, SNR verileri kullanılarak belirlenen deniz seviyesi gözlemlerinde belirgin olduğu görülmüştür.

Karegar vd., (2020), GNSS-IR tekniğini ilk kez Mississippi Deltası ve Kuzey Denizi'nin doğu kıyısında aktif olarak çöken kıyı ovalarında sığ çökme oranlarını hesaplamak için sunmuştur. Çalışmada, sığ çökmeyi ölçmek ve eş konumlu mareograflarda rölatif deniz seviyesi yükselmesi oranını düzeltmek için GNSS-IR kullanılması önerilmiştir.

Larson vd., (2021), tsunami veya fırtına kabarması sırasında yansıyan GNSS sinyalleri kullanılarak sağlanan gerçek zamanlı deniz seviyesi gözlemlerinin kıyasal tehlikeleri azaltmadaki rolünü göstermiştir. Benzer bir çalışmada Kim ve Park (2021) tarafından Harvey kasırgası sırasında GNSS sinyalleri ile fırtına kabarmasının belirlenmesi için sunulmuştur. Fırtına kabarması sırasında GNSS tabanlı su seviyesi ölçümleri ve ortak yerleşkeli mareograf kayıtları arasında 0.97 düzeyinde bir korelasyon elde etmiştir.

Beşel ve Tanır Kayıkçı (2022), Mersin ilinde gerçekleşen şiddetli fırtınanın öncesinde, anında ve sonrasında meydana gelen ani su değişimini GNSS-IR tekniğini kullanarak izlemiştir. Elde etmiş olduğu su değişimini fırtınanın meydana geldiği tarihteki rüzgar hızı, hava basıncı ve toplam yağış parametreleri ile karşılaştırarak aynı yönde eğilime sahip olduklarını görmüştür.

Wang vd., (2022), tek jeodezik alıcıdan alınan yansıyan GNSS sinyalleri ile deniz seviyesi değişiminin yanında oşinografik parametre tahmini yapmıştır.

Song vd., (2022), kutup bölgesinde deniz yüzeyi durumunu belirlemek için yersel GNSS-IR tekniğine dayalı yeni bir yöntem üzerine çalışmıştır. Çalışmada geleneksel tek katmanlı yansıtıcı yüzeylerden farklı olarak çoklu ışın tek yansıma modeline dayalı yüzey pürüzlülüğünü ve çoklu yansımaların girişim etkisini dikkate alan çok katmanlı bir model sunmuştur. Önerilen yöntemin, düşük maliyetle uzun vadeli verilerle kutup bölgelerindeki deniz yüzeyi durumu için bir potansiyel olabileceği değerlendirilmiştir.

2016 yılında Google tarafından Android Nougat (7.0) işletim sistemine sahip akıllı cihazların ham GNSS ölçülerini sağlayabileceği duyurulmuştur. Bu sayede GNSS-IR çalışmaları için yeni fırsatlar açığa çıkmıştır.

Strandberg ve Haas (2020), tablet bilgisayar kullanarak deniz seviyesi belirlemiştir. Çalışma sonucunda tablet bilgisayarla jeodezik ekipmanlarla elde edilen sonuçlarla benzer performans gösterdiği belirtilmiştir.

Liu vd., (2022), çift frekanslı Android akıllı telefon Huawei P30 ile 20 günlük SNR verilerini toplayarak GNSS-IR tekniğinin farklı anten yönelimi ve farklı uydu yükseklik açılarındaki performansını incelemiştir. GPS L1, GLONASS G1 ve BDS B1I sinyalleri hassas ve sabit yükseklik bilgileri sağlamıştır.

Diğer yandan son zamanlarda düşük maliyetli GNSS alıcılarının GNSS-IR tekniğinde kullanılmasına yönelik çalışmalar da yapılmaya başlanmıştır.

Fagundes vd., (2021), deniz seviyesi değişiminin belirlenmesi amacıyla SNR tabanlı GNSS-IR çalışmaları için açık kaynak, düşük maliyetli sensör geliştirmiştir. Bunun için Guaíba gölünde yaklaşık bir yıllık veri toplamış olup ortak yerleşkeli mareograf ile deniz seviyesi değişimi karşılaştırmıştır. Sonuçlara bakıldığında, santimetre seviyesinde doğruluk elde etmiştir.

Karegar vd., (2022), düşük maliyet ve kurulumu sahip olan Raspberry Pi Reflector (RPR) adında tek frekanslı GPS modülü ve anten içeren bir prototip sunmuştur. Tasarlanan RPR sensör sistemi ile sürekli olarak su seviyesinin ölçülmesini sağlayacak gerçek zamana yakın ham veri akışı sağlanmıştır. Yaklaşık iki yıl boyunca Rhine nehri kıyısında yansıma sinyallerinden günlük ve yarı-günlük su seviyesini ölçmüştür. Sonuçlar ortak yerleşkeli mareograf ile karşılaştırıldığında yarı-günlük verilerde 3 cm doğruluk elde etmiştir.

Deniz seviyesi değişimini etkileyen başlıca faktörlerden olan gelgit etkisinin GNSS-IR ile belirlenmesine yönelik çalışmalar da yapılmaktadır.

Löfgren vd., (2014), GNSS-IR tekniğine dayalı olarak beş farklı GPS istasyonundan ve mareograf kayıtlarından elde edilen deniz seviyesi değişimlerine gelgit harmonik analizi yapılmış ve uzun periyotlu gelgitlerin daha büyük farklara sahip olduğu değerlendirilmiştir.

Williams ve Nievinski (2017), GNSS-IR kullanılarak belirlenen tüm büyük gelgit harmoniklerini ortak yerleşkeli mareograf istasyonu verilerinden hesaplanan gelgit harmonikleri ile karşılaştırmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, GNSS-IR'dan elde edilen gelgit harmonikleri daha küçük bulunmuştur.

Larson vd., (2017), GPS L1 sinyali SNR verilerini kullanarak GNSS-IR tekniğinden ve mareograf kayıtlarından elde edilen gelgit bileşenlerini karşılaştırmış ve maksimum fark K1 bileşeninde bulunmuştur.

Tabibi vd., (2020), Antarktika ve Grönland bölgesindeki GNSS istasyonlarından L1 ve L2 SNR verilerinden günlük ve yarı-günlük gelgit bileşenlerini GNSS-IR tekniği kullanarak hesaplamıştır. Elde edilen bu gelgit bileşenleri mareograf, hem küresel hem de bölgesel okyanus gelgit modelleri ile karşılaştırılmış, bir saatin altındaki GNSS-IR deniz

seviyesi verilerinin gelgit bileşenlerinin belirlenmesinde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Ghiasi vd., (2021), diğer çalışmalara benzer şekilde GNSS-IR tekniği ile gelgit bileşenlerini hesaplayarak FES2012 küresel okyanus gelgit modeli ile karşılaştırmıştır. Kısa süreli gelgit bileşenlerinin tahmininde GNSS-IR'ın bir araç olarak kullanılabileceği görülmüştür.

Beşel ve Tanır Kayıkçı (2022), Türkiye’de ilk kez GNSS-IR tekniği ile gelgit bileşenlerinin belirlenebilirliğini araştırmıştır. Bunun için, Karadeniz kıyısında GNSS-IR dayalı gelgit bileşenleri belirlenerek elde edilen sonuçlar mareograf ve küresel okyanus gelgit modeli ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, GNSS-IR tekniğine yönelik uygulanacak iyileştirmelerle birlikte GNSS-IR'ın ülkemizde gelgit bileşenlerinin belirlenmesinde kullanılabilir olabileceği değerlendirilmiştir.

(4) Türkiye’de GNSS-IR uygulamaları: Ülkemizde kıyıya yakın GNSS istasyonlarını kullanarak sınırlı sayıda da olsa GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi değişiminin belirlendiği çeşitli çalışmalar yapılmıştır ve yapılmaya devam etmektedir.

Beşel ve Tanır Kayıkçı (2021), ülkemizde ilk kez Akdeniz, Ege, Marmara ve Karadeniz kıyılarında bulunan IGS ve TUSAGA-Aktif ağları bünyesindeki kıyıya yakın sabit GNSS istasyonlarını kullanarak GNSS-IR tekniği ile deniz seviyesi değişimi belirlenebilirliğini araştırılmıştır. Sonuç olarak, MERS ve TEKR GNSS istasyonları GNSS-IR ile deniz seviyesi değişimi belirlenmesine uygun istasyonlar olarak elde edilmiştir.

Altuntaş ve Tunalıoğlu (2022), Marmara denizinde bulunan TEKR istasyonuna ait SNR verileri kullanarak deniz seviyesi değişimi belirlemiş, farklı uydu yükseklik açısı ve arka plan gürültü koşullarında doğruluk analizleri yapmıştır.

Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) Harita Mühendisliği Bölümü ve Harita Genel Müdürlüğü (HGM) arasında imzalanan iş birliği protokolü kapsamında “Karadeniz Kıyılarındaki Deniz Seviyesi Değişiminin GNSS-IR Tekniği ile Araştırılması” (2020-2023) başlıklı ortak araştırma projesi yürütülmektedir. Bu araştırma projesi, Türkiye’de GNSS-IR tekniği ile deniz seviyesi değişimlerinin belirlenmesine öncülük edecek ilk araştırma projesi olması açısından öneme sahiptir. Proje kapsamında; çalışma bölgesindeki mareograf istasyonlarında lokal datumda gerçekleştirilen deniz seviyesi değişimi ölçümleri, aynı mareograf istasyonlarında bulunan sabit GNSS istasyonlarından alınan GNSS gözlemleri ve TUSAGA-Aktif istasyonlarından temin edilen GNSS gözlemleri kullanarak deniz seviyesi değişiminin GNSS-IR ile araştırılması, diğer tekniklere kıyasla GNSS-IR'ın kıyı

bölgelerindeki avantajlarının belirlenmesi ve hassas deniz seviyesi verilerinin elde edilmesi konularındaki iş birliğinin esas ve usullerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

GNSS-IR tekniği, devam eden performans iyileştirme çalışmaları ve gelişen teknoloji ile birlikte deniz seviyesi değişiminin izlenmesine alternatif olarak gösterilmektedir. Bu yüzden bilim dünyasında oldukça ilgi görmektedir.

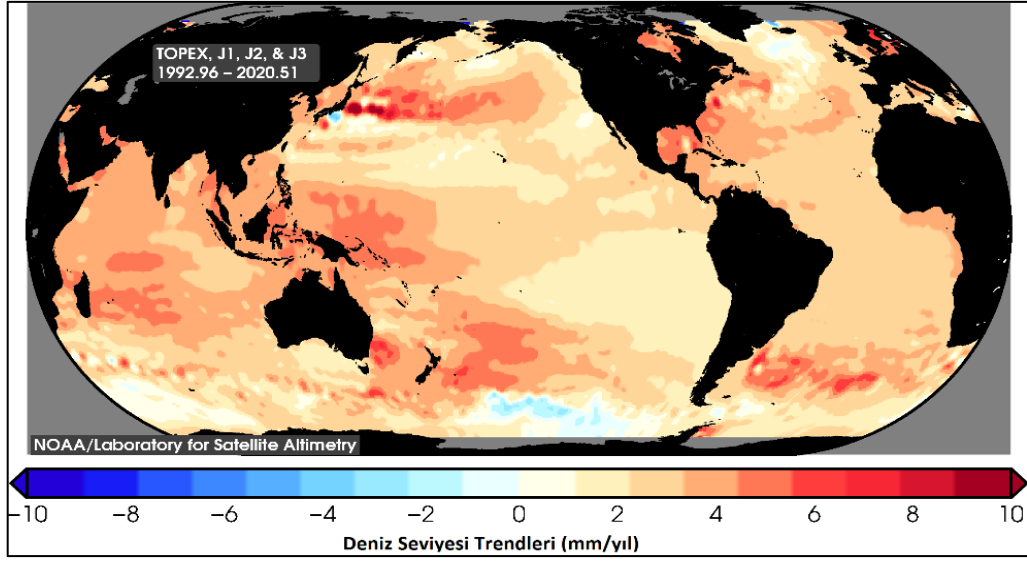
1.5. Deniz Seviyesi Değişimlerinin Belirlenmesi

Günümüzde yaklaşık altı yüz milyon insan kıyıya yakın alanlarda yaşamaktadır. Deniz seviyesindeki değişimi, değişime neden unsurları ve değişim sebebiyle oluşabilecek olayların değerlendirilmesi birçok açıdan önemlidir. Diğer yandan deniz seviyesindeki değişimin değerlendirilmesi, kıyı planlaması ve erken uyarı sistemlerinin kurulması bakımından gereklidir. Özellikle alçak kıyı alanlarındaki yüksek nüfuslu yerlerde ekstrem olaylardan kaynaklı deniz seviyesi artışı küresel ısınmanın en büyük tehdidi olarak görülmektedir (Cazenave vd., 2018). Bu nedenle kıyı alanlarındaki deniz seviyesi artışı ve bu artışın etkileri bilim dünyasında oldukça ilgi görmektedir.

Deniz seviyesi değişiminin geniş zaman ölçeğinde meydana geldiği bilinmektedir. Değişimine neden olan etkiler; küresel ısınmanın neden olduğu buzulların/buz tabakalarının erimesi, okyanusların ısınması, güneş radyasyonu değişimi, gelgitten kaynaklı değişimler, meteorolojik etkiler olarak sıralanabilir. Deniz seviyesi gözlemleri; iklim değişikliği araştırmaları, erken uyarı sistemlerinin kurulması, hidrografik ölçmeler, oşinografik modelleme, ekstrem olayların analizi, deniz sınırlarının belirlenmesi, düşey koordinat referans sistemlerinin oluşturulması gibi birçok bilimsel çalışmaya altlık oluşturan temel gözlem setlerindendir. Özellikle kıyı alanları için deniz seviyesinde zamanla meydana gelen değişimin etkili ve doğru gözlemlenmesi gerekmektedir. Küresel deniz seviyesinin artışı 1960'lı yılların sonlarından itibaren hızlanmıştır. Uluslararası İklim Değişikliği Panelinin (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) AR4 raporuna (Fourth Assessment Report-2007) göre, 20. yüzyılda deniz seviyesi ortalama artış 1.7 mm/yıl, 1961-2003 periyodunda 1.8 mm/yıl, 1993-2003 periyodunda ise 3.1 mm/yıl olmuştur (IPCC, 2007). Yine IPCC AR5 raporunda (Fifth Assessment Report-2013) emisyon senaryosunun en kötü durumuna göre; deniz seviyesindeki artışın 2100 yılına kadar 61 cm ile 1.1 m arasında olması beklendiği belirtilmiştir (IPCC, 2013). Son IPCC AR6 raporunda (Sixth Assessment Report-2022) ise 1960-1980 yılları arasında yılda beş kez meydana gelen yüksek gelgit taşkın

olaylarının 1995-2014 yılları boyunca yılda ortalama sekizden fazla olduğu gösterilmiştir. Aynı raporda küresel deniz seviyesi artışının 2050 yılına kadar 0.18 m ile 0.23 m arasında, 2100 yılına kadar ise 0.38 m ile 0.77 m arasında olacağı tahmin edilmektedir (IPCC, 2022). Okyanus ısınması, Antarktika ve Grönland buzullarının erimesi devam ettikçe küresel deniz seviyesindeki artışta yüzyıllarca devam edecektir. Deniz seviyesinde meydana gelen hızlı artış ile yıllar içerisinde kıyı alanlarının maruz kalacağı doğal tehlikeler artacaktır. Bu tehlikeler; ortalama deniz seviyesinin yükselmesi ile toprağın sürekli olarak sular altında kalması, kıyı taşkınlarının sayısının artması, kıyı erozyonunun artması, kıyı ekosisteminde değişme veya kayıp meydana gelmesi, toprağın ve yeraltı suyunun tuzlanması olarak sıralanabilir. Okyanuslar şimdiye kadar küresel ısınmadan kaynaklı ısınmasının %90'ını absorbe etmiş durumdadır ve karbon emisyonlarına karşı önlem alınmazsa bu ısınma 2100 yılına kadar 5-7 kat daha fazla olacağı tahmin edilmektedir. Ayrıca IPCC AR5 raporunda, balıkçılık ve su ürünleri yetiştiriciliğinin şimdiden bu durumdan etkilendiği belirtilmiştir. Bu duruma uyum sağlama konusunda ciddi bir hızlanma olmaması durumunda birçok kıyı alanında yukarıda belirtilen tehlikeler beklenmektedir. Dünya'daki birçok yerde yıllık ortalama bağıl deniz seviyesi değişimi birkaç mm/yıl düzeyindedir. Değişen deniz seviyesine bağlı riskler bu yavaş değişimlerin arka planında, sınırlı zamana sahip fırtına dalgalanmaları, dalgalar, gelgitler veya bu süreçlerin kombinasyonu gibi aşırı deniz seviyesi artışına neden olan ayrı ayrı olaylarla da ilgili olabilmektedir. Sonuç olarak, bu yavaş değişim belirtilen süreçlerle birlikte değerlendirilmelidir.

Deniz seviyesi değişimi konuma göre değişmekte olup farklı oranlarda gerçekleşmektedir. Cazenave vd., (2014), uydu verilerini kullanarak tahmin edilen küresel ortalama deniz seviyesi değişimi oranını ± 3 mm/yıl olarak vermiştir. Mareograf verilerinden 1993- 2003 yılları arasında elde edilen küresel iklim değişikliği oranının ise 1.8 ± 0.5 mm/yıl olduğu belirtilmiştir (Löfgren, 2014). Şekil 2'de, 1992 ila 2020 yılları arasında uydu altimetre verilerinden sağlanan bölgesel deniz seviyesi değişimi trendleri gösterilmektedir. Burada yıllar içerisinde deniz seviyesinde değişik oranlarda olmakla beraber artan yönde trend görülmektedir. Belirlenen oranlar Dünya genelinde farklıdır ve uydu altimetre verileri deniz seviyesindeki artışın coğrafi olarak tekdüze olmadığını göstermiştir. Bu yüzden gelecekte deniz seviyesinde gerçekleşecek olan değişimin doğru olarak belirlenmesi ve bu değişiminden etkilenecek alanların tespiti ve alınması gereken önlemler önemli olmaktadır.



Şekil 2. Uydu altimetresi ile bölgesel deniz seviyesi trendleri (URL-4, 2020)

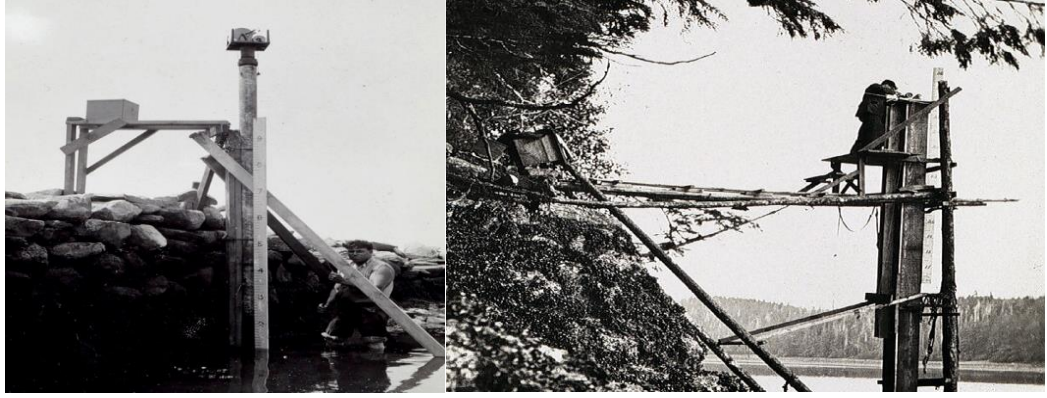
Karaca ve Ünal (2003), Türkiye’de küresel ısınmaya bağlı olarak artan deniz seviyesi yüksekliğinin 1 m yükselmesi senaryosuna göre oluşacak etkileri incelemiştir. Çalışmada, deniz seviyesindeki artışın ülkemizin Gayri Safi Milli Hasılası’nın yaklaşık %10’u kadar bir kayba neden olacağı değerlendirilmiştir. Bu aşamada üç tarafı denizlerle çevrili olan Türkiye’de deniz seviyesi değişiminin belirlenmesi ve geleceğe yönelik tahmin çalışmaları oldukça önemlidir. Literatürde ülkemiz kıyılarını içeren çalışmalara bakıldığında, Karadeniz ortalama deniz seviyesinde hızlı bir artış olduğu belirtilmiştir (Kubryakov ve Stanichyni 2013; Vigo vd.,2005; Avşar vd., 2015). Kubryakov ve Stanichyni (2013), altimetre verileri yardımıyla 1992-2005 periyodunda Karadeniz kıyılarındaki ortalama deniz seviyesi oranını 7.6 ± 0.3 mm/yıl olarak belirlemiştir. Aynı bölgede, Avşar (2019), çok misyonlu uydu altimetre verilerinin analizi ile Ocak 1993- Aralık 2014 periyodunda deniz seviyesinin 3.2 ± 0.6 mm/yıl hızla yükseldiğini belirtmiştir. Ayrıca Karadeniz kıyılarındaki 13 mareograf istasyonunun analizinde de bağlı deniz seviyesi değişiminin artan yönde trende sahip olduğu görülmüştür. Beşel ve Tanır Kayıkçı (2020)’de, Karadeniz kıyılarında bulunan mareograf istasyonu deniz seviyesi verilerine uygulanan Tekil Spektrum Analizi ile artan yönde trendler elde edilmiştir. Akdeniz kıyısında yapılan çalışmalara bakıldığında ise; Simav (2012), 1992-2005 zaman aralığında Doğu Akdeniz’de uzun dönemli ortalama deniz seviyesinin 4-7 mm/yıl hızla yükseldiği belirtilmiştir. Grgić vd. (2017)’de Akdeniz ortalama deniz seviyesinde 1992-2016 zaman aralığında mareograf verilerine göre 2.87 ± 0.33 mm/yıl, uydu altimetre verilerine göre ise 3.15 ± 0.42 mm/yıl artış belirlemiştir. Yavuzdoğan

(2019), Ege kıyılarında bulunan sekiz mareograf istasyonu gözlem verilerine Kapula analizi uygulanmış ve yedi istasyona ait deniz seviyesi gözlemlerinde artan yönde trendler elde edilmiştir.

1.5.1. Deniz Seviyesi Değişimi Ölçme Teknikleri

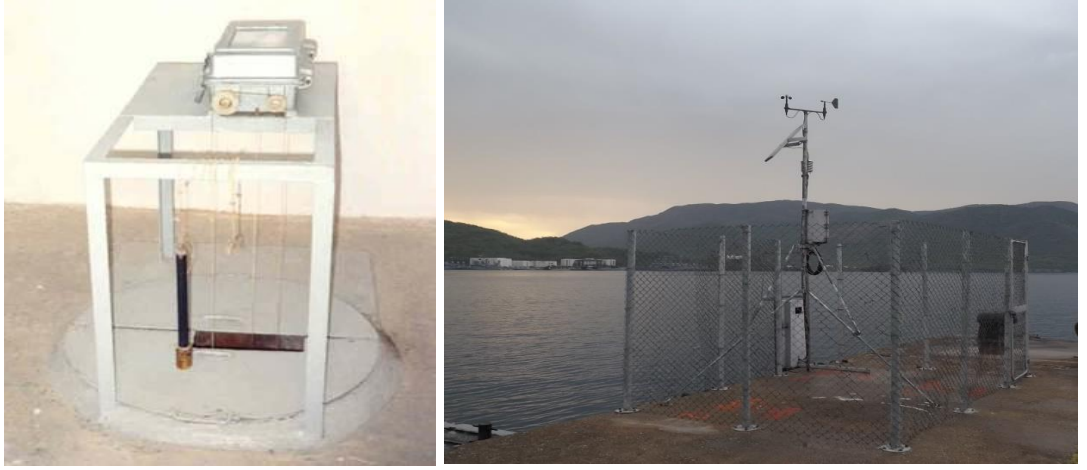
Deniz seviyesi değişimi temelde iki teknik ile belirlenmektedir. Bunlardan birincisi mareograf, ikincisi ise uydu altimetre tekniğidir. Lokal deniz seviyesi değişiminin belirlenmesinde genellikle geleneksel mareograf istasyonlarından yararlanılmaktadır. Mareograflarla deniz seviyesinin belirlenmesi, deniz yüzeyi ile yer yüzeyi arasındaki düşey mesafenin ölçülmesi temeline dayanmaktadır. Fakat mareograflardan alınan veriler yalnızca deniz seviyesi gözlemlerini içermemekte, ayrıca düşey yer kabuğu hareketlerinden (Vertical Land Motion, VLM) etkilenmektedir. Diğer yandan deprem anı ve deprem sonrası deformasyonlar, Buzul İzostatik Ayarı (Glacial Isostatic Adjustment, GCI) ve arazi çökmesi gibi faktörler de mareograf ile kesin deniz seviyesinin belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Bu durum deniz seviyesi gözlemlerinde belirsizliklere neden olmaktadır. Sonuç olarak mareograf ölçümlerinin düşey yer kabuğu hareketine karşı düzeltilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Günümüzde, bir takım mareograf istasyonları bu faktörlere karşı GPS donanımını da içerecek şekilde hizmet vermektedir. Fakat Dünya genelinde bu şekilde donanıma sahip istasyonların sayısı yeterli değildir. Bir diğer temel teknik olan uydu altimetrede ise yerin gravite merkezine göre deniz seviyesi ölçülmekte olup yer merkezli etkilere maruz kalmamaktadır. Fakat literatürdeki çalışmalar gösteriyor ki, uydu altimetre tekniği özellikle kıyı alanlarında istenilen duyarlılıkta sonuçlar vermemektedir. Uydu altimetre geniş ayak izine sahiptir ve geri dönen radar darbesi kıyılara yaklaştığında özellikle son 20 km içerisinde şiddetli bir şekilde kirlenmektedir. Bu durum, deniz yüzeyi yüksekliği (Sea Surface Height, SSH) gözlemlerinin tahminini zorlaştırmaktadır ve sonuç olarak gözlem doğruluğunun azalmasına neden olmaktadır (Cipollini vd., 2017; Chelton vd., 2001; Lee vd., 2019). Üstelik kıyı altimetresi ölçümleri atmosferik yükleme, okyanus gelgiti, ıslak troposfer düzeltilmesi gibi bazı jeofiziksel düzeltmelerin belirsizliklerinden de etkilenmektedir (Birol vd., 2017). Bu nedenle, kıyı alanlarında belirlenen deniz seviyesi ölçümlerinin doğruluğunu artırmaya yönelik alternatif tekniklerin geliştirilmesi ve/veya kullanılması gerekliliği doğmaktadır.

- Mareograf İstasyonları: Deniz seviyesi değişimi ölçümleri yüzyılı aşkın süredir okyanusa veya kıyıya yakın tesis edilmiş mareograf istasyonları kullanılarak yapılmaktadır. 19. yüzyılın ortalarından sonra kurulan mareograf istasyonları halen deniz seviyesinin belirlenmesinde en yaygın sistem olarak kullanılmaktadır. İlk mareograf sistemleri kaya, duvar veya miradan oluşacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 3). Yıllar içerisinde şamandıralı, tüplü/tüpsüz akustik, basınç sensörlü, radar sensörlü gibi çeşitli sistemler kullanılarak deniz seviyesi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. 1994 yılında ilk kez bir GPS istasyonu mareograf yanında çalışmaya başlamıştır. Yıllar geçtikçe GPS ortak yerleşkeli mareograf istasyonu sayısı artmıştır (Schöne vd., 2009). Aynı zamanda çeşitli oşinografik ve hidrografik kuruluşlar da mareografin üzerine GNSS anteni kurulmasını önermektedir (URL-5, 2022).



Şekil 3. İlk mareograf istasyonu (URL-6, 2022)

Türkiye’de deniz seviyesi belirleme çalışmaları HGM tarafından, düşey datumun belirlenmesine yönelik ve ortalama deniz seviyesinin belirlenmesi amacıyla 1935 yılında Antalya iline mareograf istasyonu kurulması ile başlamıştır. Günümüze kadar kuyulu analog mareograf istasyonları, sayısal ve otomatik mareograf, sayısal ve otomatik akustik sensörlü olmak üzere çeşitli sistemlerle donatılmış mareograf istasyonları işletilmiştir (Şekil 4). Eylül 2014 tarihinde başlayan modernizasyon çalışmaları sonucunda 2021 yılında tüm istasyonlar GNSS entegreli radar sensörlü sistemle donatılmıştır (Şekil 5).



Şekil 4. Kuyulu ve şamandıralı mareograf istasyonu (sol), akustik sensörlü mareograf istasyonu(sağ) (URL-7, 2022)



Şekil 5. Radar sensörlü mareograf istasyonu (URL-7, 2022)

Günümüzde deniz seviyesi gözlemlerine erişimi sağlayan çeşitli küresel, bölgesel ve ulusal veri merkezleri mevcuttur. Küresel Deniz Seviyesi Gözlem Sistemi (Global Sea Level Observing System,GLOSS), Ortalama Deniz Seviyesi Sürekli Servisi (Permanent Service for Mean Sea Level, PSMSL) ve Avrupa Küresel Okyanus Gözlem Sistemi (European Global Ocean Observing System, EuroGOOS) bölgesel istasyonlardan alınan yüksek kaliteli deniz seviyesi gözlemlerini sağlamaktadır. Tablo 1’de bazı uluslararası deniz seviyesi izleme merkezleri gösterilmiştir.

Tablo 1. Deniz seviyesi izleme merkezleri (URL-5, 2022)

İşlev	Merkez	Görev	Veri	Web sayfası
Erişilebilirliği				
İzleme Servisi	IOC SLSMF	Yaklaşık gerçek zamanlı veri indirme ve çizdirme	4-6 hafta	http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/
Hızlı Mod	UHSLC	Verilerin kalite kontrolü		uhslc.soest.hawaii.edu
Gecikmeli Mod	BODC	Yüksek frekanslı final verileri	Yıllık	https://www.bodc.ac.uk/
Saatlik veri ürünleri	JASL/ UHSLC	Düzeltilmeleri yapılmış saatlik final verileri	Yıllık	uhslc.soest.hawaii.edu
Aylık ortalama	PSMSL	Aylık ortalama final verileri	Yıllık	https://psmsl.org/
GNSS verileri	SONEL	Mareograf yakınındaki GNSS verileri arşivi	Günlük	https://www.sonel.org

Ülkemizde deniz seviyesi gözlemleri HGM bünyesinde bulunan Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi (TUDES) tarafından sağlanmaktadır. TUDES ağı, Türkiye ve KKTC kıyılarına dağılmış GLOSS standartlarına uygun toplamda 20 adet mareograf istasyonundan oluşmaktadır (Şekil 6). İstasyonlarda bulunan meteorolojik sensörler sayesinde kullanıcılara ayrıca sıcaklık, hava basıncı, nem ve rüzgar verileri de sağlanmaktadır. Gözlenen değerler her otuz saniyede bir ölçülmekte ve on beş dakikalık ortalamalar halinde sunulmaktadır. Kıyılarımızdaki uzun dönemli deniz seviyesi değişimleri TUDES istasyonları vasıtasıyla takip edilmesi ile Türkiye

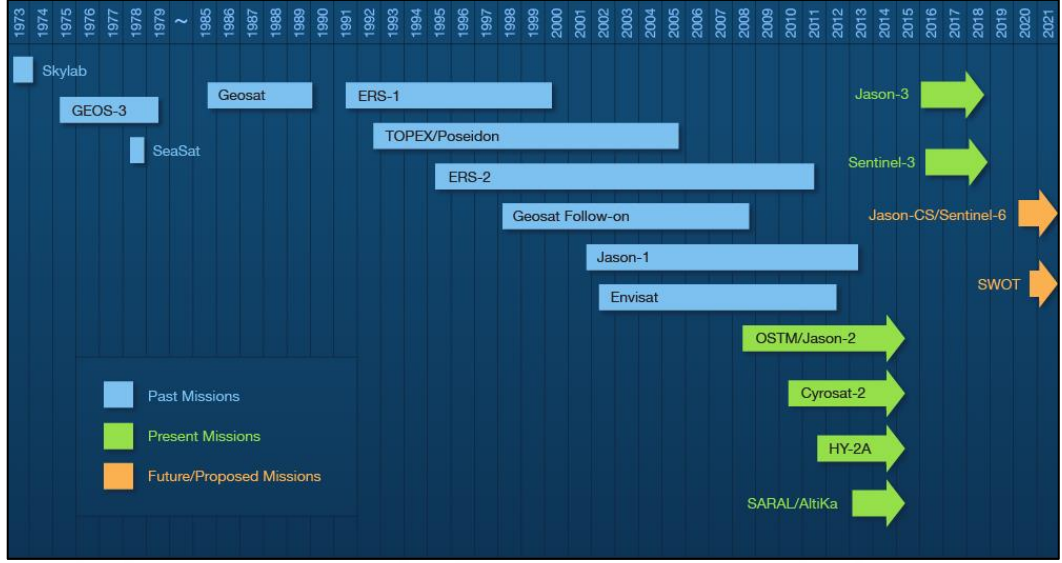
Ulusal Düşey Kontrol Ağı (TUDKA) için referans yüzey belirleme uygulamaları sürdürülmektedir.



Şekil 6. Türkiye'deki mareograf istasyonları (URL-7, 2022)

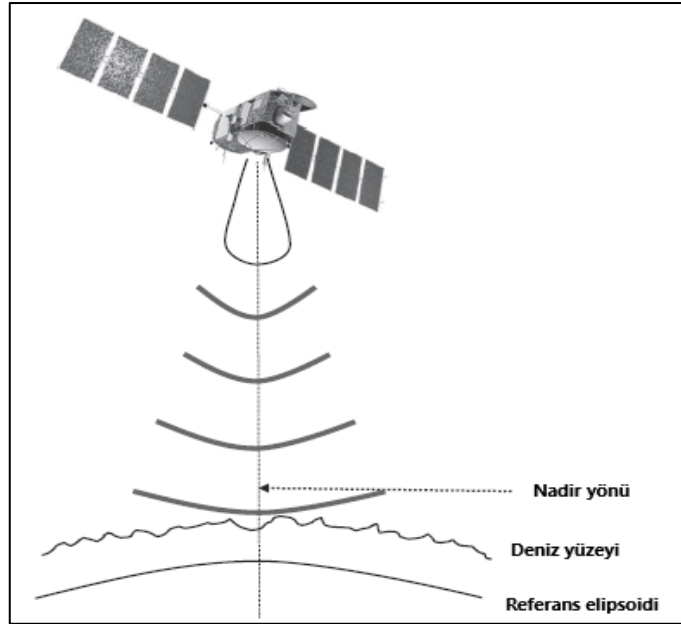
Mareograf istasyonları ile ölçülen deniz seviyesi gözlemleri, istasyonun bulunduğu karaya göre hareketi olduğundan rölatif deniz seviyesi değişimleri olarak adlandırılmaktadır. İstasyonun bulunduğu karaya göre belirlenen deniz seviyesi gözlemleri aynı zamanda yersel hareketleri de içermektedir. Karadaki yükselme veya çökmeye bağlı olarak gözlemlenen deniz seviyesi değişiklik gösterebilir ve küresel ortalama deniz seviyesi oranından sapma yapabilir (Church vd., 2013). Dolayısıyla yersel etkilerin gözlem değerlerinden çıkarılması gerekmektedir. Bu etkinin belirlenmesi ve/veya kaldırılmasına yönelik ulusal ve uluslararası literatürde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar içerisinde daha çok mareograf ve uydu altimetre verilerinin kombinasyonu yapılmaktadır (Avsar vd., 2017; Fenoglio-Marc vd., 2004; Wöppelmann ve Marcos, 2016).

- Uydu Altimetresi: Küresel ve bölgesel ölçekte deniz seviyesi değişimleri 1990'lı yılların başından beri yüksek duyarlılıklı altimetre uyduları ile ölçülmektedir. Şekil 7.'de 1973 yılından günümüze kadar kullanılmış ve/veya halen devam eden çeşitli altimetre misyonlarının kronolojik sıralaması gösterilmiştir.



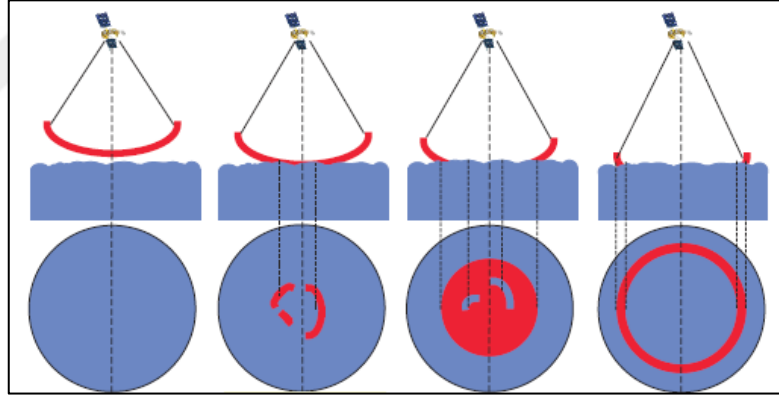
Şekil 7. Altimetre misyonları (URL-8, 2022)

Uydu altimetre yer merkezli referans sistemine göre mutlak deniz seviyesi gözlemleri sağlamaktadır. Temelde yükseklik ölçme tekniği olarak bilinmektedir. Elektromanyetik dalganın gidiş-dönüş seyahat süresinin ölçümü, uydunun anlık deniz yüzeyi üzerindeki uydu yüksekliğini sağlamaktadır (Cazenave vd., 2018) (Şekil 8).



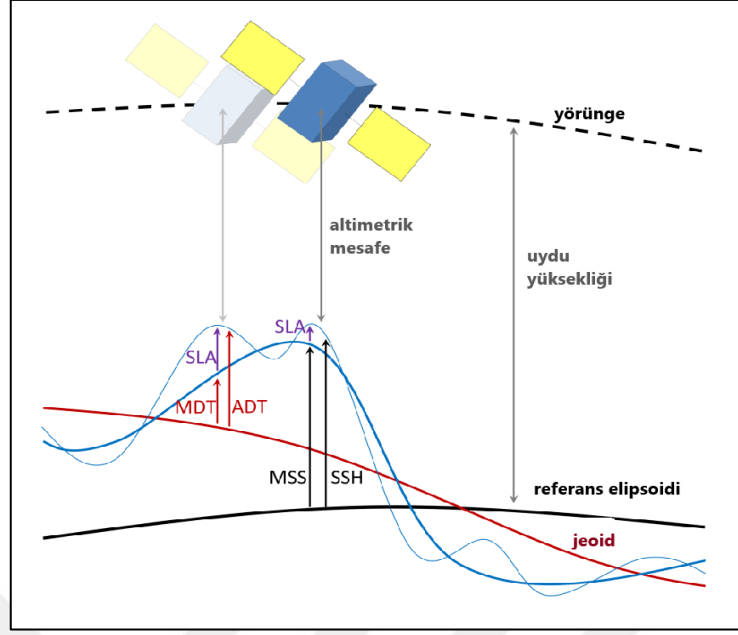
Şekil 8. Uydu altimetre geometrisi (Stammer ve Cazenave (2017)'den değiştirildi.)

Uydu altimetre ölçümleri, iki ölçünün kombinasyonundan elde edilmektedir. Bunlardan birincisi uydu yüksekliği, ikincisi ise altimetrik mesafedir (Stammer ve Cazenave, 2017). Yörüngelerinde görevine devam eden altimetre uyduları sürekli olarak okyanus yüzeyine yüksek frekanslı radar sinyali göndermektedir. Bu radar sinyalinin deniz yüzeyinde eş zamanlı olarak oluşturduğu dairesel alan uydunun “ayak izi (footprint)” olarak adlandırılmaktadır. Bu dairesel alanın yarıçapı; sinyal yayılma hızı, uydu yüksekliği, dalga genişliği ve denizin durumuna bağlı olarak değişmektedir. Şekil 9’da altimetre uydusundan iletilen radar sinyalinin deniz yüzeyi ile etkileşiminin geometrisi gösterilmektedir. Uydudan deniz yüzeyine ulaşan radar dalgaları dairesel şekle sahiptir ve deniz yüzeyinden yansıyan radar dalgasının enerjisi dalga yansıtıcı yüzey içerisinde tamamen kayboluncaya kadar sürekli olarak artmaktadır. Zaman içerisinde yansıtıcı ayak izinin çapının artması ile dairesel yapı sabit bir alana sahip halka biçiminde olmaktadır (Simav, 2007).



Şekil 9. Radar sinyalinin deniz yüzeyi ile etkileşimi (Stammer ve Cazenave, 2017)

Şekil 10’da altimetre uydu gözlemlerinden hesaplanan referans yüzeylerine göre farklı yükseklikler gösterilmiştir. Şekil 10’a bakıldığında bazı temel tanımların yapılması gerekmektedir.



Şekil 10. Referans yüzeylerine göre yükseklikler. SSH: Deniz Yüzeyi Yüksekliği, SLA: Deniz Seviyesi Anomali, MSS: Ortalama Deniz Yüzeyi, ADT: Mutlak Dinamik Topoğrafya, MDT: Ortalama Dinamik Topoğrafya. (URL-9, 2022)

Deniz Yüzeyi Yüksekliği (Sea Surface Height, SSH): Uydunun referans elipsoidine olan yüksekliği ile altimetrik mesafe arasındaki farktır. Başka bir ifade ile anlık deniz seviyesine göre referans yüzeyinden olan yüksekliktir. Hesaplanan SSH verilerine troposferik ve iyonosferik gecikme, radar hava-deniz yüzeyinde sinyalinin elektromanyetik sapma, gelgitler, okyanus yüklemesi, ters barometre ve donanımsal olmak üzere çeşitli düzeltmeler getirilmektedir. SSH,

$$SSH = \text{uydu yüksekliği} - \text{altimetrik mesafe} \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir.

Deniz Seviyesi Anomalisi (Sea Level Anomaly, SLA): Ortalama deniz yüzeyi ile anlık deniz yüzeyi arasındaki farktır. Farklı altimetrik gözlem ölçüleri arasındaki ilişki,

$$\begin{aligned} SLA &= SSH - MSS \\ MDT &= MSS - \text{jeoid yüksekliği} \\ ADT &= SLA + MDT \end{aligned} \quad (2)$$

Mutlak Dinamik Topoğrafya (Absolute Dynamic Topography, ADT): Anlık deniz yüzeyi ile jeoit arasındaki farkı ifade etmektedir.

Ortalama Dinamik Topoğrafya (Mean Dynamic Topography, MDT): Ortalama Deniz Yüzeyi (Mean Sea Surface, MSS) ile jeoit arasındaki fark ise olarak adlandırılmaktadır.

Son yıllarda kıyı alanlarındaki SSH gözlemlerinin doğruluğunu artırmak için oldukça çaba gösterilmektedir. Bunun için daha yüksek çözünürlük sağlayan Ka-bant altimetresi, Yapay Açıklıklı Radar/SAR altimetresinin kullanılması veya gözlem sonrası veri işleme (post-processing) yazılımlarının geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Aynı zamanda Avrupa Uzay Ajansı (European Space Agency, ESA), Ulusal Uzay Araştırmaları Merkezi (Centre national d'études spatiales, CNES) ve farklı araştırma enstitüleri tarafından X-TRACK, ALES (Adaptive Leading Edge Subwaveform), PISTACH (Innovative Prototype of a Treatment System for Coastal Altimetry and Hydrology), PEACHI (Prototype for Expertise on Altimetry for Coastal, Hydrology, and Ice) gibi çeşitli projeler geliştirilmektedir (Passaro vd., 2014; Roblou vd., 2007; Mercier 2010; Valladeau vd., 2015). Fakat buradan elde edilen ürünlerin zaman ve uzay ölçeğinde homojen olmadığı, tutarlı küresel gridlenmiş kıyısal altimetre veri tabanının oluşturulması için daha fazla çabaya ihtiyaç olduğu belirtilmektedir (Benveniste vd., 2019).

1.6. Türkiye Denizlerinin Genel Yapısı

Ülkemiz; Akdeniz, Ege, Karadeniz ve Marmara olmak üzere iklimi ve ekolojik yapısı farklı özelliklere sahip denizler ile çevrilidir. Hem Karadeniz hem de Akdeniz'e kıyısı olan tek ülke olma özelliğindedir. Adalar hariç yaklaşık 8500 km kıyı şeridinde sahiptir (Şekil 11). Bunun %33.66'sı Ege Denizi, %20.34'ü Karadeniz, %20.07'si Akdeniz'de ve %11.20'si Marmara'da bulunmaktadır. Akdeniz 30°N- 46°N enlem ve 6°W- 36°E boylamları arasında yer alan ve yaklaşık 2.500.000 km² yüz ölçümü ile ülkemiz çevresindeki en büyük denizdir. Cebelitarık Boğazı ile Atlantik Okyanusuna, Süveyş Kanalı ile Hint Okyanusuna, ülkemiz boğazları ile Karadeniz'e bağlanmaktadır (Cazenave, 2002). Ortalama derinliği 1.5 km'dir. Ege Denizi 34.6°N- 42°N enlem ve 19.1°E – 29.9°E boylamları arasında yer almaktadır. Toplam yüz ölçümü yaklaşık 215.000 km²'dir. Çanakkale Boğazı, Marmara Denizi ve İstanbul Boğazı vasıtasıyla Karadeniz'e bağlanmaktadır. Maksimum derinliği yaklaşık 3544

m'dir. Ülkemize kıyısı olan bir diğer deniz Karadeniz ise Avrupa, Anadolu ve Kafkaslar arasında uzanan 40.56°N- 46.33°N enlem ve 27.27°E- 41.42°E boylamları arasında yer alan ve Atlantik okyanus sisteminde en izole yarı-kapalı bir iç deniz konumundadır. Yaklaşık 423.000 km² yüz ölçümüne sahip olan Karadeniz, Akdeniz'in yüz ölçümünün yaklaşık beşte biridir. Kıyı şeridinin toplam uzunluğu yaklaşık 4870 km ve Türkiye, Bulgaristan, Ukrayna, Rusya, Romanya ve Gürcistan olmak üzere altı ülkeye kıyısı vardır. Maksimum derinliği ise yaklaşık 2.2 km'dir (Goriacikin ve Ivanov 2006; Oguz 2006). Sahip olduğu boğazlar nedeniyle uluslararası alanda da önemli olan Marmara Denizi, Asya ve Avrupa kıtaları arasında bulunan bir iç deniz konumundadır (Akengin ve Dölek, 2016). Marmara Denizi'nin yaklaşık yüz ölçümü 11.350 km² ve İstanbul Boğazı ile Karadeniz'e, Çanakkale Boğazı ile Ege Denizi'ne bağlanmaktadır.



Şekil 11. Türkiye Denizleri

1.6.1. Türkiye Denizlerinin İklimsel Yapısı

Türkiye'nin tektonik geçmişi, sıcak ve yarı-tropik bölgeler arasındaki konumu çeşitli iklimlerin oluşmasına neden olmuştur (Çağan vd., 2011). Türkiye, üç tarafı farklı özelliklere

sahip denizlerle çevrili bir ülkedir. Bu bölümde denizlerimizin genel iklimsel yapısı sunulacaktır.

- Akdeniz: Akdeniz iklimi tropik ve yarı-tropik sistemlerden etkilenmektedir. Aynı zamanda şiddetli yağış fırtınaları, rüzgar fırtınaları gibi yüksek etkiye sahip hava sistemlerine dönüşebilen orta ölçekli atmosferik sirkülasyon için nem ve ısı kaynağıdır (Ducrocq vd., 2018). Akdeniz’de yıllık ortalama hava sıcaklığı 16.3°C, yağış yaklaşık 726 mm/yıl ve nispi nem yaklaşık %63.2 şeklindedir (Kucuksezgin vd., 2019). Yazları subtropikal yüksek basınç sistemleri sebebiyle sıcak ve kuru koşullar hakimdir ve bu durum şiddetli buharlaşmaya neden olmaktadır. Soğuk dönemlerde nispeten ılık bir deniz halini almaktadır. Toplam yağış ise konumsal ve zamansal değişkenlik göstermektedir. Kış ayları yağışlı geçmektedir. Diğer yandan Cebelitarık Boğazı üzerinden Atlantik okyanusuna çok sınırlı akış değişimi sebebiyle Akdeniz dalga fenomenleri açısından kapalı bir havzadır (Makris vd., 2016).
- Ege Denizi: Akdeniz ikliminin temel özelliklerini içermektedir. Yıllık ortalama hava sıcaklığı 16°C ila 19.5°C arasına değişmekle beraber yağış yaklaşık 500 mm/yıl şeklindedir. Genel yapı itibariyle kuzeyden esen rüzgarlar hakimdir. İlkbahar aylarında güney-güneybatı rüzgarları, yaz aylarında ise Yunan ve Türkiye kıyılarında günlük deniz meltemleri görülmektedir (Poulos vd., 1997). Sonbahar aylarında rüzgar hızı artış göstermektedir (Vagenas vd., 2017). Kış ayları Ege kıyılarında yağışlı geçmektedir. Alçak basınç sistemleri ve Balkan yarımadası yüksek basıncı yaz ayları ve sonbahar başında Ege Denizi’nde etezyen rüzgarlarına neden olan temel iki faktördür ve bu nedenle dalga desenleri temelde rüzgar şartlarına bağlıdır (Anagnostopoulou vd., 2014). Aynı zamanda Ege Denizi’nde karmaşık dip topografyası nedeniyle çeşitli dalga rejimleri mevcuttur (Makris vd., 2016b).
- Karadeniz: Karadeniz çok geniş bir iklim sisteminin parçasıdır. İklim ıslak ve nemlidir. Havza kuzeyden gelen hava kütlelerinin etkisine maruz kalmaktadır. Bunun yanında tüm mevsimlerde yağışlıdır. Deniz yüzey sıcaklığı gözlemleri iklim değişikliği açısından Karadeniz ile ilgili son durumun anlaşılmasına yardım etmektedir (Ginzburg vd., 2004). Deniz suyu yüzey sıcaklığı hava sıcaklığına paralel olarak artmakta ve en yüksek değeri Ağustos ayında, en düşük değeri ise Şubat, Mart aylarında görmektedir (Alkan, 2004). Akdeniz üzerinden Karadeniz’e siklonlar taşınmaktadır. Rüzgarlar batı kesiminde daha fazladır ve buharlaşmayı etkilemektedir.

- Marmara Denizi: Marmara Denizi coğrafi konumu itibariyle Akdeniz makrokliması altında birbirinden farklı iklim özelliklerine sahiptir. Ülkemizi etkileyen polar ve tropikal hava kütlelerinin geçiş sahasındadır (Okay vd., 2007). Marmara Denizi'nin ılıman rüzgar iklimi topografyadan önemli ölçüde etkilenmektedir. İstanbul Boğazı ve İzmit Körfezi vadilerinin topografik yapısı da bölgesel olarak rüzgar yönü ve hızını etkileyen faktördür (Beşiktepe vd., 1994). Rüzgarlar genelde kuzey sektörlüdür ve cephe geçişleri sırasında kuvvetli lodos meydana gelmektedir. En düşük deniz yüzeyi sıcaklığı Ocak ayı, en yüksek ise Ağustos ayı boyunca görülmektedir (Beşiktepe, 1991). Bölgeden özellikle karasallık, denizellik, yükselti ve bakı faktörlerine bağlı olarak farklı alt tipler mevcuttur. Marmara Bölgesi'nde yıllık ortalama sıcaklıklar 6°C ila 14°C arasında değişmektedir. Yağışların büyük bir bölümü ise kış aylarında düşmektedir. Genel olarak bakıldığında, Marmara'nın Karadeniz ve Akdeniz iklimleri arasında geçiş özelliği gösterdiği görülmektedir (Okay vd., 2007).

1.6.2. Türkiye Denizlerinin Oşinografik ve Hidrolojik Yapısı

Bu bölümde denizlerimizin oşinografik ve hidrolojik yapısına dair genel bilgiler verilecektir.

- Akdeniz: Akdeniz yarı kapalı bir havzadır. Havza fiziksel ve biyokimyasal özellikleri farklılık gösteren üç ana su kütesine sahiptir. Yüzeyde yaz aylarındaki ısınma ve buharlaşma ile meydana gelen daha tuzlu ve daha sıcak su kütesi varken bu kütlenin altında düşük sıcaklık (15°C) ve tuzlulukta (%36.5-%38.5) Atlantik suları bulunmaktadır. Dolaşım sistemine bakıldığında Akdeniz'in farklı yönlerden dağılan akıntılar ve bu akıntılardan kaynaklı küçük döngülerden oluştuğu görülmüştür. En önemlileri; Rodos Basenini kapsayan Rodos siklonik döngüsü ve bu basinin güneyinde bulunan Mersa matruh antisiklonik döngüsü gösterilmektedir (Oğuz ve Tuğrul, 1998). Akıntı sistemi ile beraber havzanın suyu Cebelitarık Boğazı'ndan Atlantik Okyanusu'na ulaşmaktadır. Akdeniz'den gelerek boğaza ulaşan alt tabaka suları, boğazdaki her iki uçta bulunan eşiklerden geçerken üst katman sularına karışmakta ve incelmeye uğramakla beraber tuzluluk miktarı azalmaktadır. Deniz suyunun tuzluluğu en yüksek değere sonbahar mevsiminde ulaşmaktadır. Havzada buharlaşma oranı genellikle tatlı su girdisinden daha fazladır. Özellikle Cebelitarık

Boğazı'nın Akdeniz sularının verimliliğinde büyük bir öneme sahip olduğu bilinmektedir. Su bütçesinin yine Cebelitarık Boğazı ile olan su alışverişi sayesinde dengelendiği düşünülmektedir. Deniz suyu sıcaklığının en düşük olduğu zamanlarda, sular rüzgarın etkisiyle soğumakta ve buharlaşma sonucu tuzluluğu artan suların dikey konveksiyon hareketleri ile daha derine doğru çökmesi sonucu ara tabaka suları oluşmaktadır (Soydemir Çiftçi, 2011). Yüzeydeki yaklaşık 150-200 km'lik bölümde kış aylarındaki sıcaklık 15°C-16°C civarında olup yaz aylarında ise 20-25 m'lik bölümde 25°C'ye yükselmektedir (Oğuz ve Tuğrul, 1998). 2020 yılı Akdeniz ortalama deniz suyu sıcaklığı 22.2°C olarak gerçekleşmiştir (URL-10, 2022). Tuzluluk oranı ise %38 seviyesindedir.

- Ege Denizi: Ege Denizi karmaşık kıyı geometrisine sahip olmakla beraber büyüklükleri değişen çok sayıda adacık içermektedir. Güney kısmında bulunan Girit Havzası 2000 m'yi aşan derinlikler ile Ege Denizi'nin en derin bölgesi olmaktadır (Oğuz ve Tuğrul, 1998). Ege Denizi'nin oşinografik sirkülasyonuna bakıldığında, genel olarak siklonik olduğu ortaya koyulmuştur. Birbirinden farklı özelliklere sahip Akdeniz ve Karadeniz'in etkisi altındadır. Kuzey Ege'de yüzeyde Karadeniz sularının etkisi varken, orta tabakada Doğu Akdeniz sularının etkisi görülmektedir (Zervakis ve Georgopoulos, 2002). Yıl boyunca Ege Denizi'nden Marmara Denizi alt tabakasına bir oksijen girdisi olmaktadır. Yıllık buharlaşma ile olan su kaybı Karadeniz ve Marmara Denizi'nin aksine nehir ve yağıştan kaynaklanan girdilerden daha çoktur. Karadeniz'den gelen ve Çanakkale Boğazı üzerinden Ege Denizi'ne dökülen düşük tuzlu su girdisi dikkate alındığında ise Ege Denizi'nde fazladan bir su bütçesi varlığından söz edilebilmektedir (Oğuz ve Tuğrul, 1998). Ege Denizi'nde en yüksek su sıcaklıkları Ağustos ayında, en düşük su sıcaklıkları ise Şubat ayında görülmektedir. Ege'de yıl içerisindeki yüzey suyu sıcaklığı 13°C ve 24°C arasında değişiklik göstermektedir. En düşük su sıcaklıkları Şubat ayında, en yüksek su sıcaklıkları ise Ağustos ayında meydana gelmektedir. 2020 yılı Ege Denizi ortalama deniz suyu sıcaklığı 19.2°C olarak gerçekleşmiştir (URL-10, 2022). Tuzluluk genellikle kuzey-güney yönünde bir değişim göstermektedir ve kuzeyden güneye doğru gidildikçe artmaktadır. Tuzluluk oranına bakıldığında ise %35 seviyesinde olduğu görülmektedir. Rüzgarlar ise temelde kuzey yönden eserken ilkbahar mevsiminde bazen güney, güneybatı rüzgarları yaşanmaktadır (Kucuksezgin vd., 2019). Su hareketlilikleri kararsız ve meteorolojik koşullara bağlı olarak daha

değişkendir. Ege Denizi yüzey sularının akıntı sisteminin siklonik olduğu düşünülmektedir. Akdeniz'den gelen sular ülkemizin batı sahilleri boyunca kuzeye doğru hareket ederken, Çanakkale Boğazı'ndan gelen sular önce Ege Denizi'nin kuzeyinde batı/kuzeybatı yönünde, daha sonra Doğu Yunanistan kıyıları boyunca güneye doğru hareket etmektedir (Soydemir Çiftçi, 2011). Bölgenin meteorolojik koşullarına göre Karadeniz yüzey suları bazen güneye dönmekte ve genel siklonik akıntının tersi yönünde olmaktadır. Diğer yandan besin elementeri açısından fakirdir. Ege Denizi'nin derin sularında fosfat ve nitrat derişimleri oldukça düşüktür (Oğuz ve Tuğrul, 1998). Her ne kadar azot ve fosfor seviyeleri genel olarak düşük olsa da bazı bölgelerde Akdeniz'den daha yüksek besin miktarına sahiptir. En yüksek besin seviyesi ve klorofil-a İzmir ve Aliğa koylarında gözlemlenmiştir (Kucuksezgin vd., 2019).

- Karadeniz: Karadeniz; Asya ve Avrupa kıtaları arasında yer alan yarı kapalı iç deniz konumundadır. Yaklaşık 1000 km uzunluğa ve 400 km genişliğe sahiptir. Diğer yandan Karadeniz dünyanın en büyük oksijensiz havzasıdır. İki tabakalı su kütlesi sisteminden kaynaklı olarak neredeyse tamamen oksijensiz durumda olup havzada ancak ortalama 150 m derinliğin üzerinde oksijen varlığından söz edilmektedir. Havzanın oşinografisi; nehirlerden gelen tatlı su girdileri, atmosferik zorlamalar, boğazlardaki geçişler ve topoğrafyadaki değişimler gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir (Özsoy ve Ünlüata, 1997). Karadeniz'de tatlı su girdisinin buharlaşma nedeniyle oluşan su kaybından fazla olması en önemli oşinografik özelliklerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Boğazların açılmasıyla Akdeniz'den gelen tuzlu suların Karadeniz'e akması ile bir yoğunluk tabakalaşması başlamıştır (Oğuz ve Tuğrul, 1998). Kış mevsiminde tatlı su girdisinde yaşanan azalma ile yüzey tuzluluğunda artış yaşanmaktadır. Karadeniz'in konumu sebebiyle havzasındaki buharlaşma miktarı Akdeniz havzasındakinden daha azdır. Nehir deşarşı ve yağış buharlaşma ile dengelenmemekte ve Karadeniz'den boğazlara doğru tuzlu suların çıkışına neden olmaktadır (Jarosz vd., 2011). Bu tatlı su fazlasının 200 km³/yıl ve 300 km³/yıl arasında olduğu tahmin edilmektedir. Karadeniz ve Marmara denizi arasındaki ortalama değişim iki katmanlı hidrolik taşıma tarafından kontrol edilmektedir. Bunlar; üst katman düşük tuzluluk dışarıya akış, alt katman ise yüksek tuzluluk içeriye akıştır (Ünlüata vd., 1990). Her iki katmanda en fazla akış genellikle ilkbaharda görülürken boğazdaki en düşük hacimli taşımalar ise sonbaharda

kaydedilmektedir (Tuğrul vd., 2002). Karadeniz havzasındaki dolaşım, havzanın merkezinin doğu ve batı bölümlerindeki büyük siklonik döngülerle nitelendirilmektedir. Havzanın en önemli ayırt edici özelliklerinden biri de Ege ve Doğu Akdeniz'e göre düşük trofik seviyelerde yüksek biyolojik aktiviteye sahip olmasıdır (Kucuksezgin vd., 2019). Diğer yandan besin tuzları bakımından zengin bir denizdir. 2020 yılında Karadeniz'in ortalama deniz suyu sıcaklığı 16.3°C olarak gerçekleşmiştir (URL-10, 2022). Tuzluluk oranı ise ‰18 seviyesindedir. Nehir suyunu geniş Asya akarsu sistemlerinden toplamaktadır. Bunun yanında yıl içerisinde fazlaca yağış almaktadır. Havzadaki buharlaşma miktarı azdır ve bu nedenle suyu daha düşük bir yoğunluğa sahiptir. Karadeniz, sularının çok sıcak olmaması ve buharlaşmanın az olması ile organik madde bakımından zengin olmuştur. Bunun sonucunda da zengin bir canlı hayatı ortaya çıkmıştır.

- Marmara Denizi: Marmara Denizi yaklaşık olarak 240 km uzunluğa ve 70 km genişliğe sahip olan küçük bir havzadır. Kıtalar arası bir iç deniz konumunda olan Marmara denizi, Ege ve Karadeniz'e iki boğaz ile bağlanmıştır. Akdeniz ve Karadeniz sularının geçişini sağlayan iki katmanlı akıntı rejimine sahiptir ve bu iki farklı su tabakasının özelliklerini barındırmaktadır. Tuzluluk oranı yüksek olan Akdeniz suyunun, alt tabaka olarak Karadeniz'e taşınmasında ve tuzluluk oranı düşük olan Karadeniz suyunun Ege Denizi'ne taşınmasında rol oynamaktadır. Bu iki farklı su tabakası yaklaşık olarak 25 m derinlikte bulunan bir ara yüzey ile birbirinden ayrılmaktadır. Karadeniz'den gelen nehir suları ile tatlanan suların oluşturduğu yüzey suyu en üst tabakayı oluşturmaktadır. Bu tabakanın tuzluluğu Karadeniz'den gelen tatlı su miktarına bağlı olarak değişmekle birlikte tuzluluk oranı ‰36 seviyesindedir. Ege Denizi'nden Çanakkale Boğazı ile gelen sular ise alt tabakayı oluşturmaktadır. Yenilenme sürelerine bakıldığında alt tabaka sularında 6-7 yıl, üst tabaka sularında ise 4-5 ay olduğu görülmektedir. Marmara Denizi'nin akıntı özelliklerine bakıldığında, Karadeniz'den Akdeniz sularına doğru olan yüzey akıntısının Marmara'ya yüzey jeti şeklinde girerek akımın kuvvetli ve rüzgarın etkisinin düşük olduğu zamanlarda güney yönünde ilerlediği görülmüştür (Beşiktepe vd., 1994). Marmara üst tabakasının biyokimyasal özelliklerinde alt tabakadan gelen dikey karışım ve Karadeniz'den gelen girdilerin etkisi görülmektedir (Polat ve Tuğrul, 1995). En düşük hava sıcaklığı Ocak ayında, en yüksek hava sıcaklığı ise Temmuz ayında görülmektedir. 2020 yılı ortalama Marmara deniz suyu sıcaklığı

18°C olarak gerçekleşmiştir (URL-10, 2022). Marmara denizinin hidrolojisi temelde boğazlar yönündeki değişikliğe bağlıdır. Yaklaşık 25 m derinlikte yoğunluk arayüzeyi yanındaki havzalardan kaynaklı olarak iki farklı kütle tipine ayrılmaktadır (Beşiktepe vd.,1994). İstanbul Boğazı yoluyla Karadeniz'den gelen veya Marmara'nın kendisinden ve insan kaynaklı kirlenmelerden kaynaklı olarak alt tabaka sularındaki oksijen oranı azalmaktadır. Sadece Ege denizinden gelen sular bir miktar oksijenleşmeyi sağlamaktadır.

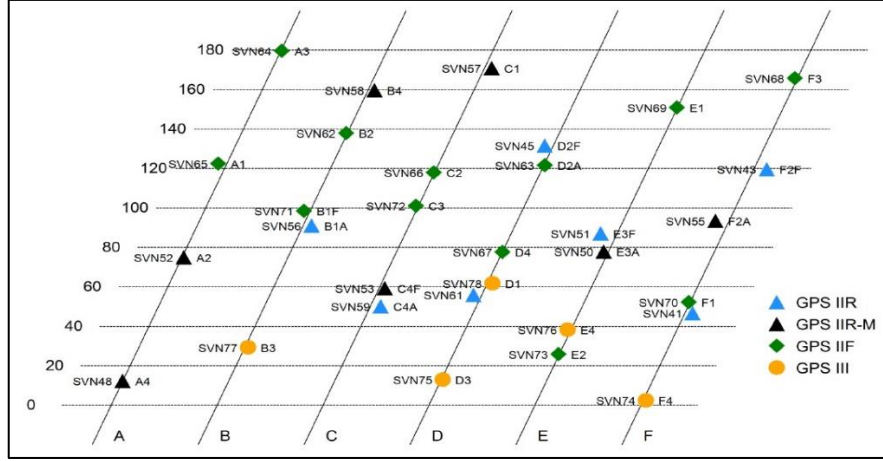
1.7. Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (GNSS)

1.7.1. GNSS Genel Yapısı

Dünya'yı keşfetmek için 13. yüzyıldan beri sürekli olarak yeni teknolojiler geliştirilmektedir. Navigasyona yönelik yapılan ilk çalışmalarda gözlemcinin enlemini belirlemek için güneşin eğimi ölçülmüştür. Fakat doğru navigasyon bilgisi 18. yüzyılın ikinci yarısına kadar henüz çözüme ulaşmamış bir problem olarak kalmıştır. Radyonun icat edilmesi ile navigasyona yönelik yeni bir adım atılmıştır. 20. yüzyılın başlarında ise kablosuz telegraflar zaman sinyalinin gemilere iletilmesine izin vermiştir. Zamanla farklı teknolojilerin geliştirilmesi ile daha hassas görüş hattına sahip radyo navigasyonuna zemin hazırlanmıştır. GNSS geniş kapsamlı, yüksek duyarlıklı ve her türlü hava koşulunda sürekli gözlem yapabilen uydulardan oluşan ve anlık konum, zaman ve hız bilgilerini üreten bir sistemdir. Amerika Birleşik Devletleri'ne (ABD) bağlı GPS, Rusya Federasyonu'na bağlı GLONASS, Avrupa Birliği himayesinde Galileo ve Çin'in BDS olmak üzere dört farklı GNSS sistemi şu anda faaliyettedir. Bunların yanında küresel olmayan, Japonya'nın QZSS ve Hindistan'nın NAVIC (Navigation with Indian Constellation) bölgesel GNSS sistemleri mevcuttur. GNSS sisteminin başlangıcı olarak sayılan ilk yapay uydu Sputnik 1'in 04 Ekim 1957 tarihinde uzaya fırlatılması uzay jeodezisinin gelişimi açısından önemli bir yere sahip olmuştur. Bu gelişme jeodezide uzay çağının başlangıcı kabul edilmiş ve geleceğin teknolojilerinin temeli oluşturulmuştur. Sputnik 1 uydusundan yayınlanan sinyaller ile gözlemler yapılabilmesi sonucunda yapay uydular vasıtasıyla alınan sinyallerdeki bilinen uydu konumlarının ve zaman bilgilerinin navigasyon amaçlı kullanılabileceği düşünülmeye başlanmıştır. Bunun üzerine Aralık 1958'de Transit-I uydusu ortaya çıkmıştır. ABD Savunma Bakanlığı tarafından desteklenen bu proje, 1959 yılında TRANSIT adı altında

sunulmuştur. Yeryüzünden yaklaşık 1100 km uzaklıkta bulunan ve 6 uydudan oluşan bu sistemin ana amacı askeri kullanımdır. Sistemin jeodezik konum belirleme amaçlı kullanılmaya açılması 1967 yılına dayanmaktadır. Yıllar içerisinde yaşanan hızlı gelişmelerle birlikte TRANSIT sistemindeki bazı zayıflıkları ortadan kaldırmak için geliştirilen ve 1980’li yılların en önemli ürünlerinden biri olan GPS insan hayatına girmiştir (Kahveci ve Yıldız, 2018; Bonnor, 2012).

GPS: ABD tarafından geliştirilen GPS, tam çalışma kapasitesine sahip ilk navigasyon sistemidir. Dünyanın herhangi bir yerinde GPS alıcısı olan bir kullanıcının her türlü hava koşulunda 24 saat boyunca konum, hız ve zaman bilgisine erişimini anlık olarak sağlamaktadır. Yaklaşık 20.200 km yükseklikte, Orta Uzaklıklı Yörüngede (Medium Earth Orbit, MEO) bulunan ve altı farklı yörünge düzlemine yerleştirilmiş, her biri ekvatorla 55° eğimli uydulara sahiptir. Haziran 2022 itibarıyla toplam 31 tane GPS uydusu aktif olarak kullanılmaktadır. Bu uydular mevcut ve gelecek nesil özelliklerine göre; Block IIR, Block IIR-M, Block IIF ve GPS III/IIIF olmak üzere beş gruba ayrılmaktadır. GPS uydularının ilk versiyonlarından olan Block IIA uyduları 2019 yılında kullanıma kapatılmıştır. Block IIR (R: yerine koyma/ replacement) uyduları 1997 yılında yörüngeye oturtulmuştur. L1 frekansı üzerinden C/A kodu ve P(Y) kodunu sunmaktadır. Bunun yanında P(Y) kodu L2 frekansı üzerinden de yayımlanmaktadır. Sekiz Block IIR uydusu modernize edilerek Block IIR-M (M: değiştirilmiş/ modified) şeklinde adlandırılmıştır. Block IIR-M uyduları ilk kez 2005 yılında L2 (L2C) frekansı üzerinden yeni bir sivil sinyal yayımlamıştır. Mevcutta yedi adet Block IIR-M uydusu çalışmaktadır. İlk Block IIF (F: devam/follow on) uydusu Mayıs 2010 tarihinde yörüngeye yerleştirilmiştir. Günümüzde on iki adet Block IIF uydusu kullanımda olup L5 frekansındaki üçüncü sivil sinyal bu uydular ile yayımlanmaktadır. Devam eden modernizasyon çalışmaları ile birlikte 2018 yılından itibaren GPS III/IIIF uyduları fırlatılmaya başlanmıştır. Geliştirilmiş sinyal doğruluğu ve güvenilirliği sağlayan GPS III /IIIF uyduları ile L1 (L1C) frekansı üzerinden dördüncü sivil sinyal sağlanmaktadır (URL-11, 2022). Haziran 2022 itibarıyla aktif olarak kullanılan GPS uyduları Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12. GPS yörünge düzlemleri ve aktif uyduları (URL-15, 2022)

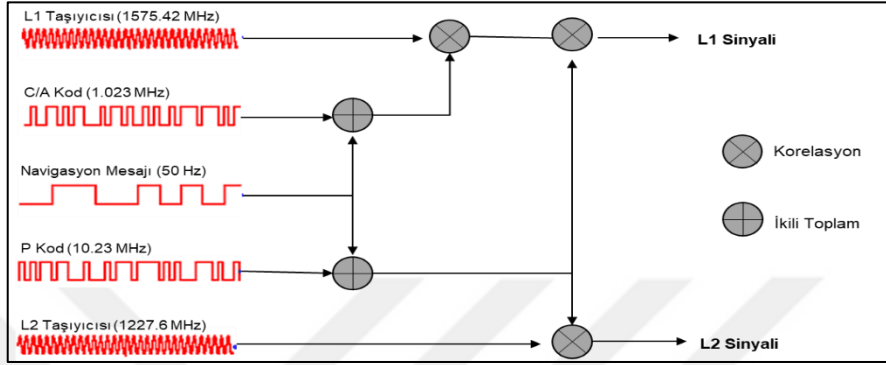
Elektromanyetik dalgalar vasıtasıyla GPS uydularından yeryüzünde bulunan alıcılara veri akışı sağlanmaktadır. Konum belirleme amaçlı olarak her bir GPS uydusu L1 (1575.42 MHz) ve L2 (1227.60 MHz) olmak üzere iki temel frekansa sahiptir. Zaman içerisinde gerçekleştirilen GPS sisteminin modernizasyonu ile yeni nesil uydulara L5 (1176.45 MHz), L1C ve L2C olmak üzere üç yeni sivil sinyal eklenmiştir. Tablo 2’de GPS sinyalleri ve yayımlandıkları uydular gösterilmiştir.

Tablo 2. GPS uyduları ve sinyalleri

Block	Uydu Sayısı	Frekans (MHz)		
		L1	L2	L5
IIR	7	Var	Var	Yok
IIR-M	7	Var	Var	Yok
IIF	12	Var	Var	Var
GPS III/IIIF	5	Var	Var	Var

GPS taşıyıcı frekansları, kodlarla ve navigasyon mesajı verileri ile modüle edilerek yörünge parametreleri ve uydu saat düzeltmeleri gibi bilgilerin yeryüzündeki alıcılara ulaştırılabilmesini sağlamaktadır. Modülasyonda her bir uydu için tek anlamlı PRN (Pseudo Random Noise) kod numarası kullanılmıştır. Her uyduya ait PRN kodu tek anlamlı ve diğerlerinden bağımsız olması sebebiyle uydu sinyalleri birbirinden kod bölmeli çoklu

erişim (Code Division Multiple Access, CDMA) tekniği ile ayırt edilmektedir. L1 taşıyıcı frekansı üzerine C/A kod, P kod ve navigasyon mesajı; L2 taşıyıcı frekansı üzerine P kod ve navigasyon mesajı modüle edilmiştir (Teunissen ve Montenbruck, 2017). Şekil 13'te GPS uydu sinyali yapısı gösterilmektedir.



Şekil 13. GPS uydu sinyali yapısı

GLONASS: GLONASS Rusya Federasyonu tarafından geliştirilmiştir. Sistemle ilgili ilk test uçuşu çalışmaları Ekim 1982 yılında başlamış olup 1993 yılında resmi olarak faaliyete geçmiştir. 1995 yılına gelindiğinde ise ekvatorla 64.8° eğimli 24 uydu ile tam kapasite kullanıma sunulmuştur. 1990 yılında uzay çalışmaları için verilen bütçenin azalması ile GLONASS uydularının bakım ihtiyacı karşılanamamış ve 2002 yılında sadece 7 adet GLONASS uydusu aktif olarak çalışır halde kalmıştır. Zaman içerisinde daha uzun ömürlü yeni nesil uyduların tasarlanması ile 2011 yılında GLONASS yeniden 24 uyduya ulaşmıştır. Ağustos 2022 itibarıyla, toplam uydu sayısı yirmi altı olup bunların yirmi ikisi çalışır durumda, üçü bakımda, biri ise devreye alma aşamasındadır (URL-13, 2022). GLONASS koordinat sistemi PZ-90 (Parametri Zemli 1990) olarak adlandırılmaktadır. Bu sistemde de C/A kod, P kod ve navigasyon mesajı uyduların taşıyıcı frekanslarına modüle edilmiştir. Sinyal yapısına bakıldığında, GPS'in sinyal yapısında kullanılan CDMA'nın aksine frekans bölmeli çoklu erişim (Frequency Division Multiply Access, FDMA) tekniği kullanılmaktadır. Bu teknikte bant kanallara bölünerek farklı frekanslar elde edilmektedir. Uydular bu farklı frekanslara göre ayırt edilmektedir (Cai, 2009). Her bir uydu için L1 ve L2 bantlarında taşınan sinyallerin frekans değerleri k kanal numarasına göre aşağıda verilen eşitlik yardımıyla hesaplanmaktadır (Teunissen ve Montenbruck, 2017).

$$f_{L1}(k) = (1602 + k \cdot 0.5625) \text{ MHz} \quad (3)$$

$$f_{L2}(k) = (1246 + k \cdot 0.4375) \text{ MHz}$$

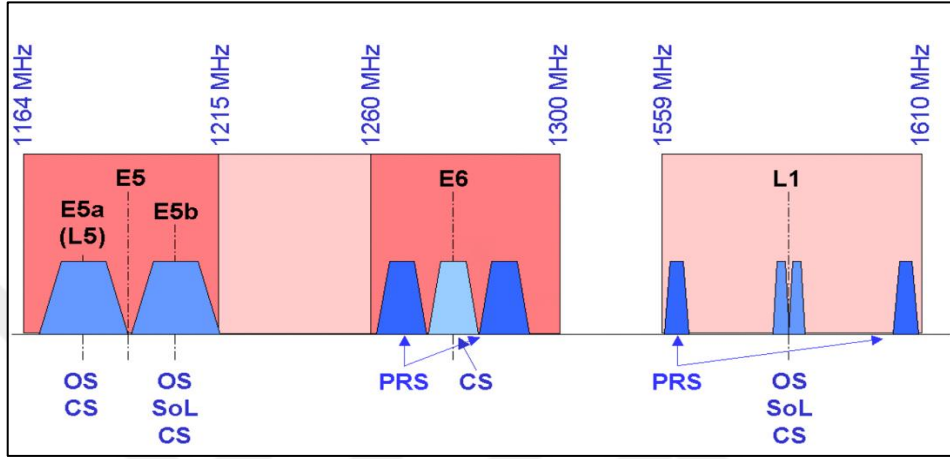
FDMA tekniğinde kod ve faz donanımında beklenmedik hataların sistem karmaşıklığını artırması nedeniyle, devam eden GLONASS modernizasyonu kapsamında GLONASS-K uyduları ile CDMA sinyal yapısına sahip L3 (1202.025 MHz) sinyali 2011 yılında kullanıma sunulmuştur (Teunissen ve Montenbruck, 2017). Tablo 3'te GLONASS uydu nesilleri ve sinyal yapıları sunulmuştur.

Tablo 3. GLONASS uyduları ve sinyalleri

Nesil	Frekans (MHz)		
	FDMA		CDMA
	L1	L2	L3
M	Var	Var	Yok
K	Var	Var	Var
K-2	Var	Var	Var

Galileo: Avrupa'nın GNSS sistemi Galileo, GPS sisteminin Avrupa kaynaklı alternatifi olarak tasarlanmıştır. Sistem, Avrupa Birliği ve Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından ortaklaşa finanse edilmektedir. İlk olarak 2005 yılında GIOVE-A ve 2008 yılında GIOVE-B olarak adlandırılan iki adet test uydusu fırlatılmıştır. Sistemin ilk iki işlevsel uydusu ise 21 Ekim 2011 tarihinde fırlatılmıştır (URL-14, 2022). İlerleyen yıllarda Tam Operasyonel Kapasite (Full Operational Capability, FOC) aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada fırlatılan FOC uyduları ile uydu takımının tamamlanması planlanmıştır. Sistemin üç yörünge düzleminde, ekvatorla 56° eğime sahip ve yerden yüksekliği 23.222 km olacak şekilde otuz uydudan oluşması planlanmıştır. Ağustos 2022 itibarıyla, yirmi bir adet Galileo uydusu aktif olarak kullanılmaktadır. Her bir Galileo uydusu on farklı navigasyon sinyali yayımlamaktadır. Bu sinyallerin altısı tüm kullanıcılara açık sivil hizmet (Open Service, OS) ve acil durum ve güvenlik hizmetleri (Safety-of-Life, SOL) için, ikisi ticari kullanıcılar (Commercial Service, CS) ve diğer ikisi kamu kurum ve kuruluşlarına (Public Regulated Service, PRS) için ayrılmıştır. Başlangıçta sistemin E1, E5 ve E6 olarak adlandırılan üç

farklı frekans bandında hizmet vermesi düşünülmüştür. Zamanla L bandı E1 olarak adlandırılmış olup E5 sinyalleri de E5a ve E5b olarak ayrılmıştır. Sistem GPS’de olduğu gibi CDMA tekniğini kullanmaktadır. Şekil 14’te Galileo sisteminde kullanılan frekanslar gösterilmiştir.



Şekil 14. Galileo sinyal frekansları (URL-15, 2022)

BDS (BeiDou Navigation Satellite System): Çin hükümeti tarafından ülkenin ulusal güvenliği, sosyal ve ekonomik ihtiyaçları göz önünde bulundurularak geliştirilen ve işletilen bağımsız bir sistemdir. Sistemin geliştirilme fikri 1980’li yıllara dayanmaktadır. Üç aşamalı bir planlama ile sistem geliştirme stratejisi kurulmuştur. Birinci aşama olan BDS-1 ile Beidou-1A ve Beidou-1B olarak adlandırılan iki adet deneysel uydu Ekim 2000 ve Aralık 2000 tarihlerinde sırasıyla uzaya fırlatılmıştır. 2003 yılında Beidou-1C üçüncü deneysel uydusunun yörüngeye yerleştirilmesi ile bu aşama tamamlanmıştır (Zhao vd., 2022). Diğer yandan, 2004 yılında ikinci aşama olan BDS-2’ye ilişkin çalışmalara başlanmıştır. 2012 yılına kadar Asya-Pasifik bölgesini içerecek şekilde yer sabit yörüngede (Geostationary Earth Orbit, GEO) beş uydu, eğimli yer senkronize yörüngede (Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO) beş uydu ve MEO’da dört uydu olmak üzere toplam on dört uydu ile tam operasyonel statüye ulaşmıştır. Son aşama olan BDS-3 ise küresel anlamda hizmet sağlama amacı içermektedir. Sistem resmi olarak 31 Temmuz 2020 tarihinde devreye alınmıştır. Üç adet GEO, 3 adet IGSO ve 24 adet MEO uydusu olmak üzere toplam otuz uydudan oluşmaktadır. Ağustos 2022 itibarıyla 48 adet BDS uydusu bulunmaktadır. BDS sinyal yapısına bakıldığında GPS, GLONASS ve Galileo sistemlerinde olduğu gibi CDMA tekniği

kullanıldığı görülmektedir. BDS-2 uyduları B1 (1561.098 MHz), B2 (1207.14 MHz) ve B3 (1268.520 MHz) frekans bantlarında B1I, B2I ve B3I sinyallerini yayımlamaktadır. BDS-3 uyduları ise B1, B2 ve B3 frekans bantlarında B1I, B1C (1575.420 MHz), B2a (1176.450 MHz), B2b ve B3I navigasyon sinyallerini içermektedir. Tablo 4’da BDS uydu tipi, uydu sayısı ve navigasyon sinyalleri verilmektedir (URL-16, 2022).

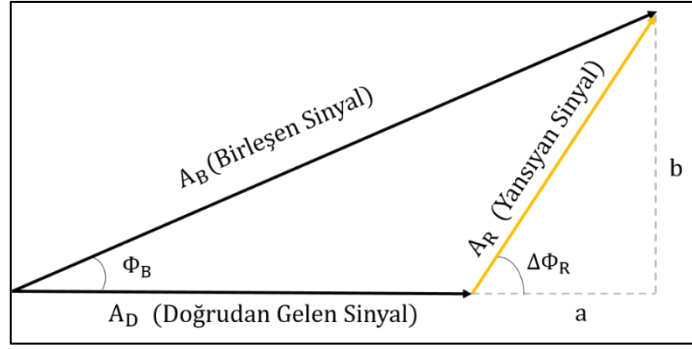
Tablo 4. BDS Uyduları ve sinyalleri

Uydu Tipi	Yörünge	Uydu Sayısı	Navigasyon Sinyali					
			B1I	B2I	B3I	B2a	B2b	B1C
BDS-2	GEO	5	Var	Var	Var	Yok	Yok	Yok
	IGSO	7	Var	Var	Var	Yok	Yok	Yok
	MEO	3	Var	Var	Var	Yok	Yok	Yok
BDS-3	GEO	3	Var	Yok	Var	Yok	Yok	Yok
	IGSO	3	Var	Yok	Var	Var	Var	Var
	MEO	24	Var	Yok	Var	Var	Var	Var

1.8. GNSS Sinyal Yansıma Etkisi

1.8.1. Yansıyan GNSS Sinyali

GNSS antenleri uydudan gelen doğrudan gelen sinyalleri almak ve GNSS istasyonunun etrafından gelen beklenmedik yansıyan sinyalleri bastırmak üzere tasarlanmıştır. Fakat yansıyan GNSS sinyallerinin bir kısmı daima antene ulaşmakta ve doğrudan gelen sinyalle girişim oluşturmaktadır. Bu durumda ortaya çıkan etkiye sinyal yansıması (multipath) adı verilmektedir. Sinyal yansıması, açık görüş hattından (Line-of-Sight, LOS) gelen sinyal ve bir veya birden fazla kez yakınlardaki engellerden yansıyarak gelen sinyallerin (Non-Line-of-Sight, NLOS) bileşkesidir (Braasch, 2017). Kısacası doğrudan gelen ve yansıyan sinyalden oluşmaktadır.



Şekil 15. Doğrudan gelen sinyal, yansıyan sinyal ve birleşen sinyal vektör diyagramı

Şekil 15'te doğrudan gelen sinyal, yansıyan sinyal ve bunların birleşiminden oluşan sinyal vektör diyagramı ile gösterilmiştir. A_B ; doğrudan gelen sinyal (A_D) ve yansıyan sinyalin (A_R) toplamı olan birleşen sinyalin genliği, $\Delta\Phi_R$; doğrudan gelen sinyal ve yansıyan sinyal arasındaki faz farkı (sinyal yansıma etkisi rölatif fazı), Φ_B ; doğrudan gelen sinyal ve yansıyan sinyalin birleşiminden kaynaklanan faz hatasını ifade etmektedir. Φ_B faz hatası;

$$\tan(\Phi_B) = \frac{b}{A+a} \quad (4)$$

şeklinde olmaktadır. Burada a ve b değerleri sinyal yansıma etkisi rölatif fazından ($\Delta\Phi_R$) ve A_R genliğinden hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} a &= A_R \cos(\Delta\Phi_R) = \alpha A_D \cos(\Delta\Phi_R) \\ b &= A_R \sin(\Delta\Phi_R) = \alpha A_D \sin(\Delta\Phi_R) \end{aligned} \quad (5)$$

Burada $\alpha = A_R/A_D$ şeklinde hesaplanır. Eşitlik (5) yeniden düzenlenirse Φ_B ;

$$\Phi_B = \arctan\left(\frac{\alpha \sin(\Delta\Phi_R)}{1 + \cos(\Delta\Phi_R)}\right) \quad (6)$$

olarak ifade edilir. Birleşen sinyal ise,

$$A_B^2 = (A_D + \alpha A_D \cos(\Delta\Phi_R))^2 + (\alpha A_R \sin(\Delta\Phi_R))^2 \quad (7)$$

$$\Delta\Phi_R(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{d_h}{\cos(e^R)} [1 - \cos(e^S)(t)\cos(e^R)\cos(az^S(t) - az^R) - \sin(e^S)(t)\sin(e^R)] \quad (9)$$

şeklinde olmaktadır.

Yüksek doğruluklu konumlamada büyük hata kaynaklarından biri olarak gösterilen sinyal yansıma etkisi GNSS gözlemlerinin bozulmasına neden olmaktadır. Bu etkinin modellenmesi ve azaltılmasına yönelik bilim dünyasında birçok çalışma yapılmaktadır (Georgiadou ve Kleusberg 1988; Eloegui vd., 1995; Bilich vd., 2008; Lu vd., 2021; Moradi vd., 2015). Martin-Neira (1993) tarafından, Pasif Reflektometri ve İnterferometri Sistemi (Passive Reflectometry and Interferometry System, PARIS) için okyanusların uzaktan algılanmasında yansıyan GNSS sinyallerinin kullanılmasının tanıtılmasının ardından yersel ve uydu tabanlı GNSS-R araştırma alanının gelişmesinin temelleri atılmıştır. Bu çalışmadan alınan motivasyonla yansıyan sinyalleri kullanarak yeryüzünün uzaktan algılanmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Katzberg ve Garrison (1996), okyanuslarda daha iyi bir iyonosferik düzeltme sağlamak için GPS sinyal yansımalarının kullanılmasını önermiştir. Ayrıca Katzberg vd., (1999) okyanus yüzeyi üzerindeki hava araçlarının yüksekliğini tahmin etmek için GPS sinyal yansımalarından bazı örnekler sunmuştur. Yansıyan GNSS sinyali, uzaydan ilk kez 2003 yılında UK Disaster Monitoring Constellation (UK-DMC) uydusu ile okyanusların algılanması ve buzların belirlenmesi için kullanılmıştır (Gleason, 2006). 2010 yılına gelindiğinde ise Space GNSS Receiver-Remote Sensing Instrument (SGR-ReSI) gerçek zamanlı Delay Doppler Map (DDM) oluşturulmasıyla birlikte ilk spaceborn GNSS-R olarak başlamıştır. UK-DMC'nin başarısının ardından 2014 yılında TechDemoSat-1(TDS-1) uydusu ikinci GNSS-R uydusu olarak rüzgar hızı (Asgarimehr vd., 2020; Foti vd., 2015), toprak nemi (Chew vd., 2016), deniz yüzeyi yüksekliği (Y. Zhang vd., 2022), deniz buz (Zhu vd., 2021) çalışmalarında kullanılmaya başlanmıştır. UK-DMC tecrübesi ile mikro uydu uyumlu pasif bir aletin GPS reflektometri kullanarak faydalı jeofiziksel ölçümler yapabileceği gösterilmiştir (Unwin vd., 2013). 2016 yılında ise NASA'nın Siklon Küresel Konumlama Uydu Sistemi (Cyclone Global Navigation Satellite System, CYGNSS) misyonu sekiz mikro-uydu kullanarak temel hedef olarak okyanuslardaki rüzgar hızını ölçmeye başlamıştır (X. Li vd., 2021; Ruf vd., 2013). Her bir mikro-uydu dört GPS uydusundan gelen sinyallere bağlı olarak bilgi almaktadır. Bununla birlikte son zamanlarda

CYGNSS'in toprak nemi belirleme kabiliyetini belirlemeye yönelik çalışmalar yapılmaktadır (Chew ve Small, 2018; Tang ve Yan, 2022). Son dönemde ESA'nın PRETTY (Passive REflecTomeTry and dosimetry) CubeSat uydusu başlıca deniz buzunun belirlenmesine yönelik olarak tasarlanmaktadır ve 2022 yılının ikinci yarısında fırlatılması planlanmaktadır.

1.8.2. Sinyal Polarizasyonu

GNSS sinyali elektrik ve manyetik alandan oluşan elektromanyetik bir dalgadır. Bir elektromanyetik dalga'nın polarizasyonu, elektrik ve manyetik alanın uzayda nasıl yayıldığı olarak tanımlanmaktadır (Rees, 2003). Aynı zamanda, elektrik alan vektörünün yönüne göre ifade edilmektedir. Elektrik alan vektörü iletim yönüne dik ise dikey polarizasyon, paralel ise yatay polarizasyon olarak açıklanmaktadır. Sağ El Dairesel Polarizasyonlu (Right Hand Circularly Polarised, RHCP) GNSS sinyalinin farklı elektriksel özelliklere sahip ortamlardaki yansımadan nasıl etkilendiği araştırmak için Fresnel yansımaya katsayıları kullanılabilir. Yatay (Γ_H) ve dikey (Γ_V) polarizasyon için Fresnel yansımaya katsayıları;

$$\Gamma_H = \frac{\sin\theta - \sqrt{\eta - \cos^2\theta}}{\sin\theta + \sqrt{\eta - \cos^2\theta}} \quad (10)$$

ve

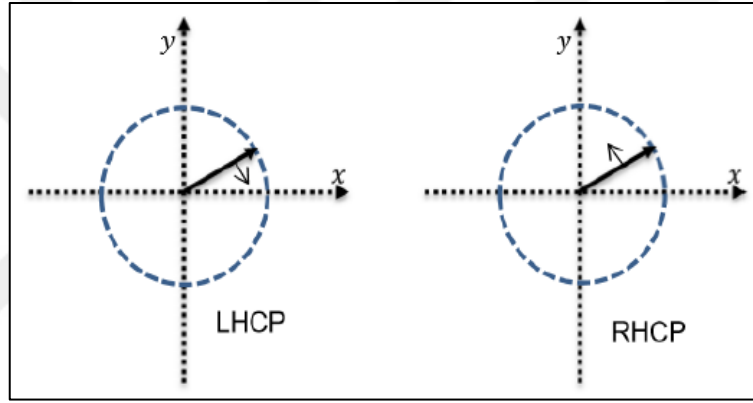
$$\Gamma_V = \frac{\eta \sin\theta - \sqrt{\eta - \cos^2\theta}}{\eta \sin\theta + \sqrt{\eta - \cos^2\theta}} \quad (11)$$

şeklinde. Burada, θ ; uydu yükseklik açısı, η ise kompleks dielektrik sabitini ifade etmektedir. Kompleks dielektrik sabiti relatif dielektrik sabiti η_r , yansıtıcı ortam iletkenliği σ ve dalga boyunun λ bir fonksiyonudur ($\eta = \eta_r - j60\lambda\sigma$). GNSS uydu sinyali dairesel polarizasyonludur. Eşitlik (10) ve Eşitlik (11)'de gösterilen doğrusal yansımaya katsayılarından eş polarizasyonlu Γ_O ve çapraz polarizasyonlu Γ_X dairesel yansımaya katsayıları;

$$\Gamma_O = \frac{\Gamma_H + \Gamma_V}{2} \quad (12)$$

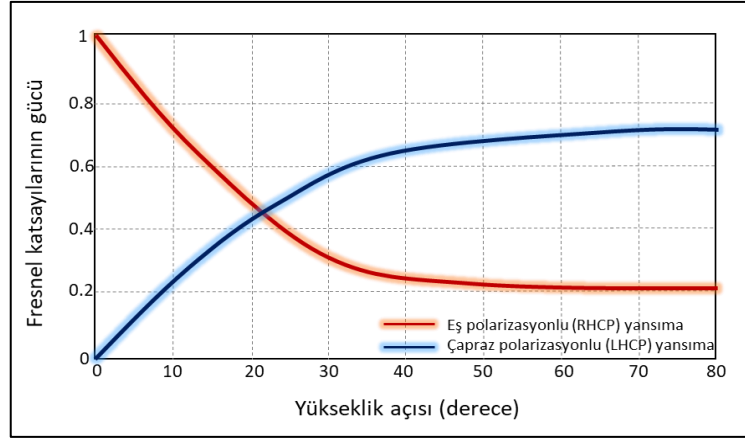
$$\Gamma_x = \frac{\Gamma_H - \Gamma_V}{2} \quad (13)$$

olarak ifade edilir. Eşitlik (12) ve Eşitlik (13)'te bulunan karmaşık değerli dairesel yansıma katsayıları yansıyan sinyalin faz ve genliğini tanımlamak için kullanılabilir. GNSS uydularından iletilen sinyaller RHCP polarizasyonlu olduğundan, eş polarizasyonlu ve çapraz polarizasyonlu bileşenler sırasıyla RHCP ve Sol El Dairesel Polarizasyonlu (Left Hand Circularly Polarised, LHCP) olarak incelenebilmektedir (Şekil 17) (Löfgren, 2014). RHCP ve LHCP enerjisinin oranları dielektrik sabiti, yansıtıcı yüzeyin iletkenliği ve uydu yükseklik açısına bağlıdır (Larson vd., 2013).



Şekil 17. LHCP ve RHCP Polarizasyonu (Al-Lawati, 2014)

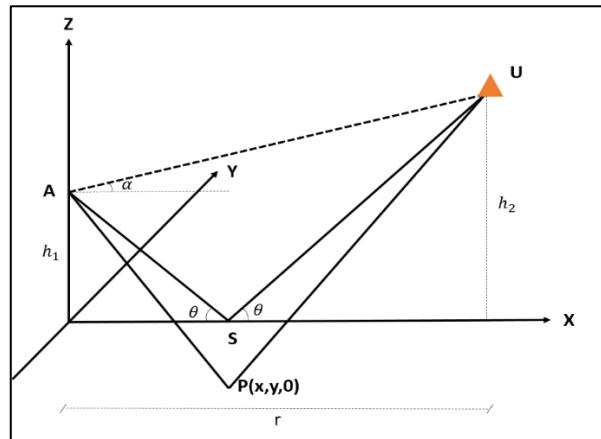
Brewster (kutuplanma) açısının altında kalan yükseklik açılarında, baskın sinyal bileşeni RHCP veya eş polarizasyonludur. Tersi durumda, yükseklik açısı Brewster açısından büyük ise baskın sinyal bileşeni LHCP veya çapraz polarizasyonludur (Şekil 18). Örneğin, yansıyan GNSS sinyalinden yararlanarak düşük yükseklik açılarında deniz seviyesi belirlemek için en uygun yaklaşım RHCP anteni kullanmak iken tersi durumda en uygun yaklaşım LHCP anteni olacaktır.



Şekil 18. GNSS sinyali için Fresnel katsayıları gücü

1.8.3. Sinyal Yansımada Yüzeyi

GNSS sinyali yansıtıcı yüzeyin geniş bir kısmını kapsadığından yüzey yansımalarının sadece tek bir geometrik noktadan meydana geldiği düşünülmemektedir. Bu durum mükemmel pürüzsüz bir yüzeye yansıyan, düzlem dalga alanı anlamına gelen speküler yansımada ile açıklanabilmektedir. Speküler yansımada bir düzlem dalga alanının sınırsızca genişleyen mükemmel düz bir yüzeye çarptığı düşünülmektedir (Egido, 2013). Şekil 19’da speküler yansımada noktası, GNSS uydusu ve alıcı arasındaki geometrik ilişki gösterilmektedir.



Şekil 19. Speküler yansımada noktası, GNSS uydusu ve alıcı arasındaki geometri (Yu, (2021)’den değiştirildi.)

Şekil 19’da A; alıcı, U; uydu, S; speküler yansıma noktası ve P saçılım noktasıdır. Burada yol uzunluğu farkı,

$$\delta_1(x, y) = (UP + PA) - (US + SA) \quad (14)$$

$$= \sqrt{(x - r)^2 + y^2 + h_2^2} + \sqrt{x^2 + y^2 + h_1^2} - \frac{r}{\cos \epsilon}$$

olarak ifade edilir. Eşitlik (14)’te θ ; grazing (süpürme) açısı olmakla beraber yansıma yüzeyinin düz olması koşulu altında yersel tabanlı alıcılar için genellikle uydu yükseklik açısı olarak alınmaktadır. Yol uzunluğu farkı dalgaboyunun yarısı olacak şekilde yeniden düzenlendiğinde,

$$\sqrt{(x - r)^2 + y^2 + h_2^2} = \frac{\lambda}{2} + \frac{r}{\cos \theta} - \sqrt{x^2 + y^2 + h_1^2} \quad (15)$$

şeklindedir. Eşitlik (15)’te her iki tarafın karesi alındığında,

$$2rx + \frac{\lambda r}{\cos \theta} + 2rh_1 \tan \theta + \frac{\lambda^2}{4} \quad (16)$$

$\frac{r}{\cos \theta} = US + SA \gg \lambda$ olduğundan, Eşitlik (16) sadeleştirilerek,

$$\sqrt{x^2 + y^2 + h_1^2} = x \cos \theta + h_1 \sin \theta + \frac{\lambda}{2} \quad (17)$$

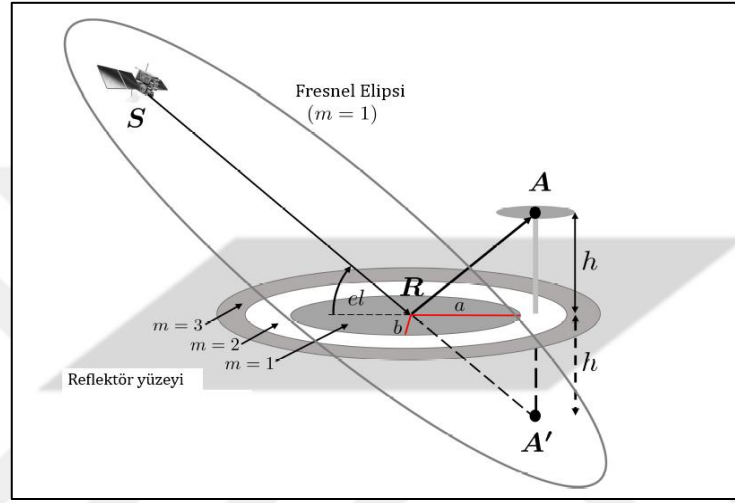
olarak ifade edilir. Eşitlik (17)’de her iki tarafın karesi alınıp denklem yeniden düzenlendiğinde,

$$\frac{(x - x_c)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (18)$$

şeklinde elips denklemi elde edilir. Burada, $(x_c, 0)$ elipsin merkezidir (Yu, 2021).

Speküler yansımanın dalga optikleri kullanılarak gerçekçi bir şekilde modellenmesi yapılabilmektedir. Huygens-Fresnel ilkelerine göre, yüzeye çarpan dalganın her bir noktası ikincil küresel dalganın potansiyel kaynağı olarak davranmaktadır. Sonrasında yansıyan

sinyal tüm ikincil küresel dalgaların toplamı olmaktadır ve enerjinin büyük bir bölümü speküler noktayı çevreleyen bir yüzey üzerinde bulunan kaynak noktadan gelmektedir. Bu kaynak iki boyutlu parlak bölge veya Fresnel bölgesi olarak tanımlanmaktadır (Lan Vu, 2019). Düşük yüzey pürüzlülüğünde meydana gelen speküler yansımalar için genellikle yansıyan sinyal gücünün çoğunun Birinci Fresnel bölgesinden (First Fresnel Zone, FFZ) geldiği varsayılmaktadır (Şekil 20).



Şekil 20. GNSS sinyalinin Fresnel Bölgesi (Zimmermann vd., 2019)

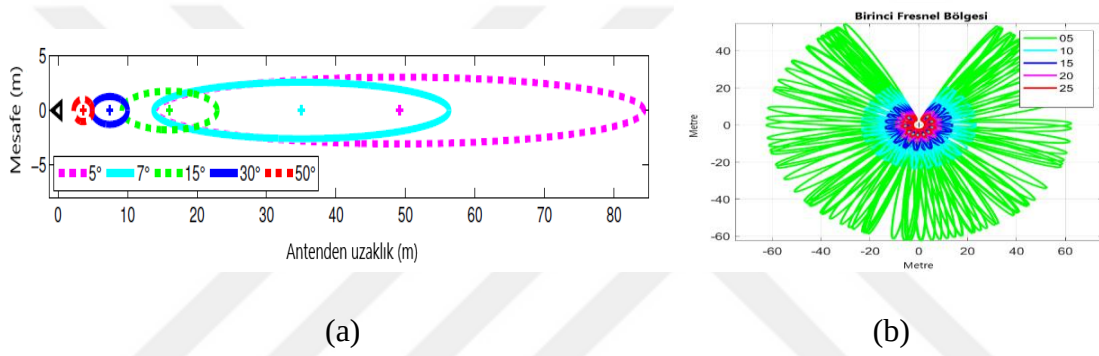
Şekil 20'ye bakıldığında, aynalanmış alıcı anteni noktası (A') ile uydu arasındaki Fresnel elipsoidi ile reflektör yüzeyinin kesişimi Fresnel bölgesi olarak ele alınmaktadır. Eşitlik (18)'de $x_c = h \cot \theta$ olarak alındığında Fresnel bölgesinin büyük yarı eksen (a) ve küçük yarı eksen (b);

$$a = \frac{\sqrt{\lambda h \sin(\theta)}}{\sin^2 \theta} \quad (19)$$

$$b = \frac{\sqrt{\lambda h \sin(\theta)}}{\sin(\theta)}$$

şeklinde ifade edilir. Eşitlik (19)'da λ ; GNSS taşıyıcı dalga boyu, h; alıcı anten yüksekliği ve θ ; uydu yükseklik açısıdır. Burada alıcı anten yüksekliği ve sinyalin dalgaboyu arttıkça Fresnel bölgesi de artmaktadır. Şekil 21(a)'da farklı uydu yükseklik açılarında birinci Fresnel bölgesi alanları gösterilmektedir. Bir diğer önemli faktör; yansıtıcı yüzeyin yönü ve

eliptikliğidir. Yansıtıcı yüzey uydula sürekli hareket halindedir ve yüzeyin eliptikliği sadece uydu yükseklik açısına bağlıdır. Uydu yükseklik açısı arttıkça Fresnel elipsleri küçülmekte ve antene yaklaşmaktadır. Şekil 21(b)'de farklı uydu yükseklik açılarında hesaplanan Fresnel elipsleri verilmiştir. Burada, düşük uydu yükseklik açılarında yansıma bölgesinin daha geniş olduğu görülmektedir. Belirlenen yansıma bölgeleri; uydu yükseklik açısı, dalga boyu ve anten faz merkezi ile yansıma yüzeyi arasındaki düşey mesafeye (reflektör yüksekliği) bağlı olarak değişmektedir. Sinyal yansıma etkisi 25° 'nin üzerindeki uydu yükseklik açısında küçülmektedir ve yansıma bölgeleri çoğunlukla deniz alanlarının yanında karasal alanları da kapsamaktadır.

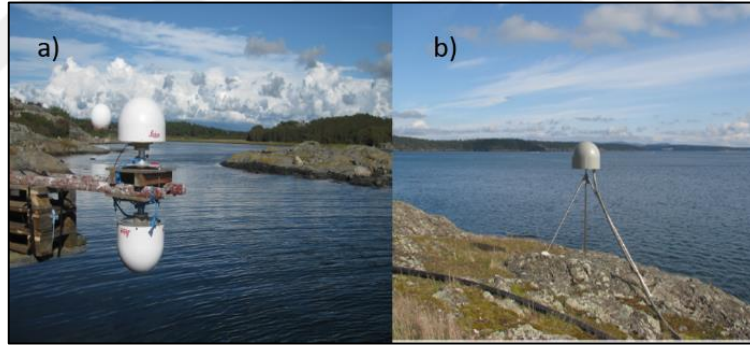


Şekil 21. (a) Yükseklik açısının yansıma yüzeyine etkisi (Löfgren, 2014). L1 frekansında 5° , 7° , 15° , 30° ve 50° uydu yükseklik açılarında sırasıyla elde edilen yansıma bölgeleri 338 m^2 , 173 m^2 , 38 m^2 , 10 m^2 ve 4 m^2 şeklindedir. (b) FFZ

1.9. GNSS İnterferometrik Reflektometri (GNSS-IR) Tekniği

GNSS gözlemlerinden konum belirleme çalışmalarının yanı sıra iklim değişikliği, meteoroloji ve jeodinamik aktiviteler gibi farklı alanlarda yapılan çalışmalarda da yararlanılmaktadır. Uydu tabanlı GNSS-R uygulamalarının yanında tek jeodezik alıcı kullanılarak yersel tabanlı çalışmalar da yapılmaktadır. Bu noktada doğrudan gelen sinyal ve yansıyan sinyal tek jeodezik alıcıda birleştiğinden "interferometri" kavramı kullanılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında yersel tabanlı reflektometri ve tek jeodezik alıcı kullanıldığından tez içeriğinde GNSS-IR kavramı kullanılacaktır. GNSS-IR, GNSS sinyal yansıma etkisini kullanarak farklı birçok alanda kullanılabilen yenilikçi bir tekniktir. Konum belirleme amacına yönelik kullanılan GNSS gözlemleri için sinyal yansıma etkisinin istenmeyen hata kaynaklarından biri olduğu bilinmektedir. Ancak zamanla gerçekleştirilen

birçok çalışmada yansıyan GNSS sinyalinin farklı alanlarda uygulanabilir olduğu görülmüştür. GNSS sinyal yansıma etkisi farklı faktörlerden kaynaklanmaktadır. Bu faktörler; faz, frekans ve genlik modülasyonları, yansıma yüzeyinin pürüzlülüğü, yansıma yüzeyinin geometrisi ve bileşeni şeklindedir. GNSS sinyal yansıma etkisinin girişim desenleri; kod, faz ve SNR ölçümlerinde görülmektedir. GNSS alıcılarının her biri, yeryüzünden yansıyan fazla sayıda GNSS sinyalini toplayabilme özelliğine sahiptir. Ortaya çıkan bi-statik gözlem verileri farklı azimut ve farklı yükseklik açılarında olmaktadır. Yansıyan GNSS sinyalini en iyi şekilde almak için özel donanımlı GNSS aletleri tasarlanabilmektedir. Fakat bu aletlerin yanı sıra jeodezik alıcılar doğrudan gelen GNSS sinyali ve yansıyan GNSS sinyalinin girişimlerini ölçmektedir (Larson vd., 2017). Literatüre bakıldığında, çift jeodezik alıcı (RHCP ve LHCP), Şekil 22(a)) veya tek jeodezik alıcı (RHCP, Şekil 22(b)) kullanılarak yapılan GNSS-IR çalışmaları görülmektedir (Larson vd., 2013; Larson vd., 2013; Larson vd., 2017; Lee vd., 2019; Santamaría-Gómez ve Watson, 2017; Tabibi vd., 2021).



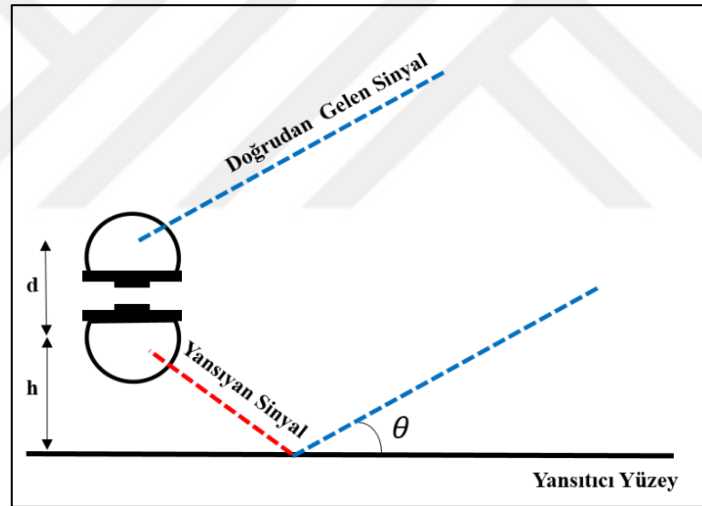
Şekil 22. GNSS-IR jeodezik alıcıları ((a) Löfgren, 2014 (b) URL-18, 2022)

Yer merkezli GNSS-IR tekniği için; zenit yönlü RHCP anteninin kullanıldığı SNR yöntemi ve zenit yönlü RHCP ve nadir yönlü LHCP antenlerinin kullanıldığı faz gecikmesi yöntemi şeklinde iki yöntem vardır. Faz gecikmesi yöntemi kullanıldığında, doğrudan gelen sinyal ve yansıyan sinyal arasındaki faz farkını belirlemek için çift jeodezik anten gerekmektedir. GNSS-IR tekniğindeki faz gecikmesi kavramı GNSS ile yüksek doğruluklu konum belirleme ile benzerdir. RHCP anteni ile doğrudan gelen sinyalin faz gecikmesi kaydedilmektedir. Deniz yüzeyindeki yansımadan sonra 8° üzerindeki uydu yükseklik açıları için RHCP uydu sinyalleri polarizasyonunu LHCP yönünde değiştirmektedir. Bundan sonra yansıyan LHCP sinyalleri faz gecikmesi GNSS alıcısına bağlı nadir yönlü LHCP

anteninde kaydedilmektedir. RHCP ve LHCP antenlerinin enerji miktarı dielektrik sabitine, yansıma yüzeyinin iletkenliğine ve uydu yükseklik açısına bağlıdır (Larson vd., 2013). Şekil 23'te GNSS-IR tekniğinde kullanılan RHCP ve LHCP antenleri gösterilmiştir. LHCP sinyallerinin hassasiyeti RHCP sinyallerinin zenit yönlü kazancı ile karşılaştırıldığında yaklaşık 13-23 dB azalmaktadır (Löfgren, 2014). LHCP anteninin kullanıldığı faz gecikmesi yönteminde nadir yönlü antenin deniz yüzeyinden yüksekliği doğrudan deniz yüzeyi yüksekliği ile doğru orantılıdır.

$$\Delta v = 2h + d \quad (20)$$

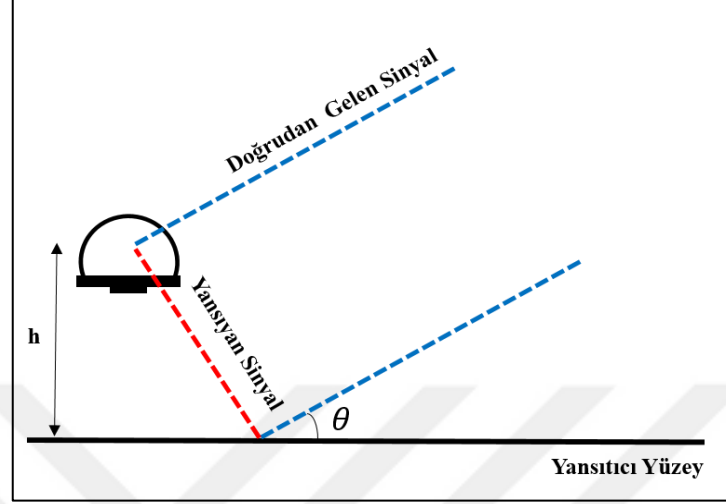
Burada; Δv ; iki anten arasındaki dikey ana hat, h ; nadir yönlü antenin deniz yüzeyinden olan yüksekliği, d ise iki antenin faz merkezleri arasındaki düşey mesafedir.



Şekil 23. Zenit yönlü RHCP anteni ve nadir yönlü LHCP anteninden oluşan GNSS-IR geometrisi

SNR yöntemi kullanıldığında tek jeodezik anten olması yeterlidir. GNSS antenleri doğrudan RHCP uydu sinyallerine duyarlı olacak şekilde tasarlanmıştır. Zenit yönündeki RHCP anteni, doğrudan gelen GNSS sinyalini büyütürken yansıyan GNSS sinyalini bastırma amaçındadır. Buna rağmen, yansıyan GNSS sinyalinden gelen enerjiyi tamamen reddetmemektedir (Larson vd., 2013). GNSS antenine doğrudan gelen sinyal ve yansıyan sinyal anten faz merkezinde birleşmektedir ve aynı alıcıya kaydedilmektedir. SNR yönteminin

detayları Bölüm 1.11’de anlatılmıştır. Şekil 24’te RHCP anteninin kullanıldığı GNSS-IR tekniğine yönelik gösterim yapılmıştır.



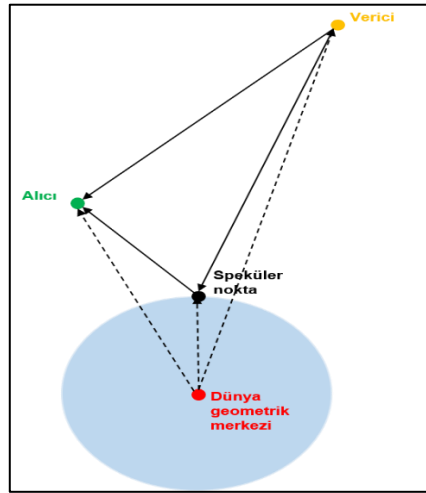
Şekil 24. Zenit yönlü RHCP anteni anteninden oluşan GNSS-IR geometrisi

Bu iki yöntemin karşılaştırılması sonucunda, faz gecikmesi yöntemi ile SNR yöntemine göre daha yüksek doğrulukta sonuçlar elde edildiği görülmüştür (Löfgren, 2014). Fakat hem RHCP yönlü hem de LHCP yönlü GNSS anteni donanımını sağlamak kolay değildir. Bu donanım başta Onsala Uzay Gözlem Evi bünyesindeki GTGU sabit GNSS istasyonu olmak üzere, ülkemiz bilim insanları tarafından Antarktika’da Horseshoe adasında kurulan TUR1 (Selbesoğlu vd., 2021) gibi az sayıda istasyonda bulunmaktadır. Bu nedenle, kıyı alanlarında bulunan GNSS istasyonları ile deniz seviyesi değişiminin belirlenmesinde büyük çoğunlukla SNR yöntemi tercih edilmektedir. Diğer yandan bu tekniğin sağladığı avantajlarda mevcuttur. Bunlar; tek jeodezik anten kullanılması nedeniyle maliyetinin daha düşük olması, doğrudan gelen ve yansıyan GNSS sinyalinin girişim deseninin en fazla SNR verilerinde gözlemlenmesi, faz gecikmesi yöntemine göre SNR verilerinin rüzgar ve dalga şartlarına karşı hassasiyetinin az olması gibi vb. şeklinde sıralanabilir.

1.9.1. GNSS-IR Genel Yapısı

GNSS-IR tekniğinde, gözlemlenen yansıma parametrelerini kullanılabilir çevresel ürünlere dönüştürmek için GNSS alıcısı/anteni özellikleri ve yansıtıcı bölgeyle ilişkisi önemlidir. Bu anlamda bu bölümde bi-statik radar ve yansıma bileşenleri kavramlarından bahsedilecektir.

- Bi-statik radar: Radyo alıcısı ve vericisinin farklı konumlarda olduğu sistem olarak tanımlanmaktadır. Bu konfigürasyon, alıcı ve vericiyi bağlamak için doğrudan bağlantı ve yansıyan bağlantı olmak üzere iki bağlantıya izin vermektedir. İletim (transmission) boyunca, alıcı ve verici arasındaki iletişimi sağlamak için bi-statik sistemin doğrudan bağlantısı kullanılmaktadır. Bi-statik yansıma bağlantısı ise vericiden hedefe ve ardından alıcıya giden bir yol izlemektedir. Bu yansıma bağlantısı daha sonra genelde dünya yüzeyi olan bir hedefi incelemek için kullanılmaktadır (Mashburn, 2018). Kısacası, yüzeyin uzaktan algılanması için bi-statik radar geometrisi; verici, alıcı ve yüzeyin speküler yansıma noktasını çevreleyen bölgede meydana gelen saçılmadan oluşmaktadır (Şekil 25). Burada yüzey istenilen hedeftir ve yansıyan sinyal yüzey özelliklerinin tahmin edildiği bilgileri içermektedir (Masters, 2004).

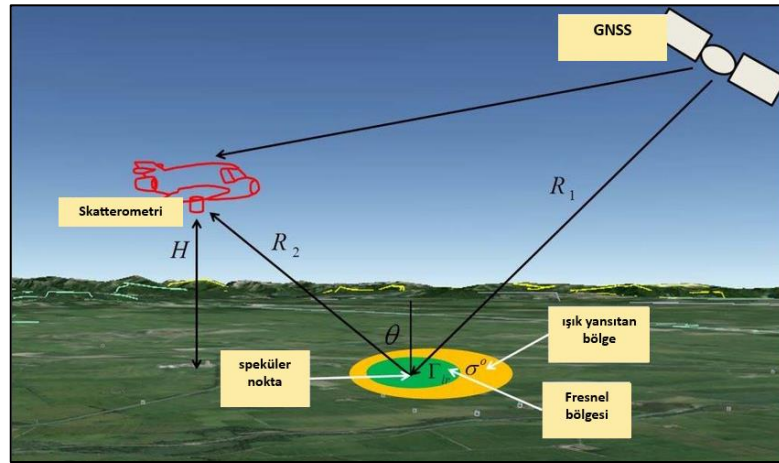


Şekil 25. Bi-statik radar geometrisi

Mono-statik radar sisteminin tersine, bi-statik radar sistemi vericiden alıcıya sinyalin yayılımı için iki veya daha fazla yol içermektedir. Doğrudan gelen sinyal vericiden alıcıya kesintisiz bir şekilde ulaşmaktadır. Genel bi-statik radar denklemi,

$$P_{pq}^r = \frac{P_T \lambda^2}{(4\pi)^3} \int \frac{G_T G_r}{R^2 R_0^2} \sigma_{pq}^0 dA \quad (21)$$

olarak ifade edilir. Burada; P_T ; iletilen güç, G_T ve G_r ; sırasıyla verici ve alıcı anten kazanımı, R ; gözlemlenen hedeften vericiye olan mesafe, R_0 ; alıcıdan gözlemlenen hedefe olan mesafe, σ_{pq}^0 ise p gelen ve q yansıyan dalga polarizasyonu neticesinde bi-statik radar katsayısına bağlı polarizasyondur. GNSS-IR, bi-statik radar konfigürasyonunda çalışmaktadır. GNSS bi-statik radarın genel teorisi ilk olarak okyanus skatterometrisinde (Hall ve Cordey, 1988) ve deniz yüzeyi altimetresinde (Martin-Neira, 1993) sunulmuştur. Şekil 26'da GNSS bi-statik radar geometrisi gösterilmiştir. Burada, verici GNSS uydusunda bulunmakta olup aynı anda hem doğrudan gelen sinyal, LOS hem de Dünya yüzeyinden yansıyan sinyali ölçmektedir.



Şekil 26. GNSS bi-statik radar geometrisi (Jia vd., (2015)'ten değiştirildi.)

- Yansıma Bileşenleri: GNSS uydularının gökyüzünde hareketi sırasında uydu yükseklik açısının sürekli değişmesi ile yansıma yolu da değişmektedir ve bu durum yansıyan sinyalde faz değişikliğine neden olmaktadır. Bunun sonucunda doğrudan gelen sinyalde eş fazlı (coherent) veya eş fazlı olmayan (incoherent) girişimler

meydana gelmektedir (Yueh vd., 2017). GNSS-IR tekniğinde, yansıyan sinyal hem eş fazlı hem de eş fazlı olmayan sinyalin gücünden gelen katkıya sahiptir. Sinyalin gücü eş fazlı ve eş fazlı olmayan bileşenlerin bileşke fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$P_{pq} = P_{pq}^{coh} + P_{pq}^{incoh} \quad (22)$$

Burada, p; gelen dalga polarizasyonunu, q; yansıyan dalga polarizasyonunu, P_{pq}^{coh} ; eş fazlı bileşen ve P_{pq}^{incoh} ; eş fazlı olmayan bileşeni ifade etmektedir. Pürüzsüz bir yüzey varsayımında, speküler yansıma noktasından yansıyan eş fazlı bileşen sinyalde baskın olacaktır. Eğer yansıma yüzeyi pürüzlü ise sinyale eş fazlı olmayan bileşen hakim olacaktır. Polarize edilmiş GNSS bi-statik (RCP iletilen, LCP alınan) radar durumunda eş fazlı bileşenin bi-statik radar denklemi,

$$P_{rl}^{coh} = \frac{P_r^t G^t}{4\pi(R_{ts} + R_{sr})^2} \frac{G^r \lambda^2}{4\pi} \Gamma_{rl} \quad (23)$$

şeklindedir. Burada; P_r^t iletilen RCP gücü, G^t ve G^p sırasıyla verici ve alıcı anten kazanımı, λ dalgaboyu, R_{ts} verici ve yüzey arasındaki mesafe, R_{sr} alıcı ve yüzey arasındaki mesafe ve Γ_{rl} yüzeyin güç yansıtıcılığını ifade etmektedir (De Roo ve Ulaby, 1994). Yüzeyin güç yansıtıcılığı,

$$\Gamma_{rl} = |\mathcal{R}_{rl}(\theta)|^2 \chi(z) \quad (24)$$

şeklinde hesaplanır (Beckmann ve Spizzichino, 1968). Burada; $\chi(z)$ z yüzey yüksekliğinin olasılık yoğunluk fonksiyonun karakteristik fonksiyonu, $\mathcal{R}_{rl}(\theta)$ eşdeğer pürüzsüz yüzeyin Fresnel yansıma katsayısıdır. Alınan gücün eş fazlı olmayan bileşeninin büyüklüğü bi-statik radar denkleminde göre,

$$P_{rl}^{incoh} = \frac{P_r^t G^t}{4\pi R_{ts}^2} \frac{G^r \lambda^2}{4\pi} \int \frac{\sigma^0}{4\pi R_{sr}^2} dA \quad (25)$$

olarak ifade edilir. Eş polarizasyonlu eş fazlı güç yansıma katsayısı, bir hedeften gelen eş fazlı gücün geniş düz bir iletken plakadan gelen güç ile karşılaştırılmasıyla hesaplanmaktadır. Bu durumda $\sigma^0 = 0$ olarak alınır (De Roo ve Ulaby, 1994).

1.10. GNSS-IR Uygulamaları

GNSS-IR tekniği; başlıca (1) deniz seviyesi değişimi (Beşel ve Kayıkçı, 2021; Beşel ve Tanır Kayıkçı, 2022; Geremia-Nievinski vd., 2020; Larson, Löfgren, vd., 2013; Larson, Ray, vd., 2013; Larson vd., 2017; Tabibi vd., 2021; Wang vd., 2018a), (2) kar kalınlığı (Durand vd., 2019; Larson ve Nievinski, 2013; Zhang, vd., 2021), (3) toprak nemi (Larson vd., 2008; Vey vd., 2016), (4) buz kalınlığı (Ghiasi vd., 2020b) ve (5) ekstrem doğa olaylarının belirlenmesi (Karegar vd., 2020; Kim ve Park, 2021; Larson vd., 2021) gibi alanlarda kullanılmaktadır. Tekniğin doğruluğu uydu yükseklik açısı, yüzey pürüzlülüğü, dielektrik sabiti gibi faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir. Bu bölümde GNSS-IR'ın en fazla uygulama alanı bulduğu deniz seviyesi değişimi, kar kalınlığı, toprak nemi ve ekstrem doğa olayların belirlenmesi ve son zamanlarda kendine yer edinmeye başlayan temel gelgit bileşenlerinin elde edilmesi başlıkları verilecektir.

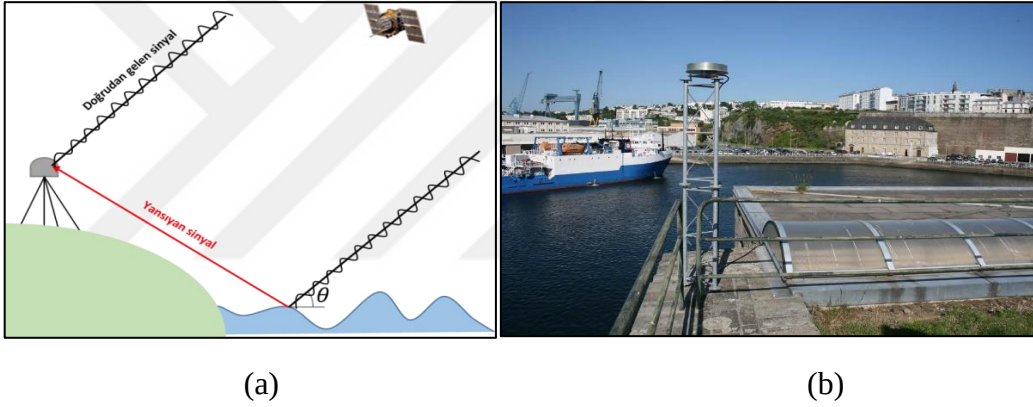
1.10.1. Deniz Seviyesi Değişimin Belirlenmesi

Kıyıda veya kıyıya yakın bölgelerde bulunan GNSS istasyonları verilerinden yararlanarak GNSS-IR tekniği, sağladığı önemli avantajlar sayesinde kıyısal deniz seviyesinin izlenmesine ve belirlenmesine imkan sağlamaktadır. GNSS-IR ile deniz seviyesi değişimi belirlemenin başlıca avantajları özetle aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Mareograf istasyonunun tersine GNSS-IR tekniği düşey yer kabuğu hareketinden etkilenmemektedir,
- Mareograf istasyonuna göre kıyıdan itibaren daha geniş bir bölgedeki deniz seviyesi değişikliklerini algılama potansiyeline sahiptir,
- Kıyı boyunca belli bir mesafede meydana gelen deniz seviyesi ile alakalı ekstrem olayları algılar,
- Mareograf istasyonuna göre kurulum ve bakım maliyeti daha düşüktür,
- Sensör kalibrasyonu gerekmemektedir,

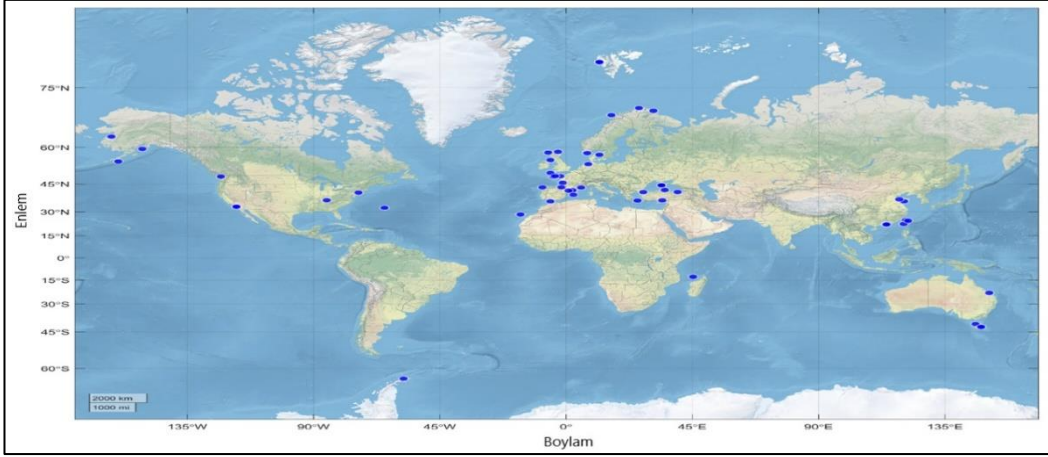
- Uluslararası Yersel Referans Ağı'na (ITRF) göre deniz seviyesi değişiminin belirlenmesine imkan sağlamaktadır.

Hassas konum belirleme için istenmeyen hata kaynağı olan sinyal yansıma etkisinin deniz seviyesi değişiminde kullanılması, GNSS elektromanyetik dalgalarındaki doğrudan gelen sinyal ve yansıyan sinyalin girişimleri ile yansıma yüzeylerinin özelliklerinin kestirilmesi sonucu olmuştur (Martin-Neira, 1993). Deniz seviyesi değişiminin belirlenmesinde GNSS tabanlı mareograf olarak da adlandırılan yer merkezli GNSS-IR ise ilk olarak Larson, vd. (2013) tarafından rölatif deniz seviyesi değişikliğini SNR verilerinden yararlanarak belirlemek için sunulmuştur. Şekil 27'de deniz seviyesi değişiminin izlenmesinde GNSS-IR tekniğinin kullanılmasına ait bir şematik gösterim ve GNSS-IR uygulamalarında kullanılan BRST (Fransa) GNSS istasyonu gösterilmektedir.



Şekil 27. (a) Deniz seviyesinin izlenmesinde GNSS-IR (θ ; uydu yükseklik açısı); (b) BRST GNSS istasyonu (URL-17, 2022)

Şekil 28'de Dünya genelinde GNSS-IR tekniği kullanılarak deniz seviyesi değişiminin belirlendiği başlıca istasyonlar sunulmuştur. Son yayınlar, ortalama deniz seviyesinin izlenmesi için GNSS-IR tekniğinin yüksek kaliteli sonuçlar verdiğini göstermektedir. Bu nedenle GLOSS, GNSS-IR deniz seviyesi gözlemlerini uluslararası gözlem programlarına dahil etmeyi düşünmektedir.



Şekil 28. Literatürde GNSS-IR ile deniz seviyesi değişimi belirlenen başlıca istasyonlar

1.10.2. Kar Kalınlığı Belirlenmesi

Kar ölçümleri iklim çalışmaları, kuraklık tahmini, su kaynağı varlığı ve taşkın gibi çeşitli çalışmalar için gerekli olmaktadır. Uydu ölçümleri karın derinliğinden ziyade karın kapladığı alanla ilgilenmektedir. Birçok yerde kar ölçüm sensörleri konumsal ve zamansal hassasiyet bakımından eksiktir (Larson ve Small, 2016). Diğer yandan GNSS istasyonları potansiyel bir kar veri kaynağı olarak bulunmaktadır (Şekil 29). Tekniğin kar kalınlığında kullanılması ilk olarak Larson vd., (2009) tarafından Colorado’da küçük bir bölgede denenmiştir. Kış aylarında SNR verileri kullanılarak karın tepesine olan mesafe ölçülürken ilkbaharın başında ve yaz aylarında toprağın tepesine olan mesafe ölçülmektedir (Larson, 2019). Elde edilen ölçümlerle kış boyunca kar kalınlığı tahminleri gerçekleştirilmektedir. Ayrıca University of Colorado, UCAR ve NOAA iş birliği ile PBO H2O projesinde Güney Amerika bölgesinde 220 istasyonla düzenli olarak kar kalınlığı ölçülmektedir.



Şekil 29. Kar kalınlığı belirlenmesinde GNSS-IR (URL-18, 2022)

1.10.3. Toprak Nemi Belirlenmesi

Toprak nemi önemli hidrolojik değişkenlerden biridir. Özellikle iklim çalışmalarında, taşkın tahmininde ve hava tahmin modellerinde büyük öneme sahiptir. Toprak nemi ölçüm ve tahmininde çeşitli modeller kullanılmaktadır. Temelde yerinde gözlem verileri veya uzaktan algılama yöntemleri ile belirlenmektedir. Küçük toprak hacimlerinde doğrudan toprak gravimetrisi veya elektromanyetik sondajla, daha büyük toprak hacimlerinde ise uydularla uzaktan algılama yöntemleri ile toprak nemi ölçümü sağlanmaktadır (Chew, 2015). Bunlara ilaveten son yıllarda GNSS yansıma sinyallerinden yararlanılarak toprak nemi belirlenmektedir (Şekil 30).

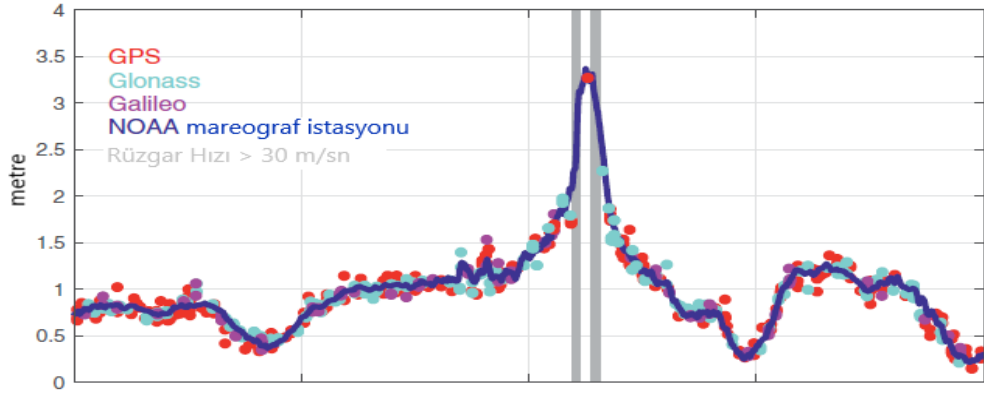


Şekil 30. Toprak neminin belirlenmesinde GNSS-IR (URL-18, 2022)

GNSS-IR tekniği ile toprak nemi uygulamalarında, toprak neminin belirleneceği alana göre sinyal yansıma etkisi noktasının belirlenmesi diğer bir ifade ile yerden yayılan enerjinin mesafesi ve yönü önemlidir (Larson vd., 2008). GNSS-IR tekniğine dayalı olarak toprak neminin belirlenmesine yönelik çeşitli üniversiteler ve kurum/kuruluşlar tarafından geliştirmeler yapılmaktadır. Örneğin, University of Colorado, UCAR ve NOAA iş birliği ile Boulder'da kurulan P041 GPS istasyonu ile ilk testler gerçekleştirilmiştir. Şu anda Batı Amerika, Karayipler Bölgesi ve Güney Afrika'da yaklaşık 130 istasyonda çalışmalar devam etmektedir. Buradan elde edilen verilerle NASA SMAP (Soil Moisture Active Passive) misyonuna katkı sağlanmaktadır. GNSS-IR ölçümleri çok sık toprak derinlikleri (5 cm) ile sınırlı olmasına rağmen iklimsel, hidrolojik ve ekolojik modeller için faydalı veriler sağlamaktadır (Larson, 2019).

1.10.4. Ekstrem Doğa Olaylarının Belirlenmesi

GNSS verilerinden elde edilen üç boyutlu konum bilgisi mevcutta deprem ve tsunami erken uyarı gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Larson vd., (2021), GNSS-IR tekniği ile tsunami ve fırtına kabarması sırasında deniz seviyesindeki değişimin gerçek zamanlı değerlendirilmesini sağlayarak GNSS verilerinin kıyı tehlikelerinin azaltılmasında da önemli bir role sahip olacağını göstermiştir. Şekil 31’de ABD’de gerçekleşen bir kasırga öncesinde, anında ve sonrasında GNSS-IR tekniğine dayalı belirlenen su seviyesi gözlemlerinin değişimi gösterilmektedir.



Şekil 31. Laura kasırgasında GPS, GLONASS ve Galileo uydularından GNSS-IR tekniği ile belirlenen su seviyesi ölçümleri (Larson vd., (2021)’den değiştirildi.)

Diğer yandan Karegar vd., (2020) çalışmasında ise GNSS-IR tekniğini aktif olarak çöken kıyı ovalarında sığ çökme oranını ölçmek ve sonuçların taşkın duyarlılığına etkilerini belirlemek için kullanılabilir olduğunu göstermiştir. Bunun yanında, taşkın riskine karşı doğru ve sürekli su seviyesi gözlemlerinin üretilmesi için de reflektometri tekniğinden yararlanılmaktadır (Beckheinrich, 2016).

1.10.5. Temel Gelgit Bileşenlerinin Elde Edilmesi

Gelgit ile birlikte deniz seviyesinde zamanla artma veya azalma olmaktadır. Sonuç olarak deniz seviyesi sabit olmamaktadır. Deniz seviyesinde meydana gelen artma veya azalmalar konuma göre değişmektedir. Bu yüzden, değişime neden olan faktörlerin

belirlenip doğru tahmin edilmesi ve deniz seviyesi değişiminin hassas tahmini için gelgit etkisinin belirlenmesi önemli olmaktadır. Literatüre bakıldığında, temel olarak gelgit etkisinin çeşitli harmonik analizlerle veya küresel okyanus gelgit modelleri ile belirlendiği görülmektedir. Kıyısal bölgelerde meydana gelen gelgitler çoğunlukla mareograf istasyonlarından alınan deniz seviyesi verilerine gelgit analizi uygulanması ile belirlenmektedir. Son yıllarda, GNSS-IR tekniği çeşitli uygulamalardaki kullanımının yanı sıra gelgit analizi çalışmalarında da kullanılmakta ve performansı test edilmektedir (Ghiasi vd., 2021; Tabibi vd., 2020; Williams ve Nievinski, 2017). Beşel ve Tanır Kayıkçı, (2022) ülkemizde ilk kez GNSS-IR ile belirlenen deniz seviyesi değişimini kullanarak gelgit harmonik analizi yapmıştır. Günümüzde mareografa alternatif olarak gösterilen ve bu yönde çalışmaların yürütüldüğü GNSS-IR tekniğinin gelgit etkisinin belirlenmesine uygulanabilirliğinin araştırılması oldukça önemlidir.

Gelgitlerin temel oluşumu Ay ve Güneş'in çekim kuvvetine dayanmaktadır ve deniz seviyesi değişimine etki eden faktörler içerisinde en önemlilerinden biri olmaktadır. Diğer yandan deniz seviyesi üzerinde harmonik ve düzenli etkiye sahiptir. Gelgit sinyalleri, çok sayıda farklı genlik ve frekansa sahip harmonik bileşenler tarafından açıklanmaktadır. Bir harmonik model,

$$h(t_j) = H_0 + A\cos(w_a t_j + \alpha) + B\cos(w_b t_j + \beta) + \dots \quad (26)$$

olarak ifade edilir. Burada, t_j ; zaman, H_0 ; ortalama deniz seviyesi, A ve B ; gelgit bileşenleri genlikleri, α ve β ; başlangıç faz açıları, w_a ve w_b ; gelgit bileşenlerinin açısal hızıdır (Schureman, 2001).

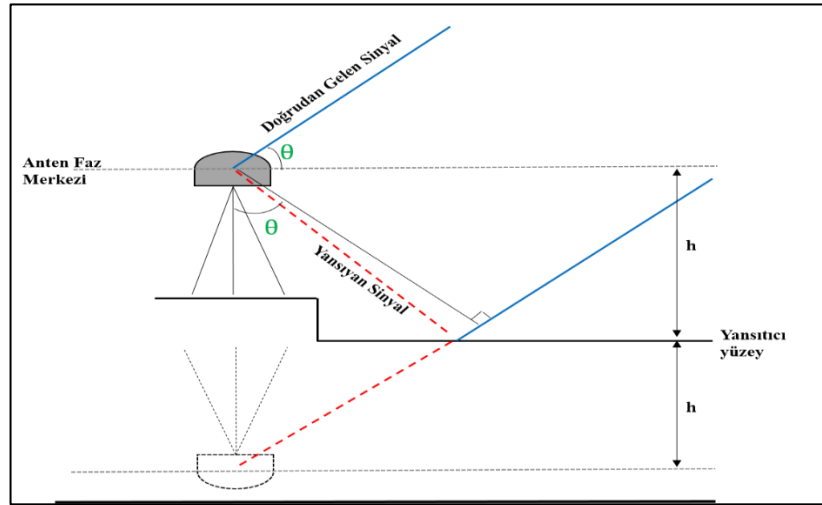
Gelgit bileşenleri; yarı-günlük, günlük ve karışık olmak üzere üç grupta sınıflandırılmaktadır. Gelgit bileşenlerinin sayısı verinin uzunluğuna bağlıdır. Bir yıllık zaman serisinde saatlik deniz seviyesi değişimlerinin kullanılması durumunda çoğunlukla $K1$, $O1$, $M2$ ve $S2$ bileşenlerini dikkate almak yeterli olmaktadır (Sezen, 2006). Tablo 5'te bu tez çalışmasında kullanılan günlük ve yarı-günlük olmak üzere beş temel gelgit bileşenine ait bilgiler sunulmuştur. Saatlik deniz seviyesi değişimi verilerinden harmonik analiz yöntemi ile gelgit bileşenlerinin genlik ve faz değerleri elde edilmektedir.

Tablo 5. Temel gelgit bileşenleri

Bileşen Tipi	Sembol	Açıklama	Frekans (1/Saat)	Periyot (Saat)	Açısal Hız (Derece/Saat)
Günlük	K1	Ay ve Güneş'ten kaynaklanan bileşen	0.0417807	23.9344696	15.0410686
	P1	Güneş'ten kaynaklanan bileşen	0.0415525	24.0658901	14.9589314
	O1	Ay'dan kaynaklanan bileşen	0.0387306	25.8193416	13.9430356
Yarı-günlük	M2	Ay'dan kaynaklanan bileşen	0.0805114	12.4206012	28.9841042
	S2	Güneş'ten kaynaklanan bileşen	0.0833333	12.0000000	30.0000000

1.11. Sinyal Gürültü Oranı (SNR)

Yansıyan GNSS sinyallerinin farklı alanlarda kullanıldığı ve birçok bilgi çıkarıldığı bu tez kapsamında önceki bölümlerde açıklanmıştır. GNSS yansıma sinyalleri büyük ölçüde doğrudan gelen ve yansıyan sinyalin uyumlu kombinasyonuna neden olmaktadır. Bu kombinasyondaki sonuç iki sinyal arasındaki gecikmeye bağlıdır. Bu aşamada reflektör yüksekliği ve uydu yükseklik açısı doğrudan gelen ve yansıyan sinyal arasındaki yol uzunluğunu ve dolayısıyla bağlı gecikmeyi de etkilemektedir (Strandberg, 2020) (Şekil 32).



Şekil 32. Yansıyan GNSS sinyalinin geometrik gecikmesi

Düşük yükseklik açılarında yol uzunluğu farkı küçülmekte olup ufuk çizgisinde sıfıra doğru yaklaşmaktadır ve zenit yüksekliği için farklar ($2h$) olmaktadır. Doğrudan gelen sinyal ve yansıyan sinyal arasındaki yol uzunluğu farkları veya geometrik gecikme,

$$\tau = 2h\sin(\theta) \quad (27)$$

şeklinde ifade edilebilir (Georgiadou ve Kleusberg,1988). Doğrudan gelen ve yansıyan sinyalin girişiminden oluşan kompozit güç,

$$P = P_d + P_r + 2\sqrt{P_d P_r} \cos(\psi) \quad (28)$$

olarak yazılabilir (Georgiadou ve Kleusberg,1988). Burada; P_d ve P_r sırasıyla doğrudan gelen ve yansıyan sinyalin gücünü, ψ ise interferometrik faz yani doğrudan gelen sinyal ile yansıyan sinyal arasındaki faz gecikmesini ifade etmektedir. Faz gecikmesi sinyalin dalgaboyuna bağlıdır ve $\psi = (\frac{2\pi}{\lambda} \tau)$ olarak hesaplanır. Kompozit sinyal GNSS alıcısında ölçülmekte ve sinyalin gücü (P) alıcının kaydettiği SNR verisini tanımlamaktadır.

GNSS antenine gelen doğrudan sinyal ile yansıyan sinyalin girişim deseninin en fazla görüldüğü SNR, sinyal gücünün gürültü gücüne oranı olarak tanımlanmaktadır. Düşük yükseklik açılarında (0° - 25°) uydudan GNSS alıcısına doğrudan gelen sinyal ve yansıyan sinyal arasındaki girişim daha fazladır. Zamanın fonksiyonu olarak kaydedilmekte olan SNR, ufuk çizgisine göre uydu yükseklik açısının da bir fonksiyonudur. Her bir GNSS frekansı kendi SNR değerini kaydetmektedir. Örneğin, GPS; S1C, S1L, S1W, S1X, S2C, S2L, S2W, S2X, S5I, S5Q ve S5X vb., GLONASS; S1C, S1P, S2C, S2P, S3I, S3Q ve S3X vb. Galileo; S1C, S1X, S5Q, S5X, S6C, S6X, S7Q, S7X, S8Q ve S8X vb., BDS; S2I, S2X, S5X, S5D, S6I, S6X, S7I, S7Z, S8D ve S8X vb. şeklindedir. GNSS-IR tekniği, SNR verilerini kullanarak GNSS anten faz merkezi ile deniz yüzeyi arasındaki düşey mesafenin ölçülmesi sonucu deniz seviyesi değişiminin kestirilmesine imkan sağlamaktadır.

1.11.1. SNR Analizi

GNSS alıcısına gelen sinyalin gücünü temsil eden S1 ve S2 gözlemleri taşıyıcı-gürültü yoğunluk oranına (carrier to noise density ratio- C/N0) karşılık gelmekte olup Alıcıdan Bağımsız Değişim Formatında (RINEX- Receiver INdependent Exchange Format) arşivlenmektedir. Taşıyıcı-gürültü yoğunluk oranı,

$$C/N_0 = \frac{\text{Sinyal Gücü}}{\text{Sinyal Gücü Spektral Yoğunluğu}} \quad (29)$$

olarak ifade edilir. SNR,

$$SNR = \frac{C/N_0}{B} \quad (30)$$

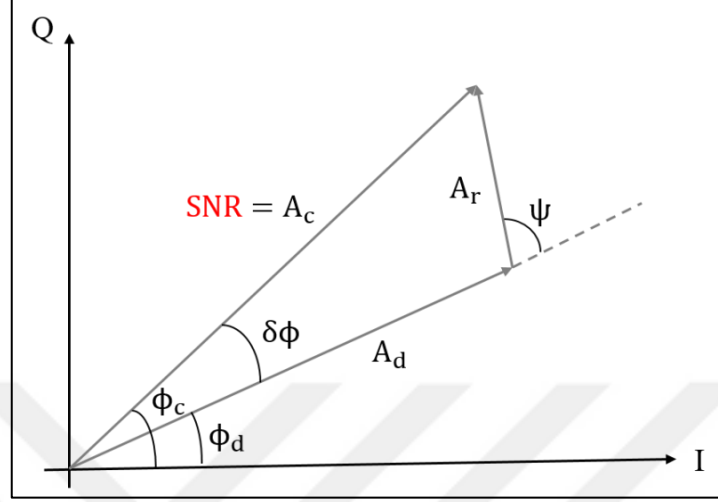
şeklinde hesaplanır. Eşitlik (30)'da B; gürültü bant genişliğidir (Joseph, 2010). SNR logaritmik ölçekte ve desibel (dB) birimindedir. Logaritmik ölçekteki SNR verileri, alıcının gürültü bant genişliğinin ölçek faktörü olarak davranmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla, SNR salınımlarının tahmin edilen frekansları üzerinde etkiye sahip değildir (Santamaría-Gómez ve Watson, 2017). Bu yüzden SNR verilerinin lineer ölçeğe dönüştürülmesi gerekmektedir. Lineer ölçeğe dönüşüm ile SNR verileri volts/volts veya watts/watts biriminde elde edilmektedir. Alıcı antenine gelen GNSS sinyalinin SNR ile olan ilişkisi;

$$SNR^2 \approx A_c^2 = A_d^2 + A_r^2 + 2A_dA_r \cos(\psi) \quad (31)$$

olarak ifade edilir. Burada, A_c ; girişim yapan sinyalin genliği, A_d ; doğrudan gelen sinyalin genliği, A_r ; yansıyan sinyalin genliği, ψ ise doğrudan gelen sinyal ve yansıyan sinyal arasındaki faz farkıdır. GNSS antenine doğrudan gelen sinyal ve yansıyan sinyal arasındaki faz farkı $\psi = k2H \sin(\epsilon)$, $k = 2\pi/\lambda$ şeklindedir. Sinyal yansıma etkisi frekansı ($d\psi/dt$),

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{4\pi h}{\lambda} \cos(\theta) \frac{d\theta}{dt} \quad (32)$$

şeklinde hesaplanır. Burada, h ; yansıma yüzeyi ve anten faz merkezi arasındaki düşey mesafe, θ ; uydu yükseklik açısı, λ ; GNSS taşıyıcı dalgaboyunu ifade etmektedir.



Şekil 33. Sinyal yansıma etkisi fazör diyagramı (Larson vd., (2008)'den değiştirildi.)

Şekil 33'te bir GNSS alıcısının taşıyıcı fazında oluşan sinyal yansıma etkisi fazör diyagramı olarak sunulmuştur. Burada sinyal yansıma etkisinin olmadığı durumda, fazör diyagram sadece doğrudan gelen sinyal genliğini (A_d), fazını (ϕ_d) ve SNR ölçümlerini içermektedir. Sinyal yansıma etkisinin olması durumunda ise ek olarak yansıyan sinyal genliği (A_r) ve faz açısı (ψ) ilave edilmektedir. Bunun sonucunda doğrudan gelen sinyal ve yansıyan sinyal bir girişim yapmaktadır. Bu girişim sonucunda oluşan kompozit sinyal (A_c) GNSS alıcısında kaydedilmektedir. Bu yüzden jeodezik GNSS alıcısından alınan yansıyan sinyal, doğrudan gelen sinyalin etkisini de içerisinde barındırmaktadır. Jeodezik GNSS antenleri genellikle doğrudan gelen sinyali daha güçlü, yansıyan sinyali ise daha zayıf alacak şekilde tasarlandığından SNR gözlemleri üzerinde doğrudan gelen sinyalin katkısı, yansıyan sinyalin katkısına göre daha büyüktür ($A_d \gg A_r$). Doğrudan trendleri bulmak için doğrudan gelen sinyalin etkisinin kaldırılması gerekmektedir. Bunun için SNR verilerine düşük dereceli polinom uygulanması ile veri trendden arındırılmaktadır. Sonuç olarak, doğrudan gelen sinyalin etkisinin kaldırıldığı trendden arındırılmış (detrend edilmiş- δ SNR) SNR verileri sağlanmaktadır. Elde edilen veri sinyal yansıma etkisinin bileşenlerini içermektedir. Trendden arındırılmış bir SNR verisinin sinyal yansıma etkisi salınımları;

$$\delta\text{SNR} = A \cos\left(\frac{4\pi h}{\lambda} \sin(\theta) + \varphi\right) \quad (33)$$

olarak hesaplanmaktadır. Burada, A ; genlik, h ; anten faz merkezi ile yansımaya yüzeyi arasındaki düşey mesafe (reflektör yüksekliği), λ ; GNSS taşıyıcı dalga boyu, θ ; uydu yükseklik açısını, φ ; faz ofsetini ifade etmektedir. Girişim deseninin genliği A ; yansıtıcı yüzeyin türüne (deniz, toprak, buz vb.), yüzeyin pürüzlülüğüne ve uydu yükseklik açısına bağlıdır (Holden ve Larson, 2021). Uydu yükseklik açısının sinüsüne karşılık gelen δSNR frekansı;

$$f_{\delta\text{SNR} \rightarrow \sin\theta} = \frac{d\delta\text{SNR}}{d\sin(\theta)} = \frac{f_{\psi \rightarrow \sin(\theta)}}{2\pi} = \frac{2\dot{h} \tan(\theta)}{\lambda \dot{\theta}} + \frac{2h}{\lambda} \quad (34)$$

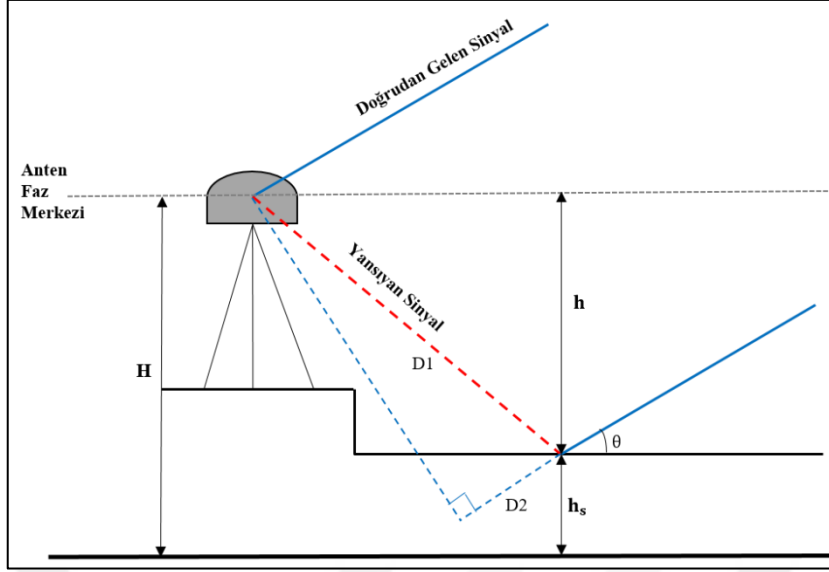
şeklindedir. Burada, $\dot{\theta} \left(= \frac{d\theta}{dt}\right)$ uydu yükseklik açısının sapma oranı, $\dot{h} \left(= \frac{dh}{dt}\right)$ yansımaya yüzeyinden olan anten yüksekliğinin sapma oranını ifade etmektedir. Burada, $\dot{h}$ reflektör yüksekliği sabit alındığında ihmal edilebilir. Bu durumda reflektör yüksekliği,

$$h = \frac{1}{2} \lambda f \quad (35)$$

şeklinde ifade edilir. Trendden arındırılmış olan SNR verisinin frekansı reflektör yüksekliğine (h) bağlı olmaktadır. Burada, spektral analiz yöntemleri ile reflektör yüksekliği bulunmaktadır (Larson vd., 2013; Wan vd., 2015).

1.11.2. SNR Gözlemlerinden Reflektör Yüksekliklerinin Belirlenmesi

SNR salınımlarının frekansı, reflektör yüksekliği (h), GNSS taşıyıcı dalgaboyu (λ) ve uydu yükseklik açısına (θ) bağlıdır. h reflektör yüksekliğinin hesabı Bölüm 1.11.1 başlığı altında, Eşitlik (35)'te gösterilmiştir. h reflektör yüksekliği ile deniz seviyesi arasında negatif yönlü ilişki vardır. Örneğin, h reflektör yüksekliği azaldıkça deniz seviyesi artmaktadır. Şekil 34'te GNSS-IR tekniği ile reflektör yüksekliğinin hesaplanmasının şekilsel gösterimi yapılmıştır.



Şekil 34. GNSS-IR tekniği ile reflektör yüksekliğinin belirlenmesi

Burada; D1 yansıtıcı yüzeyden alıcıya ulaşan yansıyan sinyalin mesafesini, D2 doğrudan gelen sinyalden daha az yansıma yüzeyine ulaşarak gelen sinyalin mesafesini, h reflektör yüksekliğini, H ise referans yüzeyine göre anten faz merkezinin yüksekliğini ifade etmektedir. Belirlenen reflektör yüksekliklerinin GNSS anteninin ortometrik yüksekliğinden farkı alınarak GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi ($h_{GNSSIR} = H - h$) belirlenmektedir.

SNR salınımlarından bilgi çıkarmanın en kolay yolu spektral analiz yöntemlerinin kullanılmasıdır. Bunun için birçok spektral analiz yöntemi (LSP, Hızlı Fourier Dönüşümü, Dalgacık Dönüşümü gibi) vardır. SNR verilerinin zaman içerisinde eşit olarak örneklenmesine karşın δ SNR verileri eşit olarak örneklenmemektedir. Üstelik düzenli olarak örneklenmemiş veri setine spektral analiz uygulamak zordur. Literatüre bakıldığında düzensiz aralıklı veriyi işleyebilen en uygun yöntemin LSP olduğu görülmüştür (Larson vd., 2009; Larson, Löfgren, vd., 2013).

1.11.2.1. Lomb-Scargle Periyodogramı (LSP)

LSP aynı zamanda En Küçük Kareler Spektral analizi olarak adlandırılmaktadır. LSP ile sinüzoidal modele dayalı sinyalin her bir zamanının yerine her bir noktanın spektral gücü tahmin edilmektedir (Lomb, 1976; Scargle, 1983). t_i zamanında bir s veri seti, $Y_s(t_i)$ zaman serisi olarak tanımlandığında bu serinin periyodikliğini modellemek için,

$$Y_S(t_i) = \eta_S(t_i) + \varepsilon_S(t_i) \quad (36)$$

eşitliği gibi olduğu varsayılır. Burada; $\eta_S(t_i)$ periyodik fonksiyon ve $\varepsilon_S(t_i)$ ise ortalaması “0” olmayan normal dağılımda rasgele hataların bir dizisidir. Ayrıca tüm s ve t_i için homojen varyans olduğu kabul edilir (Scargle, 1982). Hata varyansı,

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [Y_S(t_i) - \bar{y}_S]^2 \quad (37)$$

şeklindedir. Burada; n veri sayısı, $\bar{y}_S$ ise s veri setinin ortalamasıdır. Lomb-Scargle periyodogramı Press ve Rybicki (1989) tarafından Eşitlik (38)’deki gibi tanımlanmıştır.

$$P_S(w_j) = \frac{1}{2\hat{\sigma}^2} \left\{ \frac{(\sum_{i=1}^n [Y_S(t_i) - \bar{y}_S] \cos [w_j(t_i - \tau)])^2}{\sum_{i=1}^n \cos^2 [w_j(t_i - \tau)]} + \frac{(\sum_{i=1}^n [Y_S(t_i) - \bar{y}_S] \sin [w_j(t_i - \tau)])^2}{\sum_{i=1}^n \sin^2 [w_j(t_i - \tau)]} \right\} \quad (38)$$

Burada; açısal frekans (w_j), test frekansları $f_1, f_2, \dots, f_M$ olmak üzere $w_j = 2\pi f_j$ ($j = 1, 2, \dots, m$) şeklindedir. Zaman ofseti (τ) ise,

$$\tan(2w_j\tau) = \frac{\sum_{i=1}^n \sin(2w_j t_i)}{\sum_{i=1}^n \cos(2w_j t_i)} \quad (39)$$

şeklinde tanımlanır.

GNSS-IR için yapılan LSP analizinde örnekleme frekansının belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için, en yüksek frekans faktörü (hifac) ve aşırı örnekleme faktörü (ofac) parametreleri hesaplanmaktadır (Roesler ve Larson, 2018). Spektral güç, Nyquist frekansına kıyasla hifac kadar olan frekanslar için hesaplanmaktadır. Burada, ortalama Nyquist frekansı (nf),

$$nf = \frac{n}{2(\max(\frac{2\sin\theta}{\lambda}) - \min(\frac{2\sin\theta}{\lambda}))} \quad (40)$$

şeklindedir. Ortalama Nyquist frekansına göre maksimum LSP frekansının tanımlanmasını sağlayan hifac parametresi,

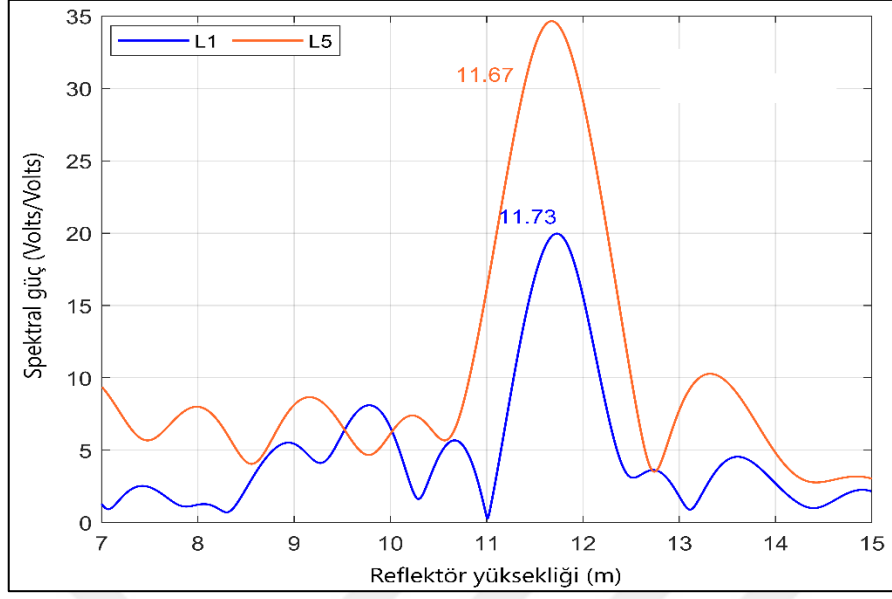
$$h_{\text{fac}} = \frac{2h_{\text{maksimum}} \left(\max\left(\frac{2\sin\theta}{\lambda}\right) - \min\left(\frac{2\sin\theta}{\lambda}\right) \right)}{n} \quad (41)$$

olarak hesaplanır. Burada; h_{maksimum} ; maksimum reflektör yüksekliği, θ ; uydu yükseklik açısı, λ ; GNSS sinyali dalgaboyu ve n ; veri sayısını ifade etmektedir. Frekans grid aralığının belirlenmesinde kullanılan ofac parametresi ise,

$$\text{ofac} = \frac{1}{P_d \left(\max\left(\frac{2\sin\theta}{\lambda}\right) - \min\left(\frac{2\sin\theta}{\lambda}\right) \right)} \quad (42)$$

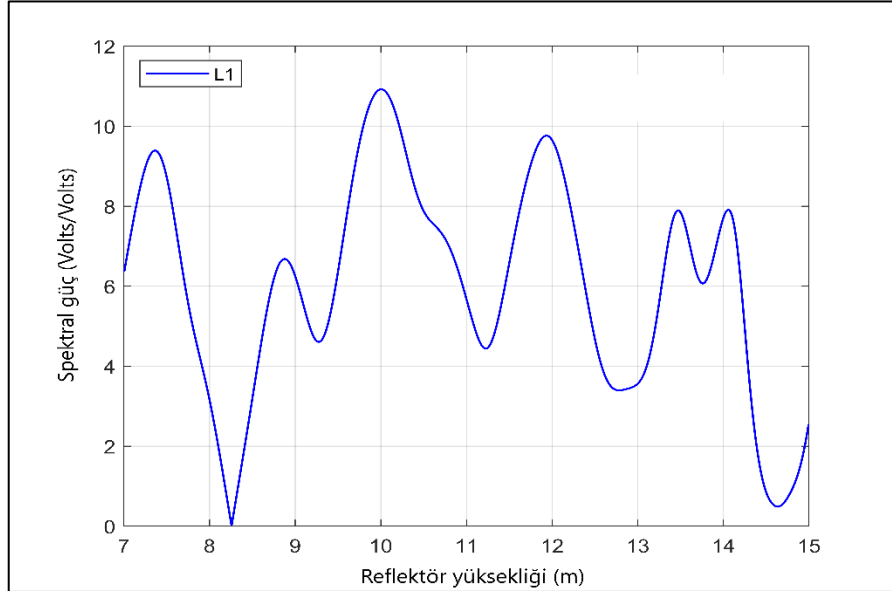
olarak hesaplanır. Burada, P_d değeri; kestirimde istenilen hassasiyet büyüklüğünü ifade etmektedir. Örneğin, ofac faktörünün 40 olması durumunda reflektör yüksekliğinde yaklaşık 4 mm'lik hassasiyete karşılık gelmektedir (Löfgren, 2014). Üstelik, ofac parametresi ile kısa periyotlar yerine uzun periyotlardaki LSP çıktısı sağlanmaktadır (Larson vd., 2013) .

En yüksek spektral güce karşılık gelen δSNR salınımlarındaki dominant frekans Eşitlik (35) kullanılarak reflektör yüksekliğine dönüştürülmektedir. Şekil 35'te deniz seviyesi değişimini belirlemeye yönelik kullanılan SNR verilerinden elde edilen örnek bir LSP periyodogramı gösterilmiştir. Buna göre GPS L1 ve GPS L5 sinyalleri için reflektör yükseklikleri sırasıyla 11.73 m ve 11.67 m olarak bulunmuştur. Elde edilen bu yükseklikler daha sonra deniz seviyesi yüksekliklerini belirlemek için kullanılacaktır.



Şekil 35. Trendden arındırılmış SNR verilerinin Lomb-Scargle periyodogramı

Bazen başka yansıyan sinyallerden kaynaklı olarak salınım modeli etkilenmektedir ve periyodogramda ikinci bir tepe noktasına veya gürültüye neden olmaktadır (Şekil 36). Bu şekildeki analize dahil edilmemektedir.



Şekil 36. Birden fazla tepe noktasına sahip Lomb-Scargle periyodogramı

1.12. GNSS-IR Verilerinin Kalite Değerlendirmesi

Yansıyan GNSS sinyalleri kullanılarak belirlenen deniz seviyesi değişiminde sonuçlar büyük ölçüde GNSS istasyonunun bulunduğu konumdaki denizden kaynaklı etkiler, dağ/kayalık veya iç sular gibi çevresel şartlardan etkilenmektedir. Gerçek reflektör yüksekliklerinin belirlenmesi için elde edilen sonuçlarda tekniğin doğruluk ve güvenilirliği ile ilgili kalite değerlendirmesinin yapılması önemlidir. Literatürde GNSS-IR ile elde edilen sonuçların kalitesinin geliştirilmesine yönelik çeşitli çalışmalar mevcuttur (Larson vd., 2013; Santamaría-Gómez vd., 2015; Wang vd., 2019, 2018). Bu tez çalışması kapsamında reflektör yüksekliklerinin kalite değerlendirmesine odaklanılmıştır. Bunun için kullanılan farklı yöntemlerin sonuçların doğruluğu ve güvenilirliği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu bölümde GNSS-IR verilerinin kalite değerlendirmesinde kullanılan Pik-Gürültü Oranı testi, K-Ortalamalar Kümeleme algoritması ve LSP-MA yöntemi açıklanmıştır.

1.12.1. Pik-Gürültü Oranı Testi

LSP sonucu ortaya çıkan periyodogramın tek bir anlamlı pik içermesi önemlidir. LSP ile elde edilen pik değerlerinin anlamlı olup olmadığına karar vermek için (Larson, Löfgren, vd., 2013) tarafından pik-gürültü oranı testi önerilmektedir. Buna göre, en yüksek reflektör yüksekliği genliğinin gürültüye oranı, belirlenen eşik değerinden küçük olan yansımalar anlamsız kabul edilmektedir ve analizde kullanılmamaktadır. Deniz seviyesi çalışmaları için eşik değeri çoğunlukla 2.7 ila 3.5 arasında değişmektedir.

$$\max(A) > p \times \left(\frac{\sum_{i=1}^N A_i}{n} \right) \quad (43)$$

Burada; A; genlik, p; eşik değeri, n ise veri boyutunu ifade etmektedir. LSP sonucu elde edilen periyodogramın tek bir anlamlı pik içermesinin gerekliliği Bölüm 6.1’de bahsedilmiştir. Periyogramdaki çok sayıda benzer pik noktası olması ve bunların küçük genlikleri nedeniyle periyodogramın doğruluk analizi oldukça önemlidir.

1.12.2. K-Ortalamlar Kümeleme Algoritması

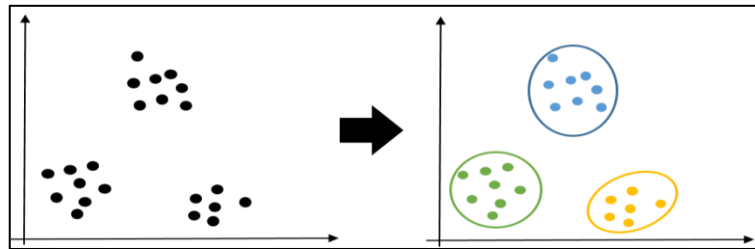
Kümeleme, verileri farklı sınıflar veya kümeler halinde sınıflandırmaktır. Bir kümelemenin kalitesi hem yöntem tarafından kullanılan benzerlik ölçütüne hem de kümeleme uygulamasına bağlıdır. K-Ortalamlar Kümeleme (k-means clustering) en eski kümeleme algoritmalarından biridir. Aynı zamanda en yaygın olarak kullanılan ve başarılı sonuçlar veren gözetimsiz öğrenme yöntemlerindendir (Sun vd., 2008). K-Ortalamlar Kümeleme algoritması ile n sayıda veri k tane kümeye bölünmektedir. Buna göre, n sayıda veriden oluşan $D = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ veri seti ve $C = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$ kümesi olsun. K-ortalamlar hata fonksiyonu,

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} d(x, \mu(C_i)) \quad (44)$$

şeklindedir. Burada, $\mu(C_i)$; C_i kümesinin merkezi, $d(x, \mu(C_i))$; C_i kümesinin merkezi ile x arasındaki uzaklıktır (Hartigan, 1975). Her bir veri ile küme merkezi arasındaki uzaklık genellikle öklid mesafesi olarak düşünüldüğünde,

$$d_{\text{öklid}}(x, \mu(C)) = \left[\sum_{i=1}^d (x_i - \mu(C)_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (45)$$

olarak hesaplanır. Algoritmanın adımları özetlenirse; (1) k küme sayısı belirlenir; (2) k tane ortalama noktası seçilir; (3) noktaların ortalamaya uzaklığı hesaplanır; (4) nokta hangisine yakınsa sınıf olarak ona atanır; (5) her sınıfın ortalaması alınır ve bütün veriler bu ortalamaya göre yeniden sınıflandırılır; (6) sınıfların ortalamaları değişmeyince kadar bu işlem devam eder. Şekil 37’de K-Ortalamlar Kümeleme ile sınıflandırma şekilsel olarak gösterilmiştir.



Şekil 37. K-Ortalamlar Kümeleme algoritması ile sınıflandırma

1.12.3. LSP-MA Yöntemi

LSP analizi sonucu hesaplanan reflektör yükseklikleri zaman serisi çoğunlukla düzensiz bileşenleri de içerebilmektedir. Düzensiz bileşen, serideki kısa dönemli dalgalanmalardan kaynaklanmaktadır. Aynı zamanda serinin yüksek frekanslı dalgalanmalarına karşılık gelmektedir. Bu nedenle, anlamlı deniz seviyesi yükseklerinin elde edilmesi zorlaşmaktadır. LSP ve MA yönteminin kombinasyonu olarak uygulanan LSP-MA ile serideki salınımlar düzeltilmektedir. Bunun için, öncelikle LSP kullanılarak reflektör yükseklikleri tahmin edilmektedir. LSP analizi Bölüm 1.11.2.1’de açıklanmıştır. LSP analizinin ardından MA filtreleme yöntemi için bu reflektör yüksekliği değerleri girdi verisi olarak alınmaktadır ve yeniden reflektör yükseklikleri hesaplanmaktadır.

MA modelleri zaman serilerinin modellenmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntem ile tüm veri setinin farklı alt kümelerinin ortalamalarının serisi oluşturularak analizler yapılmaktadır. Basit, merkezi, ağırlıklı ve üssel hareketli ortalama, olmak üzere dört sınıfa ayrılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında GNSS-IR tekniğinin performansının artırılmasına yönelik olarak geliştirilen LSP-MA yönteminde basit hareketli ortalama kullanılmıştır. MA süreci;

$$MA(k) = \frac{1}{q} \sum_{t=k-q+1}^k X_t \quad (46)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada; q; dönem sayısı, k; dönemin rölatif konumu, X_t ise t zamanındaki değişkendir. MA modelinde q dönem sayısının seçimi kritik aşamadır. Eğer q çok büyük olursa önemli düşük frekanslı değişkenlerin analizden çıkarılmasına neden olabilmektedir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

GNSS-IR tekniğinin kullanım alanları gün geçtikçe artmakta ve gelişmeye açık yeni uygulama alanları ortaya çıkmaktadır. GNSS-IR'ın deniz seviyesi değişimini izlemeye katkısına ilişkin detaylı bilgilere Bölüm 1.10.1'de yer verilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında, Türkiye kıyılarında mevcut olan IGS, Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı Aktif (TUSAGA-Aktif) ve TUDES ağı sabit GNSS istasyonlarında GNSS-IR tekniği ile (1) deniz seviyesi değişiminin belirlenmesi, (2) tekniğin gelgit kestirimine katkısının araştırılması ve (3) deniz seviyesi izlemede kullanımında çeşitli iyileştirme çalışmalarına katkı sağlayabilecek yöntemlerin geliştirilmesi amacıyla çeşitli uygulamalar yapılmıştır. Bu bölümdeki alt başlıklarda;

- Çalışma alanının belirlenmesi ve verilerin seçimi,
- Çalışma alanında GNSS-IR tekniği ile deniz seviyesi değişiminin belirlenmesinde yönelik iş akışı ve analiz detayları,
- Çalışmada kullanılan istasyonlarda GNSS-IR ile belirlenen deniz seviyesi değişimlerinin kalite değerlendirmesi,
- Meteorolojik parametrelerin GNSS yansıma sinyali üzerindeki etkisinin belirlenmesi,
- GNSS-IR tekniği ile gelgit bileşenlerinin belirlenmesi ve küresel okyanus gelgit modelleri ile karşılaştırılması

konularında yapılan uygulamalar ve analizlere yer verilecektir.

2.1. Çalışma Alanı ve Veri

Tez çalışması kapsamında ülkemiz Akdeniz, Ege, Marmara ve Karadeniz kıyılarında kıyıya yakın ve kıyıda bulunan toplam 12 sabit GNSS istasyonu değerlendirmeye alınmıştır. TUSAGA-Aktif ağında Karadeniz'de FASA, KURU, SNOP, SLEE, RZE1 ve ZONG istasyonları, Ege'de DATC istasyonu, Akdeniz'de ANMU istasyonu, Marmara'da TEKR istasyonu; IGS ağında Akdeniz'de MERS istasyonu; TUDES ağında Karadeniz'de mareograf ortak yerleşkeli TRBZ ve SNOP GNSS istasyonları kullanılmıştır (Tablo 6).

Tablo 6. Çalışmada kullanılan sabit GNSS istasyonları bilgileri

İstasyon Adı	Bölge	İstasyon Ağı	Enlem (Derece)	Boylam (Derece)	Yükseklik (m)	Deniz Yüzeyinden Yükseklik	GNSS frekansı	Veri Kayıt Aralığı	Periyot	Mareograf İstasyonu
ANMU	Akdeniz	TUSAGA- Aktif	36.0690N	32.8651E	39.644	12 m	GPS L1	30 sn	01.05.2020- 31.05.2020	Bozyazı
DATC	Ege	TUSAGA- Aktif	36.7085N	27.6918E	59.170	31 m	GPS L1	30 sn	01.05.2020- 31.05.2020	-
FASA	Karadeniz	TUSAGA- Aktif	41.0455N	37.4847E	40.976	15 m	GPS L1	30 sn	01.05.2020- 31.05.2020	-
KURU	Karadeniz	TUSAGA- Aktif	41.8461N	32.7177E	74.411	45 m	GPS L1	30 sn	01.05.2020- 31.05.2020	Amasra
MERS	Akdeniz	IGS	36.5663N	34.2558E	38.500	12 m	GPS L1,L2,L5 Galileo L1,L5	30 sn	01.01.2019- 31.12.2021	Erdemli
RZE1	Karadeniz	TUSAGA- Aktif	41.0368N	40.4930E	70.699	47 m	GPS L1	30 sn	01.05.2020- 31.05.2020	-
SINP	Karadeniz	TUSAGA- Aktif	42.0302N	35.1539E	54.576	28 m	GPS L1	30 sn	01.05.2020- 31.05.2020	Sinop

Tablo 6'nın devamı

SNOP	Karadeniz	TUDES	42.0230N	35.1494E	32.783	3 m	GPS L1,L2 GLONASS L1,L2	30 sn	16.07.2019- 31.09.2021	Sinop
SLEE	Karadeniz	TUSAGA- Aktif	41.1687N	29.6006E	127.815	91 m	GPS L1	30 sn	01.05.2020- 31.05.2020	Şile
TEKR	Marmara	TUSAGA- Aktif	40.9583N	27.4964E	48.787	10 m	GPS L1, L2	30 sn	01.05.2020- 31.12.2021	Marmara Ereğlisi
TRBZ	Karadeniz	TUDES	41.0019N	39.7445E	29.354	4 m	GPS L1,L2	30 sn	19.06.2019- 31.09.2021	Trabzon
ZONG	Karadeniz	TUSAGA- Aktif	41.4495N	31.7781E	168.140	137 m	GPS L1	30 sn	01.05.2020- 31.05.2020	-

TRBZ ve SNOP istasyonları deniz kıyısında olup diğer istasyonlar kıyıya yakın konumdadır (Şekil 38). Tablo 6’da istasyonların deniz yüzeyinden yükseklikleri verilmiştir. GNSS istasyonlarının tamamı RHCP anten donanımına ve 30 sn veri kayıt aralığına sahiptir. İstasyonlara ait donanımsal bilgiler Tablo 7’de sunulmuştur.

Tablo 7. Çalışmada kullanılan sabit GNSS istasyonları donanım bilgileri

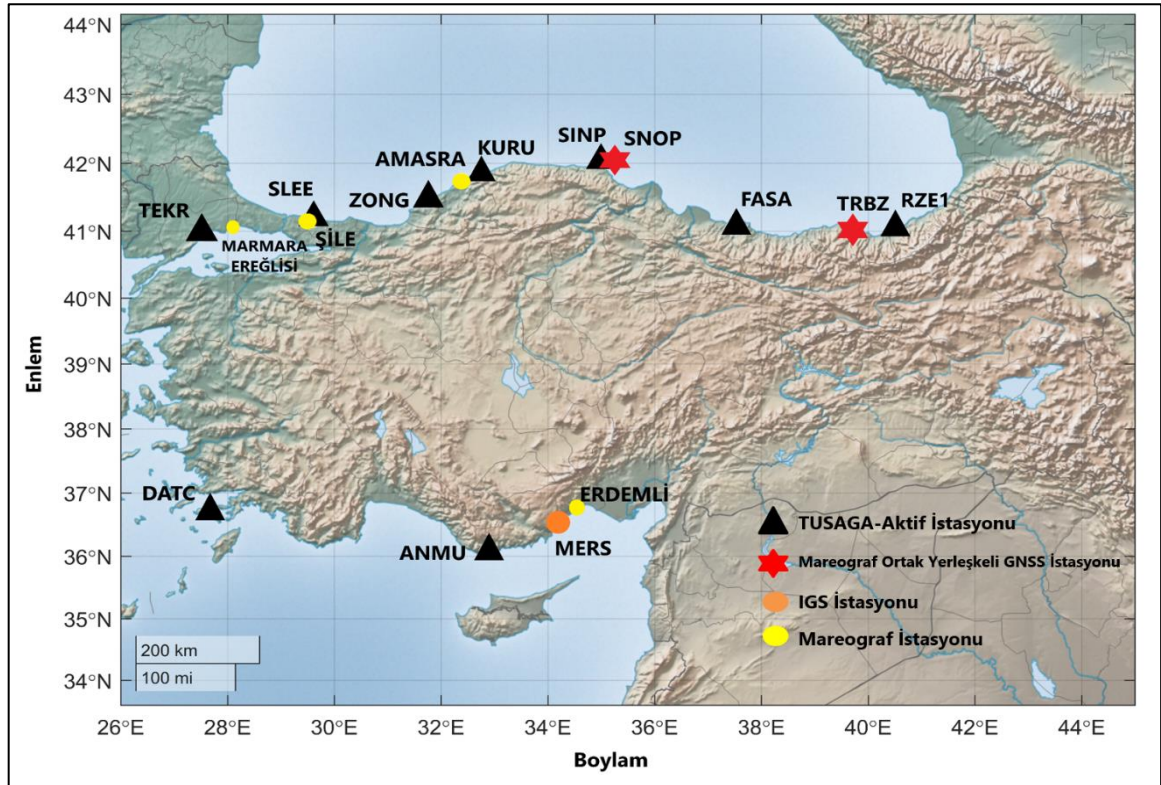
İstasyon Adı	Alıcı	Anten	Sistemler
ANMU	TRIMBLE NETR5	TRM55971.00	GPS+GLO
DATC	TRIMBLE NETR5	TRM55971.00	GPS+GLO
FASA	TRIMBLE NETR5	TRM55971.00	GPS+GLO
KURU	TRIMBLE NETR5	TRM55971.00	GPS+GLO
MERS	LEICA GR50	LEIAR10	GPS+GLO+GAL+ BDS+QZSS+SBAS
RZE1	TRIMBLE NETR5	TRM55971.00	GPS+GLO
SINP	TRIMBLE NETR5	TRM55971.00	GPS+GLO
SNOP	TPS NETG5	-	GPS+GLO+GAL
SLEE	TRIMBLE NETR5	TRM55971.00	GPS+GLO
TEKR	TRIMBLE NETR5	TRM55971.00	GPS+GLO
TRBZ	TRIMBLE	TRM41249.00	GPS
ZONG	TRIMBLE NETR5	TRM55971.00	GPS+GLO

Kıyıya yakın/kıyıda bulunan sabit GNSS istasyonlarının deniz seviyesi değişimini belirlemeye elverişli olup olmadığını belirlemek için öncelikle 1 aylık (01.05.2020-31.05.2020) kısa bir periyoda ait SNR veri seti kullanılmış ve analizler yapılmıştır. Bu analizler sonucunda deniz seviyesi değişimi belirlemeye uygun sinyal sağlayan istasyonlarda verisi bulunan yıllar ve boşluk oranları dikkate alınarak yaklaşık iki yıllık veya üç yıllık periyotlarda deniz seviyesi değişimi belirlenmiştir. GNSS-IR ile elde edilen deniz seviyesi değişimlerini karşılaştırmak için doğrulama verisi olarak TUDES (URL-19, 2022) ağında bulunan GNSS istasyonu yakınındaki veya ortak yerleşkeli mareograf istasyonları deniz seviyesi kayıtları kullanılmıştır. TUDES ağındaki tüm mareograf istasyonları radar sensöre sahip olup veri kayıt aralığı 15 dakikadır. Bu tez kapsamında kullanılan TUDES

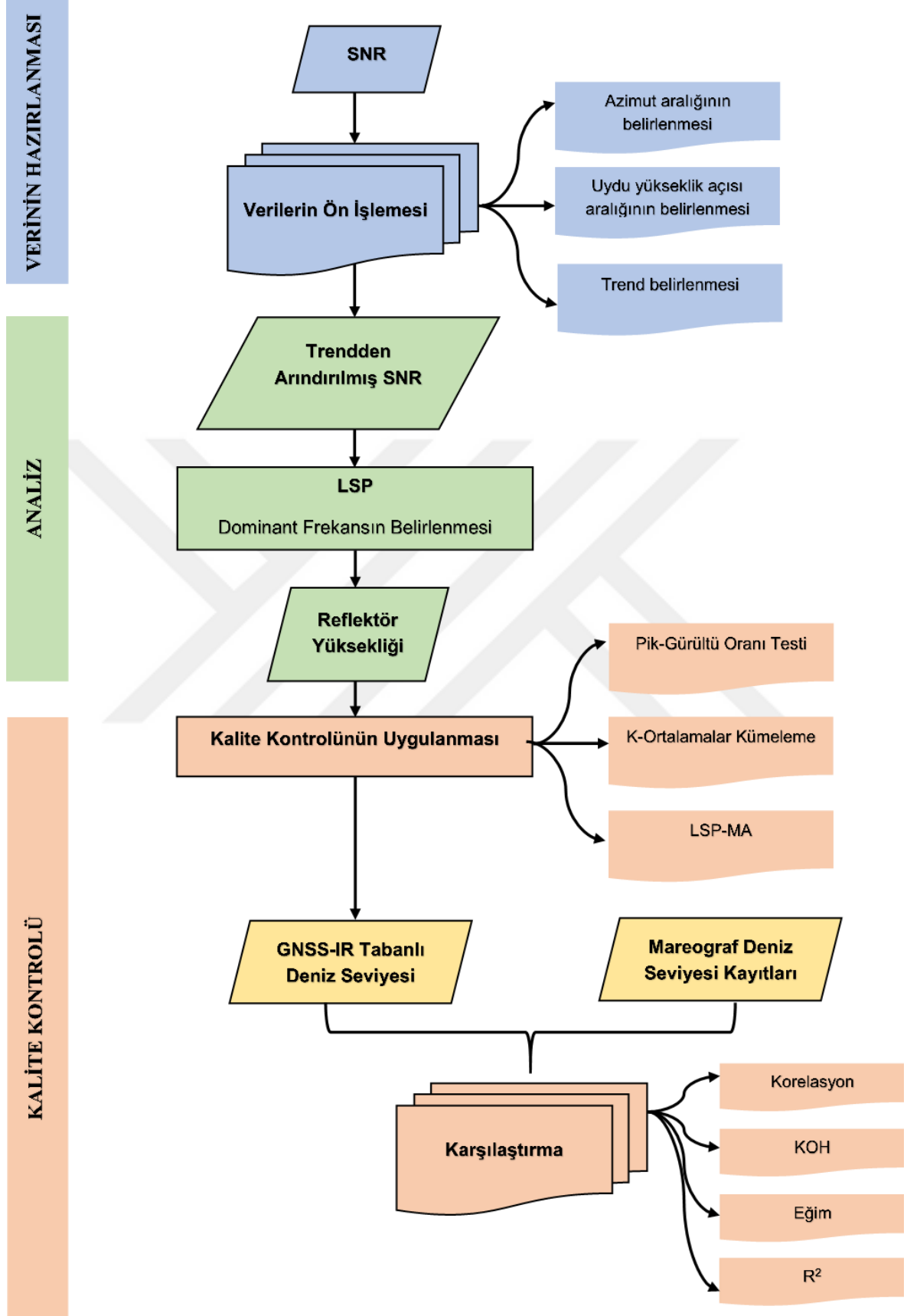
ağındaki mareograf istasyonlarına ait bilgiler Tablo 8’de verilmektedir. Şekil 38’de tezin tamamında kullanılan 12 sabit GNSS istasyonu ve TUDES ağındaki 6 mareograf istasyonunun konumsal dağılımı görülmektedir. Şekil 39’da ise bu tez çalışmasında GNSS-IR tekniği ile deniz seviyesi değişimi belirlenmesine yönelik genel iş akış şeması sunulmuştur. Çalışmada yapılan analizlerin tümü KTÜ Mühendislik Fakültesi tarafından sağlanan güncel MATLAB lisansı ile MATLAB ortamında yazılan kodlarla yapılmıştır.

Tablo 8. Çalışmada kullanılan mareograf istasyonları bilgileri

İstasyon Adı	Enlem (derece)	Boylam (derece)	Veri Kayıt Aralığı
Amasra	41.7439	32.3903	15 dk
Erdemli	36.5637	34.2553	15 dk
Marmara Ereğlisi	40.9689	27.9621	15 dk
Sinop	42.0230	35.1494	15 dk
Şile	41.1763	29.6053	15 dk
Trabzon	41.0019	39.7445	15 dk



Şekil 38. Çalışmada kullanılan istasyonlar



Şekil 39. Genel iş akış şeması

2.2. GNSS Verileri Ön Hazırlıklar

GNSS-IR tekniği ile SNR yöntemine göre deniz seviyesi değişiminin belirlenmesi için öncelikle sabit GNSS istasyonlarına ait gözlem ve navigasyon dosyalarına ihtiyaç duyulmaktadır. GNSS alıcısı üreten pek çok firma kendine özgü veri formatı kullanmaktadır. Bu veri formatları alıcıya bağımlı ve binary yapıdadır. GNSS alıcılarına ait ham veri dosyaları veri uyumu için alıcıdan bağımsız, RINEX olarak adlandırılan ortak değişim formatına dönüştürülebilmektedir. RINEX formatı; gözlem veri dosyası, navigasyon mesaj dosyası ve meteorolojik veri dosyası şeklinde ASCII dosyalarından oluşmaktadır. RINEX dosyalarının içeriğine genel olarak bakıldığında kod ve faz ölçüleri, Doppler frekansları ve SNR verileri gibi birçok bilgi bulunmaktadır. Şekil 40'ta IGS ağında bulunan MERS istasyonuna ait 1 Ocak 2020 tarihli ve 30 sn veri kayıt aralıklı örnek bir RINEX (Versiyon 2.11) dosyası gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere RINEX dosyasında, L1 SNR (S1), L2 SNR (S2) ve L5 SNR (S5) verileri mevcuttur. Örneğin; GPS PRN 27 için SNR değerlerine bakılacak olursa S1 değerinin 46.15, S2 değerinin 44.90 ve S5 değerinin 49.95 olduğu görülmektedir.

2.11	OBSERVATION DATA										M	RINEX VERSION / TYPE																									
GR50 V4.31	General Directorate										2019 12 31 23:59	PGM / RUN BY / DATE																									
MERS												MARKER NAME																									
20814M001												MARKER NUMBER																									
Geodesy	General Directorate of Mapping											OBSERVER / AGENCY																									
1870362	LEICA GR50										4.31/7.403	REC # / TYPE / VERS																									
18245024	LEIAR10										NONE	ANT # / TYPE																									
4239146.6414	2886967.1245										3778874.4800	APPROX POSITION XYZ																									
0.0800	0.0000										0.0000	ANTENNA: DELTA H/E/N																									
1	1											WAVELENGTH FACT L1/2																									
16	C1	L1	S1	F2	L2	S2	C2	C5	L5	# / TYPES OF OBSERV																											
	S5	C7	L7	S7	C8	L8	S8			# / TYPES OF OBSERV																											
30.000												COMMENT																									
2020 01 01 00 00	0.00000000										GFS	INTERVAL																									
2020 01 01 23 59	30.00000000										GFS	TIME OF FIRST OBS																									
18												TIME OF LAST OBS																									
77												LEAP SECONDS																									
BIT 2 OF LLI FLAGS DATA COLLECTED UNDER A/S CONDITION												# OF SATELLITES																									
SNR is mapped to RINEX <i>snr</i> flag value [1-9]												COMMENT																									
LX: >= 25dBHz -> 1; 26-27dBHz -> 2; 28-31dBHz -> 3												COMMENT																									
32-35dBHz -> 4; 36-38dBHz -> 5; 39-41dBHz -> 6												COMMENT																									
42-44dBHz -> 7; 45-48dBHz -> 8; >= 49dBHz -> 9												COMMENT																									
END OF HEADER																																					
420 01 01 00 00	0.00000000										0	30G10G13G15G16G20G21G26G27G29R01R02R03R09R15R16R17R18E01E03E05E08E13E15E21E26E27E30S23S26S36																									
3421760214804	34114350709948										3451000	3421760215001	3489104437490										3449600	3421760215044	3421760214006										3485391769127	3454400	09 49 09
3425085160343	34131823404670										3440950	3425085158261	34102719541684										3440300	06 46											08 46		
3423440639098	34123181388229										3447650	3423440636711	3495985490008										3440750	3423440637323											09 48		
3421470177179	34112826543633										3449750	3421470174056	3487916772656										3446600	09 48											09 48		
3420223307214	34106274211188										3449550	3420223304123	3482811055715										3449550	09 49											09 49		
3421400540543	34112460631627										3451100	3421400541608	3487631653455										3448550	09 48											09 48		
3421287541604	34111866786265										3451650	3421287542366	3487168928589										3448350	3421287542533	3421287542157										3483536889947	3455050	09 48 09
3423242634149	341122140883519										3446150	3423242633863	3495174719812										3444900	3423242634333	3423242634489										3491209100947	3449950	08 47 09
3422824410882	34119943099754										3449700	3422824408752	3493462141457										3443000	3422824409287											09 47		
3424134774148	34129014194485										3431500	13																									
3420321702701	34108440494357										3452350	3420321703700	3484342621937										3448600	3420321703750											09 08		
3421145473993	34113193362112										3448950	3421145473190	3488039296354										3447400	3421145473173											08 08		
3423977348203	34128037698227										3438550	3423977347585	3499584886915										3440800	3423977347618											05 06		
3422885224633	34122291702614										3445100	3422885225109	3495115759804										3443350	3422885225058											08 07		
3421873256575	34116843004342										3443150	3421873256788	3490877894887										3441150	3421873255879											07 06		
3420501223702	34109706189508										3451250	3420501223016	3485327045929										3447900	3420501223070											09 08		
3420634388007	34110147776196										3450050	3420634388908	34855670495905										3447900	3420634388880											09 08		

Şekil 40. MERS istasyonu örnek RINEX dosyası

Tez çalışmasında kullanılan RINEX dosyaları; TUSAGA-Aktif ağı istasyonları için TUSAGA-Aktif web portalı üzerinden (URL-20, 2022), IGS ağı istasyonu için UNAVCO üzerinden (URL-21, 2020) ve TUDES ağındaki mareograf ortak yerleşkeli sabit GNSS istasyonları ise “Karadeniz Kıyılarındaki Deniz Seviyesi Değişiminin GNSS-IR Tekniği ile Araştırılması” başlıklı projeye KTÜ ve HGM arasında imzalanan protokol kapsamında HGM’den sağlanmıştır.

Tez çalışması sırasında, HGM’den alınan mareograf ortak yerleşkeli TRBZ ve SNOP sabit GNSS istasyonları RINEX dosyalarında SNR verilerinin bulunmadığı tespit edilmiştir. Tüm GNSS alıcıları SNR verilerini kaydetmektedir. Fakat bazen bu veriler RINEX dosyalarına işlenmemektedir. Bu nedenle ilgili istasyonlara ait ham veri dosyaları HGM’den temin edilerek TEQC (URL-22, 2022; Estey ve Meertens, 1999) yazılımı ile tekrar RINEX formatına dönüştürülmüştür. TEQC; alıcı formatından alıcıdan bağımsız RINEX formatına dönüşüm, mevcut RINEX dosyalarının düzenlenmesi, post-processing öncesi verilerin kalite kontrolü gibi işlemlerde kullanılabilen bir yazılımdır. Bu şekilde yeniden oluşturulan RINEX dosyalarının SNR verilerini içerdiği görülmüştür. Sonuç olarak çalışmada kullanılan tüm istasyonların SNR verileri RINEX dosyalarından çıkarılmıştır.

2.3. SNR Verilerinin Ön İşlemesi

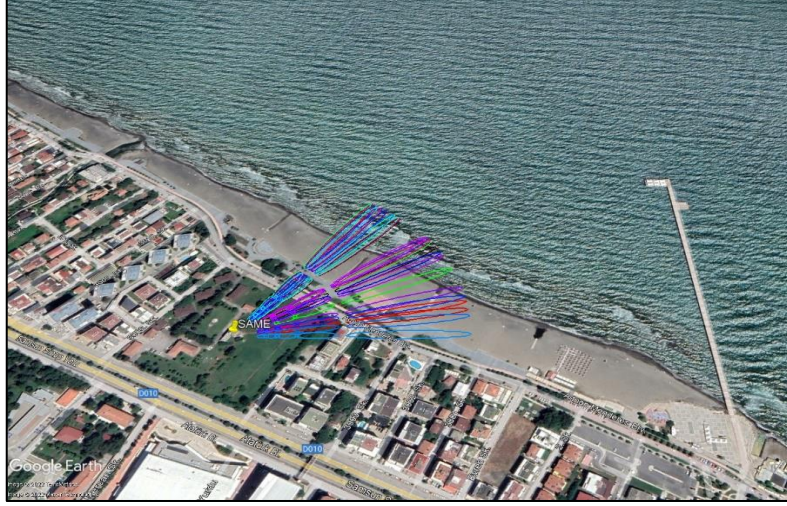
Bu bölümde GNSS-IR ile deniz seviyesi belirlemede kullanılan (1) SNR verileri için istasyonlar bazında en uygun parametre koşullarını belirlemeye yönelik analizler ve (2) SNR verilerinin analizi gerçekleştirilmiştir. Öncelikle deniz seviyesi değişiminin kestirilmesinde kullanılacak SNR verileri için en uygun parametre koşullarını belirleme amaçlı en uygun azimut ve uydu yükseklik açısı aralıklarını belirlemek üzere analizler yapılmıştır.

Yer merkezli GNSS-IR; GNSS alıcısının konumu, GNSS alıcısı ile yansıtıcı yüzey arasındaki mesafe ve GNSS uydu konumu parametrelerine bağlıdır. Bu nedenle, GNSS-IR tekniğinin kullanılacağı alana göre uygun azimut açısı ve uydu yükseklik açısı aralıklarının belirlenmesi önemlidir. Bir başka ifade ile alıcının bulunduğu konumdaki yansıma bölgelerine denk gelen GNSS uydularına ait SNR verilerinin kullanılması için uydu yükseklik açısı ve azimut aralığının, çalışmanın amacına yönelik olarak belirlenen alanı kapsamaması gerekmektedir. Örneğin; deniz seviyesi değişiminin belirlendiği çalışmalarda sadece denizel alana denk gelen yansıma sinyalleri kullanılmalıdır. Karasal alanlardan gelen yansıma sinyalleri deniz seviyesi çalışmaları için uygun olmamakla beraber yanlış sonuçlar

elde edilmesine neden olmaktadır. Bu aşamada, Fresnel bölgeleri hem en uygun parametre koşullarının belirlenmesine hem de bu koşullar altındaki yansıma sinyallerinin kapsadığı alanın görselleştirilmesine yardımcı olmaktadır. Bu tez çalışmasında; TUSAGA-Aktif ağ istasyonları, IGS ağ istasyonları ve TUDES ağ mareograf ortak yerleşkeli sabit GNSS istasyonları için istasyon bazında tek tek azimut ve uydu yükseklik açısı aralıkları belirlenmiştir. Azimut açısı ve uydu yükseklik açısı aralıklarının başlangıç ve bitiş değerlerine karar vermek için her bir istasyon özelinde uydu yükseklik açısı ve anten yüksekliği kullanılarak Bölüm 1.8.3'te belirtildiği şekilde Fresnel bölgeleri oluşturulmuştur. Oluşturulan Fresnel bölgeleri ile istasyonların yansıma alanları görülerek deniz alanlarındaki yansıma sinyallerini alacak şekilde uydu yükseklik açısı ve azimut aralığı belirlenmeye çalışılmıştır.

En Uygun Uydu Yükseklik Açısı Aralığının Belirlenmesi: δ SNR verileri uydu yükseklik açısının sinüsünün bir fonksiyonudur. Düşük yükseklik açısı koşulu altında, GNSS sinyal yansıma etkisinin SNR verileri üzerinde daha belirgin bir etkisi vardır. Jeodezik alıcılar, genellikle konumlandırma uygulamalarındaki düşük doğruluk sebebiyle 5 derecenin ($^{\circ}$) altındaki uyduları izlememektedir. Dolayısıyla 5° altındaki bir uydu için SNR verileri nadiren bulunmaktadır. Örneğin; çalışmada kullanılan TUSAGA-Aktif ağındaki TEKR sabit GNSS istasyonunda 5° altındaki uydu verileri bulunmamaktadır. Aşağıda farklı başlangıç ve bitiş değerlerinden oluşan uydu yükseklik açısı aralıkları için bazı irdelemeler yapılmıştır. Örnek olarak;

- 1) 116Y186 nolu TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında Samsun'da tesis edilen SAME sabit GNSS istasyonu ele alınmıştır. Şekil 41'de SAME istasyonunda uydu yükseklik açısı aralığının 5° - 25° olarak alındığında oluşturulan Fresnel bölgeleri gösterilmiştir. Şekil 41'e bakıldığında Fresnel bölgelerinin çoğunlukla karasal alandan gelen yansıma sinyallerini içerdiği görülmektedir. Yaklaşık olarak 7° - 25° uydu yükseklik açısı aralığındaki sinyallerin tümü karasal alandan gelmektedir.



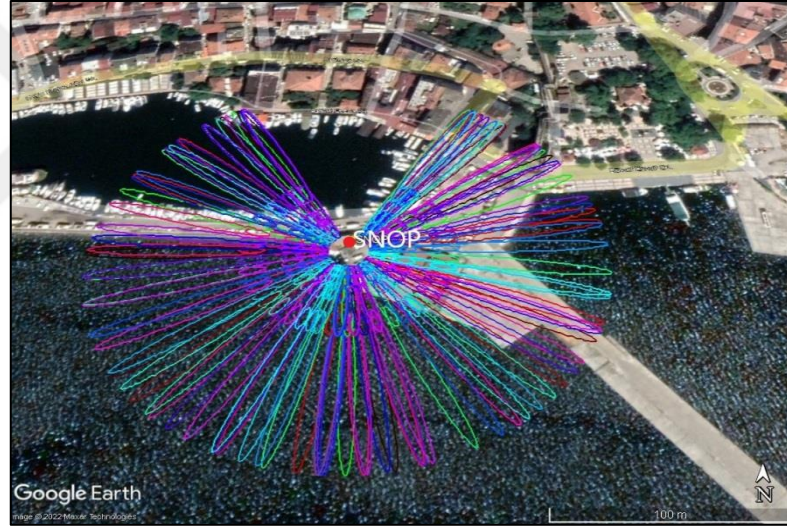
Şekil 41. SAME istasyonu 5 °- 25 °uydu yükseklik açısı aralığı

- 2) Şekil 42’de ise aynı istasyonda 1°-25° uydu yükseklik açısı aralığındaki yansımalar için Fresnel bölgeleri gösterilmiştir. Uydu yükseklik açısı aralığının başlangıç değeri 1° olarak seçildiğinde oluşturulan Fresnel bölgelerine bakıldığında ise Fresnel elipslerinin uzadığı ve denizde daha çok yansıma alanı oluştuğu görülmektedir. Bu durum her ne kadar olumlu olarak görünse de 5°’den daha düşük uydu yükseklik açılarında troposferik hatanın artış gösterdiği bilinmektedir (Anderson, 2000; Williams ve Nievinski, 2017). Tüm bu nedenlerden dolayı çalışmada kullanılan istasyonlarda minimum uydu yükseklik açısı 5° olarak alınmıştır.



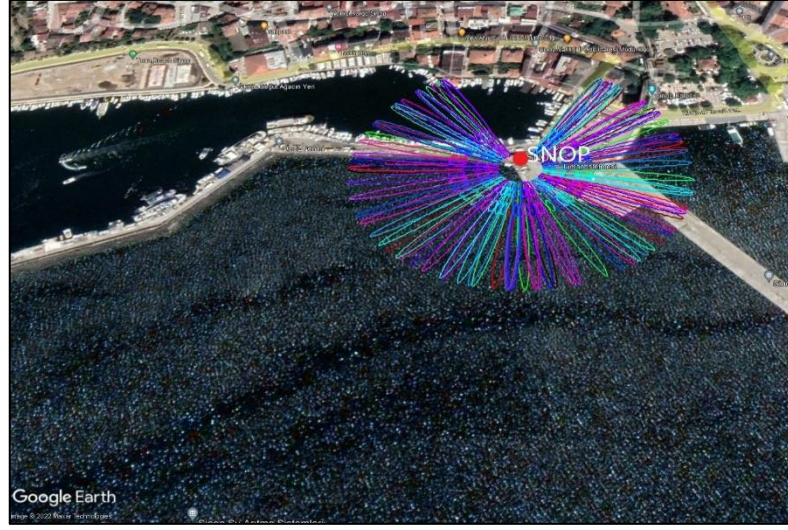
Şekil 42. SAME istasyonu 1°-25° uydu yükseklik açısı aralığı

- 3) Diğer yandan Bölüm 1.8.3'te detaylandırıldığı üzere, 25° üzerindeki uydu yükseklik açısında sinyal yansıma etkisi zayıflamaktadır. Bu nedenle çalışmada, maksimum uydu yükseklik açısı öncelikle 25° olarak alınmıştır. Ardından her bir istasyon için 5° - 25° uydu yükseklik açısı aralığında Fresnel bölgeleri oluşturulmuştur. Fakat burada önemli husus vardır; uydu yükseklik açısı arttıkça yansıma bölgeleri GNSS antenine yaklaşmaktadır. Bu nedenle hem denizden hem de karadan gelen yansıma sinyallerinin analize dahil olma ihtimali doğmaktadır. Örneğin, Şekil 43'te SNOP sabit GNSS istasyonunda 5° - 25° uydu yükseklik açısı aralığındaki yansıma sinyallerini göstermektedir. Buradan da görüldüğü üzere artan uydu yükseklik açısı ile yansıma bölgeleri karasal alanı da içerir hale gelmiştir. Bu yükseklik açıları denizin yanında limanı da içermektedir.



Şekil 43. SNOP istasyonu 5° - 25° uydu yükseklik açısı aralığı

- 4) Şekil 44'te aynı istasyonun 5° - 15° uydu yükseklik açısı aralığındaki yansıma bölgelerine bakıldığında ise çalışmanın amacına uygun olarak sadece denizel alandan gelen yansıma sinyallerini içerdiği görülmektedir. Başlangıçta 25° olarak alınan uydu yükseklik açısı bitiş değeri, çalışmada kullanılan her bir sabit GNSS istasyonu için yansıma sinyallerinin karasal alanları içerebileceği ve bazı istasyonların liman içerisinde bulunması sebebiyle gemilerin istasyon yakınında olabileceği de göz önüne alınarak yeniden belirlenmiştir.



Şekil 44. SNOP istasyonu 5° - 15° uydu yükseklik açısı aralığı

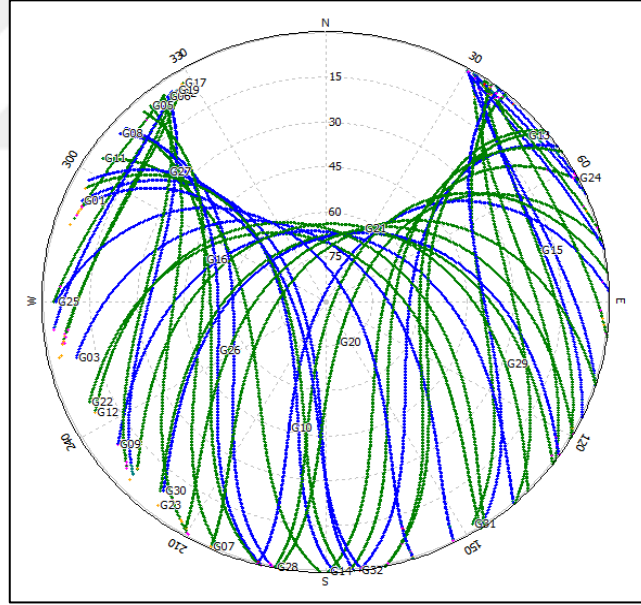
Yukarıda farklı başlangıç ve bitiş değerleri kullanılarak istasyon özelinde oluşturulan Fresnel bölgeleri gösterilerek en uygun uydu yükseklik açısı aralığının belirlenmesi stratejisi açıklanmaya çalışılmıştır. Özetle çalışmada; GNSS-IR tekniğinin temelde deniz seviyesi değişiminin belirlenmesine yönelik olan kullanım hedefi ve kullanılan sabit GNSS istasyonlarının konumları dikkate alınarak en uygun uydu yükseklik açısı aralıklarına karar verilmiştir. Diğer yandan sadece denizden yansıyan GNSS sinyallerinin çalışmaya dahil edilmesindeki bir diğer önemli husus ise azimut açısıdır. Bu nedenle uygun azimut açısı aralıklarının da belirlenmesi gerekmektedir.

En Uygun Azimut Açısı Aralığının Belirlenmesi: Fresnel bölgelerinin oluşturulması ve uygun uydu yükseklik açısı aralıklarına karar verme sürecine yukarıda değinilmiştir. Bu kısımda ise oluşturulan Fresnel bölgeleri yardımıyla azimut açısı aralıklarının belirlenmesi açıklanacaktır. Azimut açısı sınır değerlerinin belirlenmesinde de en önemli nokta çalışmanın amacına yönelik olarak aralığın seçilmesidir. Başka bir ifade ile GNSS-IR tekniği deniz seviyesi değişimi belirleme amacı ile kullanılacak ise, aynı uydu yükseklik açısı aralığı seçiminde olduğu gibi deniz alanlarından gelen yansıma sinyalleri kullanılarak karasal alandan gelen sinyaller çalışmanın dışında tutulacaktır. Aşağıda en uygun azimut açısı aralığı belirlemeye yönelik yapılan bazı irdelemeler ve detaylar verilmiştir.

- 1) Öncelikle her bir sabit GNSS istasyonunun 0° ila 360° azimut aralığındaki yansıma sinyallerine Fresnel bölgeleri yardımıyla bakılmıştır. Böylece varsa hem karasal

alandan hem de denizel alandan gelen yansıma sinyallerinin görülmesi amaçlanmıştır.

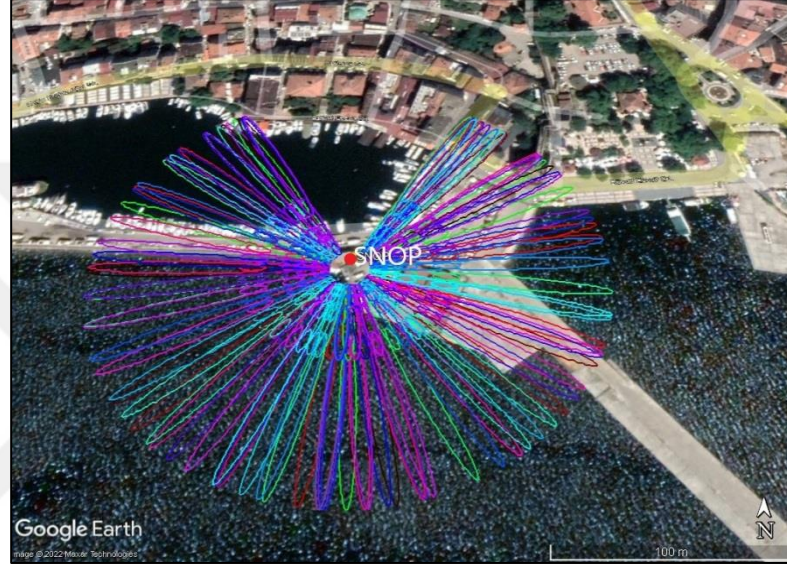
- 2) Çalışmada karasal alandan gelen sinyallerin çıkarılması için en uygun azimut açısı aralığının belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için her bir istasyonda sadece deniz alanlarından gelen yansıma sinyallerini kapsayacak şekilde yeniden azimut açısı aralıkları belirlenmiştir. Azimut başlangıç ve bitiş değerlerinin seçiminde açı değerlerinin yaklaşık yönlerinin anlaşılması bakımından açık kaynak kodlu RTKLIB (Takasu, 2009) yazılımı ile elde edilen skyplot üzerindeki açı tablasından yararlanılmıştır. Elde edilen skyplot ile hem farklı frekanslarda görülebilen GNSS uyduları hem de azimut açısı aralıkları sunulmaktadır. Şekil 45'te MERS istasyonunda 2020 yılı, yılın günü (Day of Year, DoY) 1 için L1, L2 ve L5 frekanslarında GPS uydularının görünürlüğü ve azimut açıları için örnek bir skyplot görülmektedir.



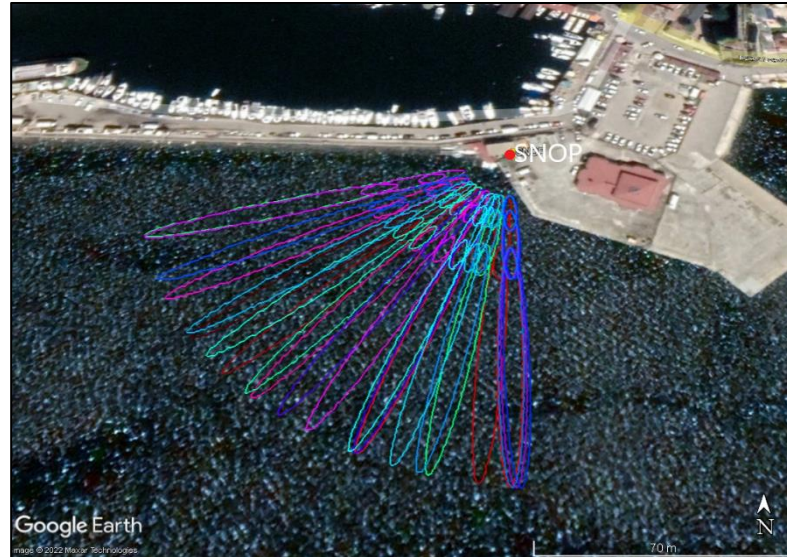
Şekil 45. MERS istasyonu DoY 1, 2020 için görülebilir uydular ve azimut açıları

- 3) Belirlenen uygun azimut açısı aralıklarındaki yansıma sinyalleri dışında karasal alandan gelen yansıma sinyalleri çalışmadan çıkarılmıştır. Örneğin, Şekil 46(a)'da SNOP istasyonunda 0°-360° azimut açısı aralığındaki yansıma bölgelerine bakıldığında; seçilen azimut aralığının bir kısmında yansıma bölgelerinin denizi

kapsamadığı, karasal alandaki yansıma sinyallerini de aldığı görülmektedir. Şekil 46 (a) tüm azimutlarda çalışılamayacağını açıkça göstermektedir. Şekil 46 (b)'de ise 180° - 260° azimut aralığı kullanılmış olup çalışmanın amacına uygun yansıma bölgelerini kapsadığı görülmektedir. Her bir istasyon için belirlenen uydu yükseklik açısı ve azimut açısı aralıklarına ait detaylı bilgiler ilerleyen bölümlerde verilmiştir.



(a) 0° - 360° azimut açısı



(b) 180° - 260° azimut açısı

Şekil 46. Uydu yükseklik açısı ve azimut aralıklarına göre Fresnel bölgesi

Aşağıda sırasıyla TUSAGA-Aktif ağ istasyonları, IGS ağ istasyonu ve TUDES ağı mareograf ortak yerleşkeli sabit GNSS istasyonları için belirlenen en uygun uydu yükseklik açısı ve azimut açısı aralıkları ve Fresnel bölgeleri verilmiştir.



Şekil 47. TUSAGA-Aktif ağı sabit GNSS istasyonları Fresnel bölgeleri

- TUSAGA-Aktif ağı sabit GNSS istasyonlarında deniz alanını kapsayacak şekilde belirlenen azimut ve uydu yükseklik açısı aralıkları Tablo 9’da sunulmuştur.

Tablo 9. TUSAGA-Aktif sabit GNSS İstasyonları azimut ve uydu yükseklik açısı aralıkları

İstasyon Adı	Azimut (Derece)	Uydu Yükseklik Açısı (Derece)
TEKR	60°- 180°	5°- 15°
ANMU	100°- 190°	5°- 7°

Tablo 9'un devamı

DATC	60°- 150°	5°- 15°
FASA	60°- 130°	5°- 7°
KURU	260°- 360°	5°- 15°
RZE1	270°- 360°	5°- 15°
SINP	290°- 360°	5°- 15°
SLEE	290°- 360°	5°- 7°
ZONG	300°- 360°	5°- 7°

Tablo 9'da belirlenen aralıklara göre TUSAGA-Aktif ağında bulunan sabit GNSS istasyonlarına ait Fresnel bölgeleri Şekil 47'de Google Earth görüntüsü üzerinde gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere, TUSAGA-Aktif istasyonları içerisinde denizel alanda en fazla uydu izine sahip istasyonlar TEKR, ANMU ve DATC istasyonlarıdır.

- IGS ağında bulunan Mersin ilindeki MERS sabit GNSS istasyonu azimut ve uydu yükseklik açısı aralıkları Tablo 10'da iken Şekil 48'de aynı istasyona ait bu aralıklardaki Fresnel bölgesi Google Earth görüntüsü üzerinde gösterilmiştir.

Tablo 10. MERS IGS istasyonu azimut ve uydu yükseklik açısı aralıkları

İstasyon Adı	Azimut (Derece)	Uydu Yükseklik Açısı (Derece)
MERS	60°- 160°	5°- 12°



Şekil 48. MERS sabit GNSS istasyonu Fresnel Bölgesi

- TUDES ağında mareograf ortak yerleşkeli SNOP ve TRBZ sabit GNSS istasyonları azimut ve uydu yükseklik açısı aralıkları Tablo 11’de sunulmuştur. Şekil 49’da ise aynı istasyonlara ait belirlenen aralıklara göre Fresnel bölgeleri Google Earth görüntüsü üzerinde gösterilmiştir. Elde edilen sonuca bakıldığında SNOP ve TRBZ istasyonlarının GNSS-IR tekniği ile deniz seviyesi değişimi belirlenmesine yönelik verileri sağlayabileceği görülmüştür.

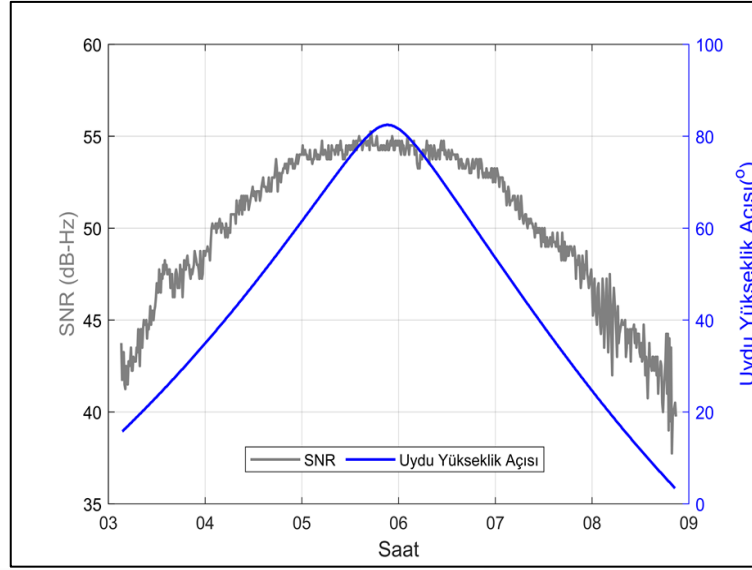
Tablo 11. TUDES ağında mareograf ortak yerleşkeli SNOP ve TRBZ sabit GNSS istasyonları azimut ve uydu yükseklik açısı aralıkları

İstasyon Adı	Azimut (Derece)	Uydu Yükseklik Açısı (Derece)
SNOP	180°- 260°	5°- 15°
TRBZ	85°- 160°	5°- 15°



Şekil 49. Mareograf ortak yerleşkeli SNOP ve TRBZ sabit GNSS istasyonları Fresnel bölgeleri

SNR Verilerinin Analizi: Bu bölümün başında anlatılan hususlara dikkat edilerek her bir istasyon için azimut açısı ve uydu yükseklik açısı aralıkları belirlendikten sonra bu aralıklardaki SNR verilerinin değerlendirilmesi aşamasına geçilmiştir. Şekil 50’de MERS istasyonu GPS (PRN: 2) uydusuna ait 2020 yılı, DoY 001 SNR verisi ve uydu yükseklik açısı arasındaki ilişki gösterilmiştir.

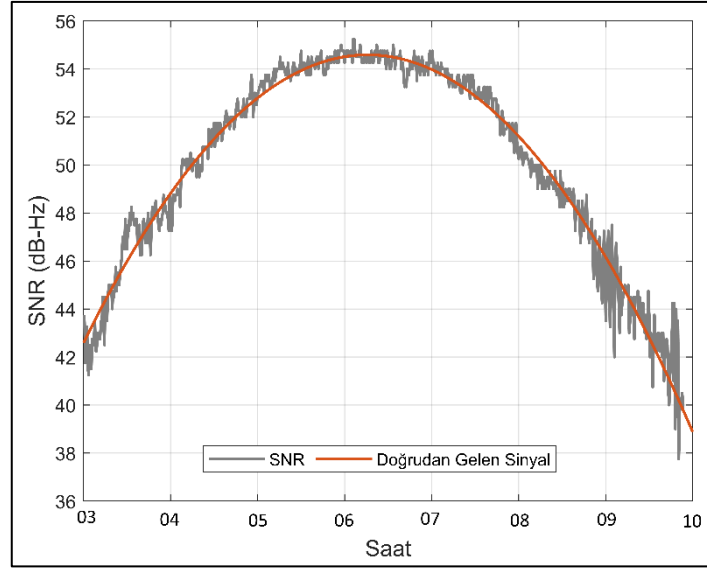


Şekil 50. SNR ve uydu yükseklik açısı ilişkisi

Şekil 50’de görüldüğü üzere uydunun yükselme ve alçalma durumu arasında zaman farkı vardır. Dolayısıyla SNR verilerinin de uydunun yükselme ve alçalma durumuna göre sınıflandırılması gerekmektedir. Bunun için; Tablo 6’da gösterilen her bir istasyon için belirlenen uydu yükseklik açısı ve azimut aralıklarındaki SNR verileri yükselen ve alçalan uydu geçişi olarak iki gruba ayrılmış olup bu iki SNR veri seti üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir.

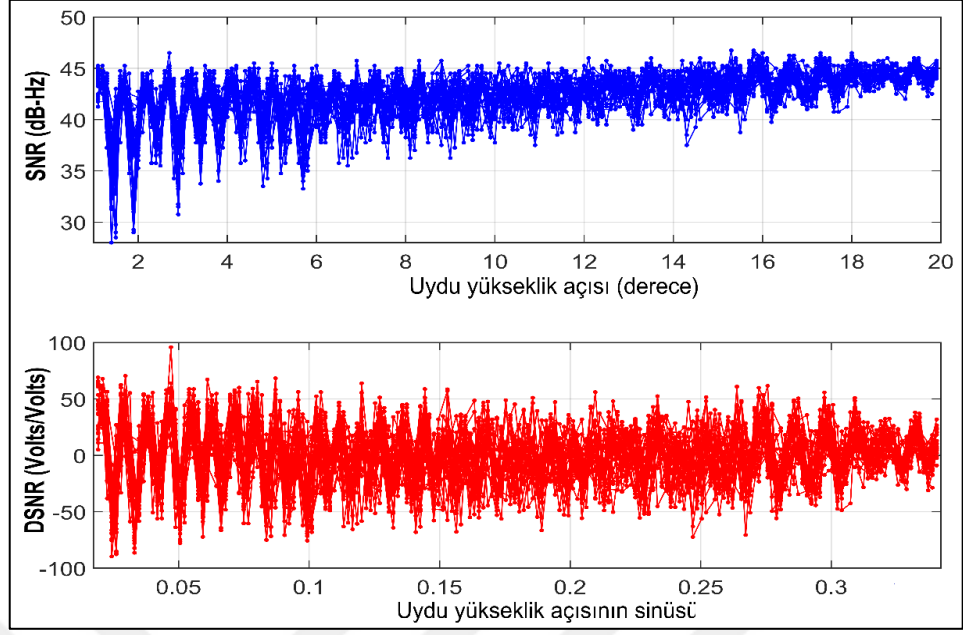
SNR analizinde önemli iki nokta vardır. Birincisi;

- RINEX dosyalarından alınan SNR verilerinin logaritmik ölçekte ve dB biriminde olmasıdır. SNR verilerinin dB biriminde kullanılmasının uygun olmadığı Bölüm 1.11’de açıklanmıştır. Bu yüzden SNR verileri dB biriminden lineer ölçeğe ($SNR_{volts/volts} = 10^{SNR_{dB}/20}$) volts/volts birimine dönüştürülmüştür. İkincisi ise;
- SNR salınımları hem doğrudan gelen ve hem de yansıyan sinyalleri içermektedir. Şekil 51’de MERS istasyonu GPS (PRN: 2) uydusuna ait 2020 yılı, DoY 001 SNR verisi ve doğrudan gelen sinyal gösterilmiştir.



Şekil 51. SNR ve doğrudan gelen sinyal ilişkisi

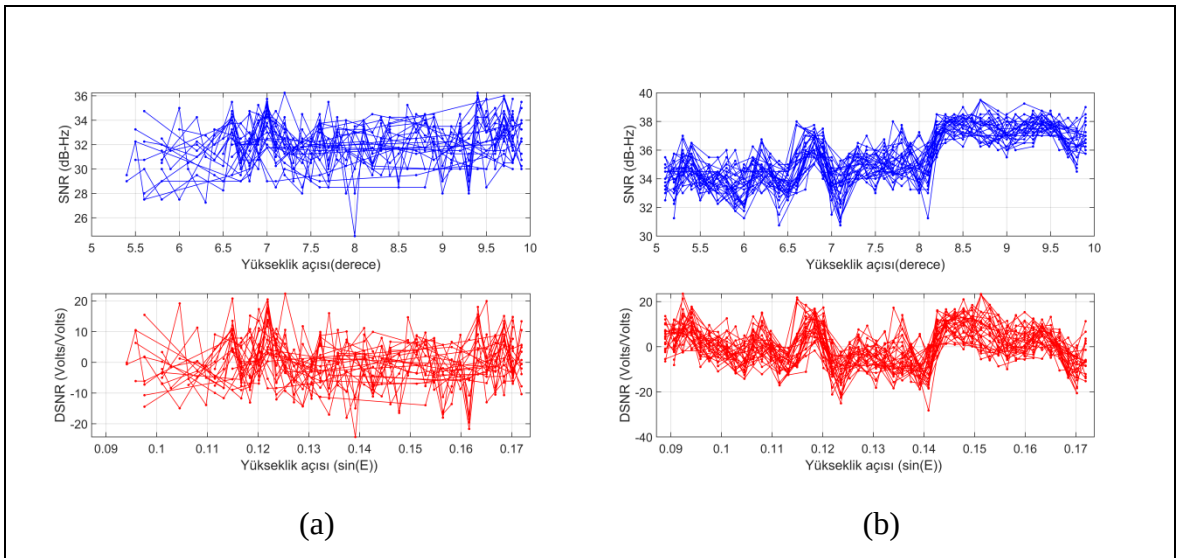
GNSS-IR tekniğinde sadece yansıyan GNSS sinyallerine ihtiyaç duyulduğundan ve doğrudan gelen sinyalin dominant olduğu durumda deniz yüzeyinden yansıyan sinyalin etkisinin görülmesi zor olduğundan, SNR salınımlarındaki doğrudan gelen sinyal etkisinin çıkarılması gerekmektedir. Bunun için SNR verilerine ikinci dereceden polinom geçirilerek Eşitlik (33)'te gösterildiği şekilde doğrudan gelen sinyalin etkisinden arındırılmış diğer bir ifadeyle trendden arındırılmış SNR (δ SNR) verileri elde edilmiştir. Polinomun derecesine karar verme kısmında öncelikle birinci dereceden başlanılmış olup sırayla polinomun derecesi yükseltilmiştir. Bu aşamada parametre anlamlılık testinden de yararlanılmıştır. Anlamlılık testine göre ikinci dereceden polinom tüm istasyon verilerinde anlamlı çıkmıştır. Burada bir diğer önemli husus; polinomun doğrudan gelen sinyali temsil ettiği ve deniz seviyesi değişimi ölçümü ile ilgisi olmadığıdır. Yapılan trendden arındırma işleminden sonra ilerleyen aşamalarda δ SNR veri seti üzerinden devam edilmiştir. Şekil 52'de örnek olarak MERS istasyonu GPS L1 sinyalinde bir aylık SNR ve δ SNR salınımları gösterilmiştir. Şekil 52'de üstte henüz trendden arındırılmamış SNR salınımı gösterilmiştir. Burada; SNR verilerinin ~ 45 dB-Hz seviyesine kadar düzgün olarak yükseldiği görülmektedir. Alttaki şekilde ise polinom geçirilerek trendden arındırılan SNR salınımı gösterilmiştir. Bu aşamada düzlemsel yatay yüzey için uydu yükseklik açısının sinüsü gibi sabit bir frekansa ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 52. MERS istasyonuna ait SNR salınımları. (Üst) uydu yükseklik açısının fonksiyonu olan SNR. (Alt) uydu yükseklik açısının sinüsünün fonksiyonu olan δ SNR.

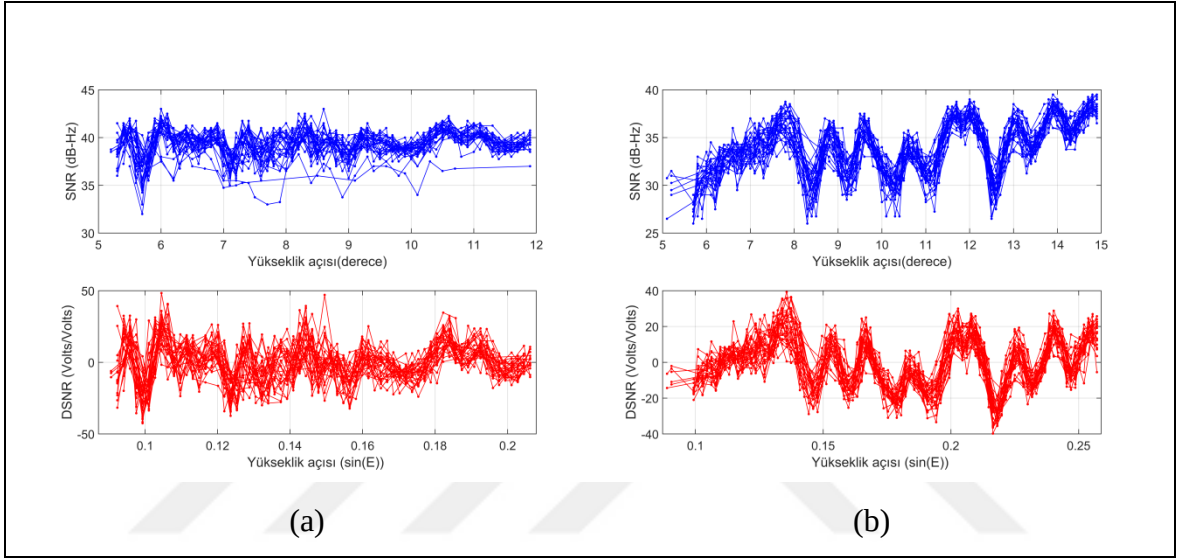
Çalışmada kullanılan tüm sabit GNSS istasyonları incelendiğinde;

- FASA, SLEE ve ZONG istasyonlarında dar yükseklik açısı aralığının kullanılması gerekliliğinden dolayı yeteri kadar SNR verisine sahip olmadığı ve zayıf yansıma genliklerine sahip olduğu (Şekil 53),



Şekil 53. FASA ve SLEE istasyonları SNR salınımları. (a) FASA istasyonu, (b) SLEE istasyonu

- SINP istasyonunda da denizel alanı kapsayan dar azimut açısından dolayı yeteri kadar SNR verisi olmadığı,
- KURU ve RZE1 istasyonlarındaki uydu izlerinin büyük bölümünün karaya denk geldiği,
- ANMU ve DATC istasyonlarında belirlenen uydu yükseklik açısı aralığındaki yetersiz SNR verisi ve zayıf yansıma genlikleri olduğu görülmüştür (Şekil 54).



Şekil 54. ANMU ve DATC istasyonları SNR salınımları. (a) ANMU istasyonu, (b) DATC istasyonu

Sonuç olarak TRBZ ve SNOP mareograf ortak yerleşkeli sabit GNSS istasyonları, MERS IGS istasyonu ve TUSAGA-Aktif bünyesindeki TEKR istasyonu GNSS-IR tekniği ile deniz seviyesi değişimi belirlemeye elverişli istasyonlar olarak bulunmuştur (Şekil 55). Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde bu istasyonlarda yapılan analizler üzerinden devam edilecek olup elde edilen sonuçlar gösterilecektir.



Şekil 55. GNSS-IR ile deniz seviyesi değişimi belirlemeye uygun istasyonlar. TRBZ (a) ve SNOP (b) (URL-19, 2022), MERS (c) (URL-17,2022) ve TEKR (d) sabit GNSS istasyonları

Çalışmada; GPS, GLONASS ve Galileo sistemlerinden alınan çok frekanslı SNR verileri değerlendirilmiştir. Aşağıda çalışmada kullanılan sabit GNSS istasyonları özelinde hangi sistemlerin ve frekansların kullanıldığı açıklanmıştır.

GPS verileri;

- Mareograf ortak yerleşkeli TRBZ ve SNOP sabit GNSS istasyonları GPS L1 SNR ve GPS L2 SNR verileri analiz edilmiş olup TRBZ istasyonunda L2 sinyali, SNOP istasyonunda ise L1 sinyalinin bozulmuş olduğu görülmüştür. Bu nedenle TRBZ istasyonunda GPS L1 ve SNOP istasyonunda GPS L2 sinyalleri analizde kullanılmıştır.
- IGS ağındaki bulunan MERS istasyonunda ise GPS L1, L2 ve L5 sinyalleri mevcut olup yapılan analiz neticesinde GPS L2 sinyalinin bozuk olduğu görülmüştür. Bu nedenle MERS istasyonunda GPS L1 SNR ve GPS L5 SNR verileri kullanılmıştır.
- TUSAGA-Aktif ağındaki TEKR istasyonunda ise sadece GPS L1 ve GPS L2 SNR verileri kullanılmıştır.

GLONASS verileri;

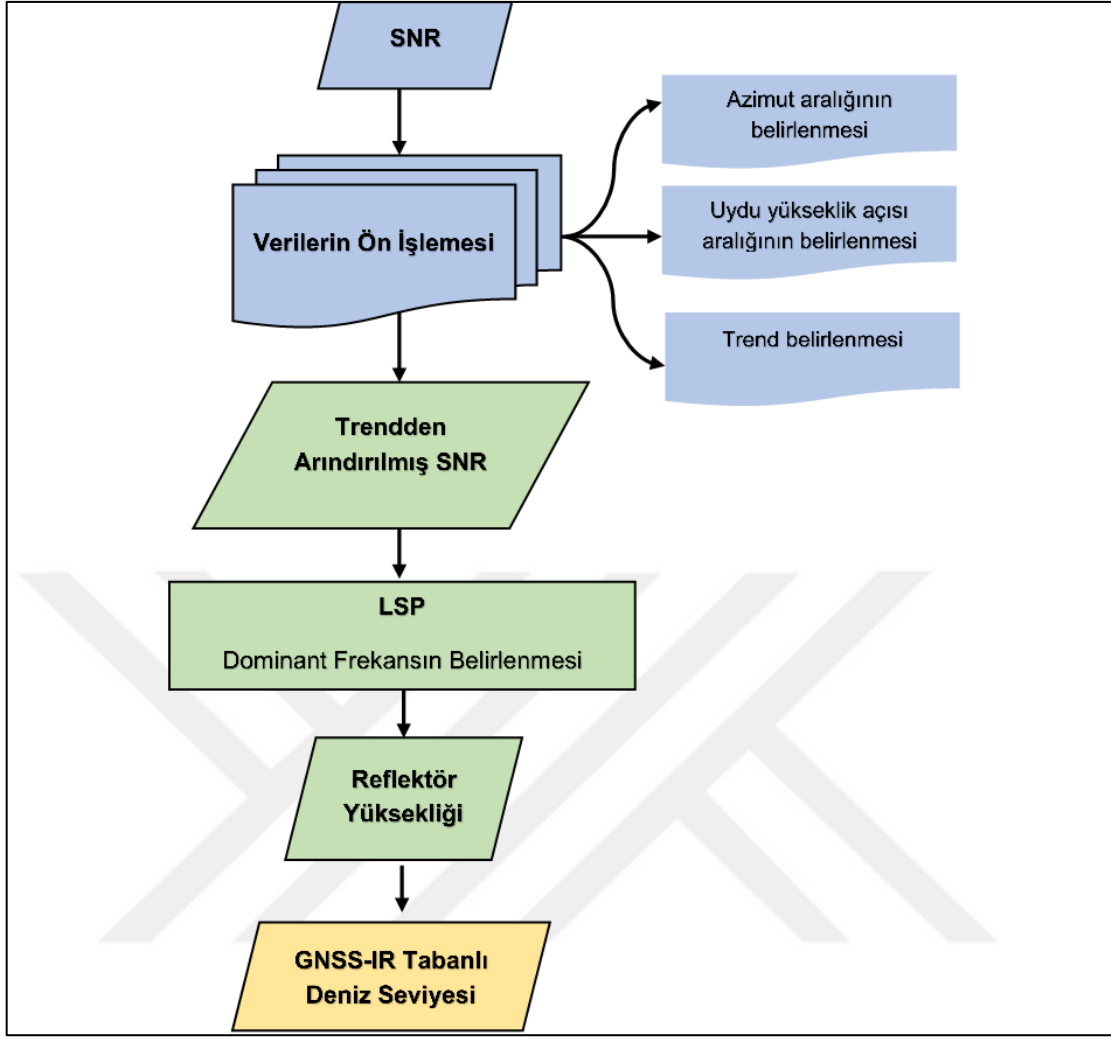
- TRBZ istasyonunda sadece GPS sinyali mevcut olduğundan GLONASS sistemine ait sinyaller çalışmada kullanılamamıştır.
- SNOP istasyonunda GPS verilerinin yanında GLONASS verileri de değerlendirmeye alınmıştır. Fakat bu istasyonda GLONASS yansıyan sinyal gücü GPS verilerinden düşüktür. Diğer yandan kaba hatalı ölçü sayısı fazla olduğundan ve gerçeği yansıtmayan reflektör yüksekliklerine sebebiyet vereceğinden GLONASS verileri çalışmaya katılmamıştır.
- MERS istasyonunda GLONASS SNR verileri incelendiğinde fazlaca eksik veriye sahip olduğu ve kaba hatalı ölçünün çok olduğu görülmüş olup analizde kullanılmasının uygun olmadığına karar verilmiştir.

Galileo verileri;

- TRBZ, SNOP ve TEKR istasyonlarında Galileo verileri mevcut değildir.
- MERS istasyonunda Galileo L1 SNR ve Galileo L5 SNR verileri analizde kullanılmıştır.

2.4. GNSS-IR Tekniği ile Deniz Seviyesi Değişiminin Belirlenmesi

Çalışma kapsamında kullanılan kıyıda ve kıyıya yakın 12 sabit GNSS istasyonuna ait SNR verilerinin ön işleminin ardından elde edilen δ SNR verilerinden deniz seviyesi değişiminin belirlenmesi adımına geçilmiştir. Bu bölümde GNSS-IR tekniği ile deniz seviyesi değişiminin belirlenmesine ilişkin işlem adımları verilmiştir. Şekil 56'da GNSS-IR tekniği ile deniz seviyesi değişiminin belirlenmesi iş akış şeması sunulmuştur.



Şekil 56. GNSS-IR tekniği ile deniz seviyesi değişiminin belirlenmesi iş akış şeması

GNSS-IR tekniği ile deniz seviyesi değişiminin belirlenmesi aşamasında öncelikle reflektör yüksekliklerinin hesaplanması gerekmektedir. Reflektör yüksekliği kavramı Bölüm 1.8.3 ve Bölüm 1.11.1’de açıklanmıştır. Reflektör yüksekliklerinin belirlenmesi için; GNSS-IR tekniğine dayalı olarak deniz seviyesi değişimi belirlemeye elverişli bulunan TRBZ, SNOP, MERS ve TEKR sabit GNSS istasyonları δ SNR verilerine Bölüm 1.11.2.1’de anlatıldığı şekilde LSP analizi uygulanmıştır. LSP analizi işlem adımlarına ilişkin detaylar sırasıyla aşağıda verilmiştir.

Reflektör Yükseklikleri Aralıklarının Belirlenmesi: LSP sonucu elde edilecek olan tüm reflektör yüksekliklerinin daima deniz seviyesinde olacağı düşünülmemelidir. Bu nedenle; reflektör yüksekliklerinin belirlenmesi aşamasında gerçeği yansıtan, yani deniz yüzeyini kapsayacak uygun reflektör yükseklikleri elde etmek için her bir istasyon özelinde reflektör

yükseklikleri aralıkları belirlenmiştir. Burada belirlenen maksimum reflektör yüksekliği, en yüksek frekans faktörü (hifac) parametresinin hesaplanmasında önemlidir. Reflektör yükseklikleri aralıkları başlangıç ve bitiş değerlerinin belirlenmesinde Tablo 6’da bulunan her bir istasyonun deniz seviyesinden olan yüksekliği dikkate alınmıştır. Farklı başlangıç ve bitiş değerleri seçilerek hesaplanan LSP periyodogramı çizdirilmiştir. Periyodogramda genlikler ve reflektör yükseklikleri sürekli olarak kontrol edilerek güçlü yansıma genliklerinin elde edildiği aralıklar en uygun minimum ve maksimum reflektör yüksekliği değeri olarak alınmıştır. Çalışmada kullanılan TRBZ, SNOP, MERS ve TEKR sabit GNSS istasyonları reflektör yüksekliği (h) aralıkları Tablo 12’de gösterilmiştir.

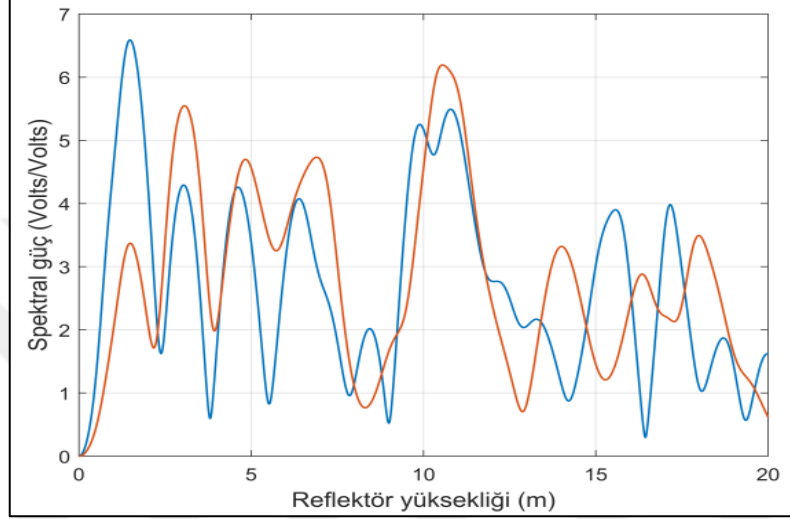
Tablo 12. Çalışmada kullanılan sabit GNSS istasyonları reflektör yüksekliği aralıkları

İstasyon Adı	Minimum h (m)	Maksimum h (m)
TRBZ	2	8
SNOP	2	8
MERS	7	15
TEKR	8	15

Örnekleme Frekanslarının Belirlenmesi: LSP analizine geçmeden önce en yüksek frekans faktörü (hifac) ve aşırı örnekleme faktörü (ofac) parametreleri hesaplanmıştır. Öncelikle LSP salınımlarında tepe (pik) noktasını istenilen hassasiyette bulmak için reflektör yüksekliği frekanslarının grid aralığı olan ofac Eşitlik (42)’e göre hesaplanmıştır. Eşitlik (42)’de GNSS-IR ile deniz seviyesinin kestiriminde istenilen hassasiyet literatürdeki çalışmalardan hareketle 5 mm olarak alınmıştır (Roesler ve Larson, 2018). Ardından çok yüksek salınım frekansındaki gerçeği yansıtmayan reflektör yüksekliklerinin sınırlandırılması için Eşitlik (41)’de belirtildiği üzere hifac parametresi hesaplanmıştır.

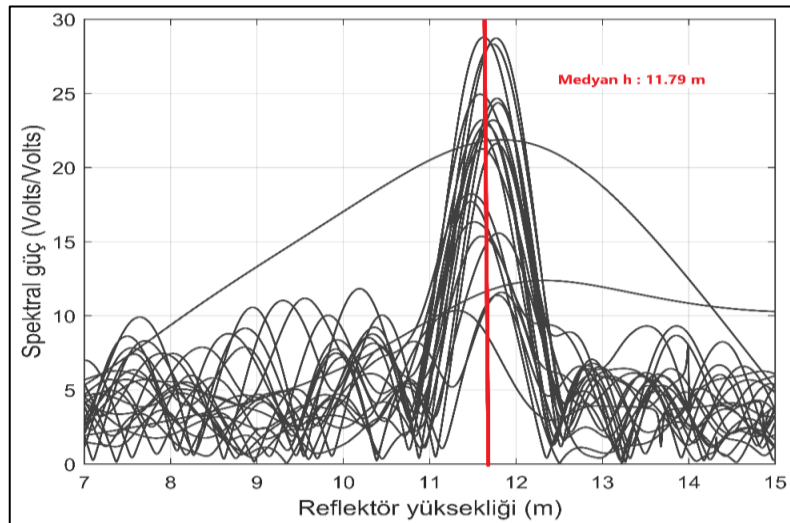
Reflektör Yüksekliklerinin Hesaplanması ve Deniz Seviyesinin Belirlenmesi: Örnekleme frekansları da hesaplandıktan sonra LSP analizi ile en yüksek spektral güce karşılık gelen baskın yansıma etkisi frekansları hesaplanmıştır. Hesaplanan spektral güç Eşitlik (35) kullanılarak reflektör yüksekliğine dönüştürülmüştür. LSP analizinde periyodogramın tek bir anlamlı tepe noktası içermesi önemlidir. Eğer periyodogramda birden çok tepe noktası elde ediliyorsa dominant frekans hesaplanamamıştır ve reflektör yüksekliğine

dönüştürülememiştir. Şekil 57’de TUSAGA-Aktif ağında bulunan FASA sabit GNSS istasyonunda, 2020 yılı DoY 122 ve DoY 123 için GPS uydularından hesaplanan LSP salınımları gösterilmiştir. Şekilde yatay eksen reflektör yüksekliklerini temsil etmektedir. Grafiğe bakıldığında birden çok tepe noktası varlığı ve zayıf yansıma genliği görülmektedir. Dolayısıyla reflektör yüksekliği hesaplanamamaktadır.



Şekil 57. Birden çok tepe noktası içeren LSP salınımları

Şekil 58’de ise MERS sabit GNSS istasyonunda, 2020 yılı DoY 001 için LSP grafiği verilmiştir.



Şekil 58. Tek tepe noktası içeren LSP salınımları

Şekil 58’de ilgili gündeki her bir GPS uydusundan elde edilen LSP salınımları mevcuttur. Grafiğe bakıldığında tek bir tepe noktası içerdiği ve güçlü yansıma genliğine sahip olduğu görülmektedir. Her bir uydudan elde edilen reflektör yüksekliklerinin medyan değeri o güne ait reflektör yüksekliği olarak alınmaktadır. MERS istasyonu 2020 yılı DoY 001 için reflektör yüksekliği 11.79 m olarak hesaplanmıştır. Tablo 13’te örnek olarak her bir uydudan hesaplanan reflektör yükseklikleri verilmiştir.

Tablo 13. MERS sabit GNSS istasyonu DoY 001, 2020 GPS uyduları reflektör yükseklikleri

Uydu Numarası	Reflektör Yüksekliği	Uydu Numarası	Reflektör Yüksekliği
2	11.869	15	11.9
5	11.725	16	11.905
6	11.899	19	11.849
7	11.795	20	11.959
8	11.855	22	11.6
9	11.75	23	11.974
10	11.92	26	11.924
11	11.615	28	11.785
12	11.715	29	11.775
14	11.795	31	11.67

Son olarak, Bölüm 1.11.2’de belirtildiği üzere reflektör yüksekliklerinin GNSS anteninin ortometrik yüksekliğinden farkı alınarak her bir istasyonda deniz seviyesi belirlenmiştir. İlerleyen bölümlerde tüm istasyonlarda elde edilen deniz seviyesi değişimi grafikleri ve istatistiksel sonuçları verilmiştir.

GNSS-IR Deniz Seviyesi Değişimi ile Mareograf Kayıtlarının Karşılaştırılması: GNSS-IR tekniğine dayalı olarak hesaplanan deniz seviyesi değişimi istasyona ortak yerleşkeli veya istasyon yakınında bulunan mareograf istasyonu kayıtları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmadan önce mareograf verileri günlük verilere dönüştürülmüştür. Diğer yandan GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi değişimleri anten faz merkezine göre referanslandırılmaktadır. Mareograf deniz seviyesi değişimleri ise istasyonun bulunduğu zeminle ilişkilidir. Bu nedenle iki zaman serisi arasındaki datum farkını kaldırmak için

mareograf verilerinden deniz seviyesinin ortalaması çıkarılmıştır. Daha sonra GNSS-IR ve mareograf deniz seviyesi değişimi zaman serileri karşılaştırılmıştır.

2.5. GNSS-IR Deniz Seviyesi Değişimi Kalite Değerlendirmesi

LSP analizinde periyodogramda çok sayıda benzer tepe noktası ve bunların küçük genlikleri olmaktadır. Bu nedenle periyodogramın kontrolü ve doğruluk, duyarlık ve güvenilirlik analizleri gibi kalite değerlendirmesi analizleri oldukça önemlidir. Kalite değerlendirme analizleri, diğer yandan deniz seviyesi değişimi verilerinde anormal şartlardan kaynaklı gürültü tespiti için önemli olmaktadır. Buradan bahsedilen anormal şartlar; istasyon etrafındaki bir kayalık veya limanda bulunan bir istasyon yakınındaki gemi varlığı olabilir. Özellikle yüksek frekanslı gürültü olmak üzere çeşitli frekanslardaki gürültünün SNR serilerinde görülmesi olasıdır. LSP analizi ile bir SNR serisinin tüm frekanslarının gücünün gösterildiği Bölüm 1.11.2.1 başlığında açıklanmıştır. Burada özellikle dikkat edilmesi gereken bir durum; gerçeği yansıtmayan bir frekansın gücünün deniz yüzeyi yansıması olarak kabul edilen yansıtma frekansının gücünden daha büyük olabilme ihtimalidir. Yapılan kalite değerlendirmesi ile gerçeği yansıtmayan reflektör yüksekliklerinin belirlenmesi ve analizden çıkarılmasının GNSS-IR tekniğinin performansına etkisi araştırılmıştır. Tez çalışması kapsamında; hem Türkiye hem de ABD'den seçilen sabit GNSS istasyonları için üç farklı kalite değerlendirmesi yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemlerden biri birçok çalışmada tercih edilen Pik-Gürültü Oranı testi, diğeri daha önce GNSS-IR tekniğinde kullanımına rastlanılmayan K-Ortalamalar Kümeleme algoritması ve son olarak bu tez çalışmasında LSP ve MA yöntemlerinin kombinasyonu ile geliştirilen LSP-MA yöntemidir. Aşağıda başlıklar halinde detaylar verilecektir.

Kullanılan yöntemlerin tamamında yapılan analizler sonucunda elde edilen GNSS tabanlı deniz seviyesi değişimi verisini karşılaştırıp doğrulama yapmak için mareograf kayıtları kullanılmıştır. İstasyon yakınında veya istasyona ortak yerleşkeli mareograf istasyonlarında kaydedilen deniz seviyesi değişimi verilerine karşılaştırma yapmadan önce uyumsuz ölçüler testi uygulanmıştır. Uyumsuz ölçülerin belirlenmesinde t-testi kullanılmıştır. Δ_j , j numaralı ölçüdeki kaba hata olmak üzere her bir i ölçüsüne karşılık fonksiyonel model,

$$l + v = [A \quad e_j] \begin{bmatrix} x \\ \Delta_j \end{bmatrix} \quad (47)$$

şeklinde ifade edilir. Burada l ; ölçü, v ; düzeltmeler, A ; katsayılar matrisi, x ; bilinmeyenler ve e_j ; j . birim vektörünü ifade etmektedir. Eşitlik (47)'den kaba hatanın ters ağırlığı ($q_{\Delta\Delta}$) ve j . ölçüdeki kaba hatanın büyüklüğü (Δ_j) sırasıyla,

$$q_{\Delta\Delta} = \frac{1}{e_j^T P Q_{vv} P e_j} \quad (48)$$

ve

$$\Delta_j = - \frac{e_j^T P v}{e_j^T P Q_{vv} P e_j} \quad (49)$$

olarak hesaplanır. Eşitlik (48) ve Eşitlik (49)'da P ; ölçülerin ağırlığı, Q_{vv} ise düzeltmelerin ters ağırlık matrisidir. Hesaplanan kaba hatanın anlamlı olup olmadığına karar verebilmek için sıfır (H_0) ve seçenек (H_S) hipotezleri,

$$\begin{aligned} H_0 : E(\Delta_j) &= 0 \\ H_S : E(\Delta_j) &\neq 0 \end{aligned} \quad (50)$$

şeklinde oluşturulur. Ardından test büyüklüğü,

$$T = \frac{|e_j^T P v|}{m_0 \sqrt{e_j^T P Q_{vv} P e_j}} \quad (51)$$

şeklinde hesaplanır. Burada m_0 birim ölçünün ortalama hatasının soncul değeridir. f serbestlik derecesi olmak üzere,

$$m_0 = \pm \sqrt{\frac{1}{f-1} ([P_{vv}] - \frac{(e_j^T P v)^2}{e_j^T P Q_{vv} P e_j})} \quad (52)$$

şeklindedir. Eşitlik (51)'den hesaplanan test büyüklüklerinin maksimum değeri ($T_{\max}$) t tablo değeri ile karşılaştırıldığında $T_{\max} \geq t_{f-1,1-\frac{\alpha}{2}}$ ise j. ölçünün uyumsuz olduğuna karar verilerek j. ölçü veri setinden çıkarılmaktadır (Öztürk ve Şerbetçi, 1992).

Mareograf kayıtlarına yapılan uyumsuz ölçülerin ardından GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi değişimi verileri ile karşılaştırma aşamasına geçilmiştir. Bunun için Pearson korelasyonu ve KOH hesaplanmıştır. Burada, GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi değişimi ve mareograf deniz seviyesi değişimi verileri arasındaki doğrusal ilişkinin ölçütü olarak Pearson korelasyonu ($r_{\text{GNSSIRmar}}$),

$$r_{\text{GNSSIRmar}} = \frac{m_{\text{GNSSIRmar}}}{m_{\text{GNSSIR}}m_{\text{mar}}} \quad (53)$$

eşitliği ile hesaplanır. Eşitlik (53)'te m_{GNSSIR} ve m_{mar} ; değişkenlerin ortalama hataları, $m_{\text{GNSSIRmar}}$; ise $(\text{GNSSIR}_i, \text{mar}_i)$ değişken çiftinin kovaryansını ifade etmektedir. KOH ise,

$$\text{KOH} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(d_{\text{GNSSIR}_i} - d_{\text{mar}_i})^2}{(n-1)}} \quad (54)$$

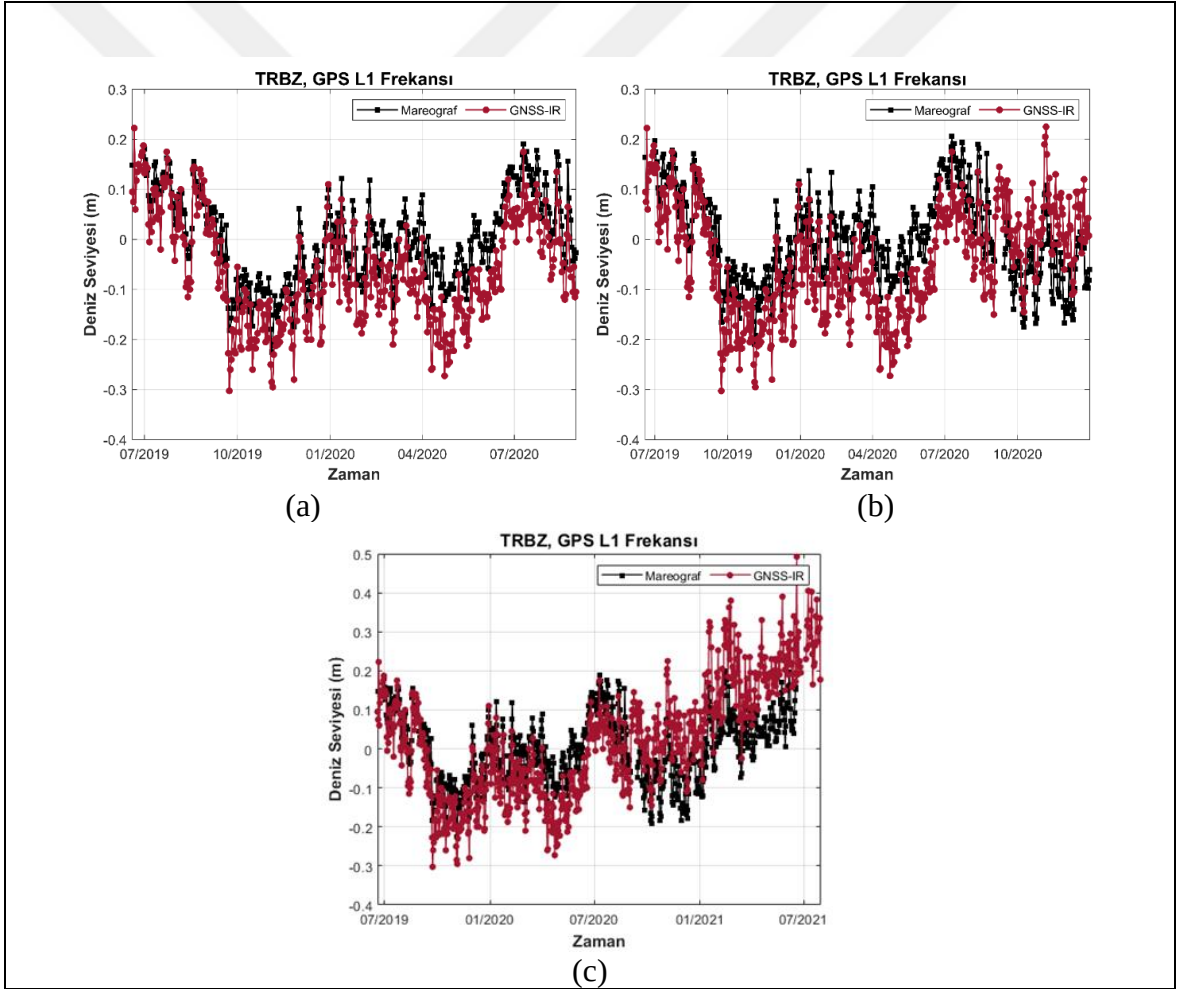
olarak elde edilir. Burada d_{GNSSIR_i} ; GNSS-IR tekniği ile hesaplanan deniz seviyesi değişimi gözlemlerini, d_{mar_i} ; mareograf istasyonu deniz seviyesi kayıtlarını belirtmektedir.

2.5.1. Pik-Gürültü Oranı Testi Uygulanması

LSP sonucu hesaplanan tepe (pik) değerlerinin anlamlı olup olmadığına karar vermek için Pik-Gürültü Oranı testi uygulanmıştır. Pik-Gürültü Oranı testinde bir eşik değeri belirlenmekte olup Eşitlik (43)'te gösterildiği üzere en yüksek reflektör yüksekliği genliğinin gürültüye oranı, bu eşik değerinden küçük olan yansımalar anlamsız kabul edilerek analizde kullanılmamıştır. Eşik değerinin seçiminde anlamlı yansımaları kaybetmemeye dikkat edilmiştir. Bu nedenle eşik değeri her bir istasyon için kontrollü bir şekilde seçilmiş olup tüm istasyonlarda 2.7 eşik değerinin uygun olduğuna karar verilmiştir.

Aşağıda sırasıyla mareograf ortak yerleşkeli TUDES ağ istasyonları, IGS ağı istasyonu ve TUSAGA-Aktif istasyonu için elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

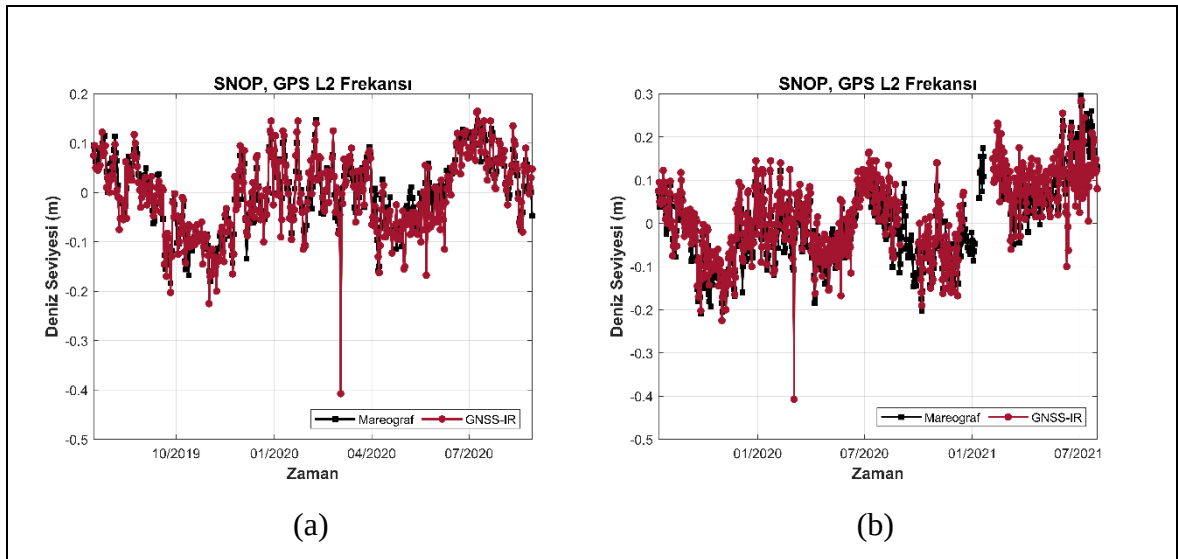
- Mareograf Ortak Yerleşkeli TUDES Ağ İstasyonları: Bu kısımda mareograf ortak yerleşkeli TRBZ ve SNOP sabit GNSS istasyonları sonuçları gösterilmiştir. Mareografla ortak yerleşkeli GNSS istasyonları verilerinin bir ortak araştırma projesi kapsamında temin edildiği Bölüm 2.2’de belirtilmiştir. Temin edilen bu veriler Eylül 2020 ve Eylül 2021 olmak üzere iki farklı periyotta alınmıştır. Bu nedenle aşağıda hem iki periyot için ayrı ayrı hesaplanan deniz seviyesi değişimi grafikleri hem de tüm periyotları içeren grafik sunulmuştur.



Şekil 59. Pik-Gürültü Oranı testine göre TRBZ sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen ve Trabzon mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi grafiği

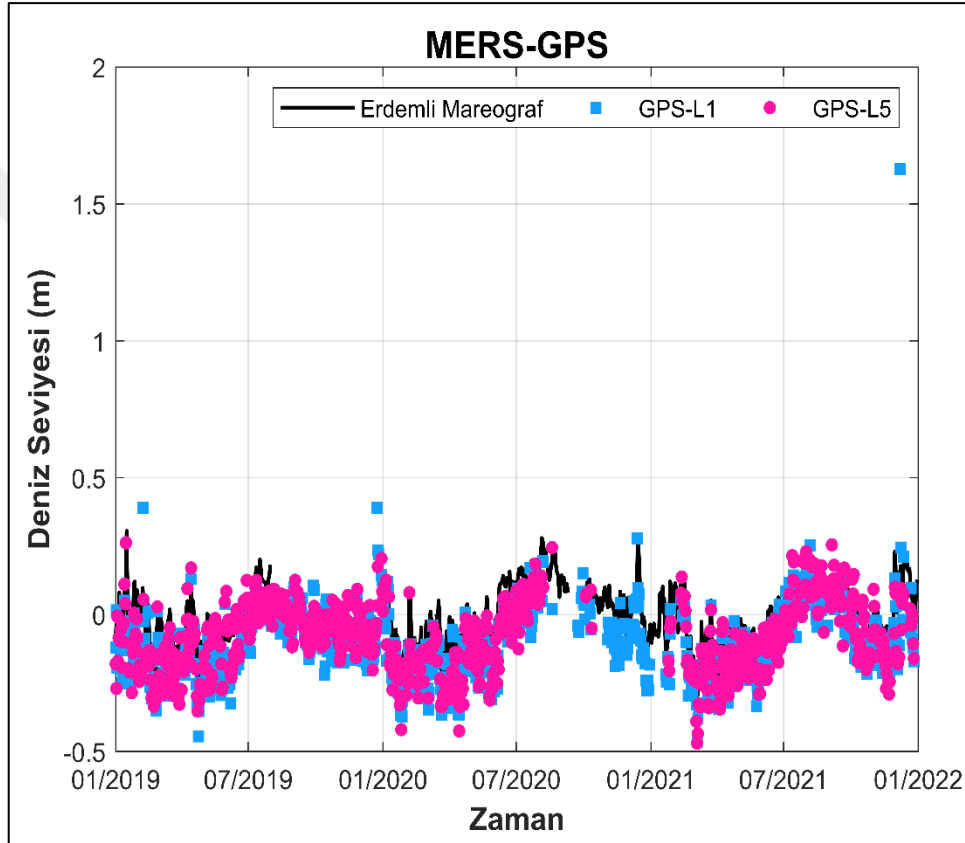
Şekil 59 (c)'de TRBZ sabit GNSS istasyonuna ait yaklaşık üç yıllık (Temmuz 2019-Ağustos 2021) deniz seviyesi değişimi zaman serisi grafiği gösterilmiştir. GNSS-IR tekniğine dayalı olarak hesaplanan deniz seviyesi değişimi GNSS istasyonu ile ortak yerleşkeli Trabzon mareograf kayıtları ile karşılaştırılmıştır. Her iki deniz seviyesi değişimi zaman serisi grafikleri arasındaki Pearson korelasyonu 0.71 olarak bulunmuştur. Aynı istasyonun Temmuz 2019-Eylül 2020 periyodundaki (Şekil 59 (a)) ve Temmuz 2019-Aralık 2020 periyodundaki (Şekil 59 (b)) Pearson korelasyonları sırasıyla 0.95 ve 0.70 şeklinde hesaplanmıştır. Hesaplanan korelasyon büyüklüklerine bakıldığında en yüksek değer 0.95 ile Temmuz 2019-Eylül 2020 periyodunda elde edildiği ve ilerleyen dönemlere ait veriler eklendiğinde korelasyonun düştüğü görülmüştür. İlgili istasyonda Eylül 2020 tarihinde bir yer değiştirme gerçekleşmiş olup ilerleyen dönemlerde de platformda kayma tespit edilmiştir. Çevresel kaynaklı bu etki sebebiyle zamanla korelasyonda düşme olduğu değerlendirilmiştir. Bu nedenle tezin ilerleyen bölümlerinde verilen analizlerde TRBZ istasyonu için sadece Temmuz 2019-Eylül 2020 periyodundaki veriler kullanılmıştır.

SNOP sabit GNSS istasyonunda hem Temmuz 2019-Eylül 2020 hem de Temmuz 2019-Ağustos 2021 periyotlarında deniz seviyesi değişimi hesaplanmış olup istasyonla ortak yerleşkeli Sinop mareograf kayıtları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 60 (a), Şekil 60 (b)). Her iki periyotta deniz seviyesi değişimi zaman serileri arasındaki Pearson korelasyon katsayısı 0.88 olarak bulunmuştur.



Şekil 60. Pik-Gürültü Oranı testine göre SNOP sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen ve Sinop mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi grafiği

- IGS Ağı İstasyonu: Bu kısımda IGS ağında bulunan MERS sabit GNSS istasyonu sonuçları gösterilmiştir. Şekil 61’de MERS sabit GNSS istasyonu GPS L1 ve GPS L5 sinyallerine ait SNR verilerinin kullanılması sonucu elde edilen deniz seviyesi değişimi sunulmuştur. GNSS-IR tekniğine dayalı olarak hesaplanan deniz seviyesi değişimi istasyon yakınında bulunan ve yaklaşık 524 m uzaklıktaki Erdemli mareograf kayıtları ile karşılaştırılmıştır.

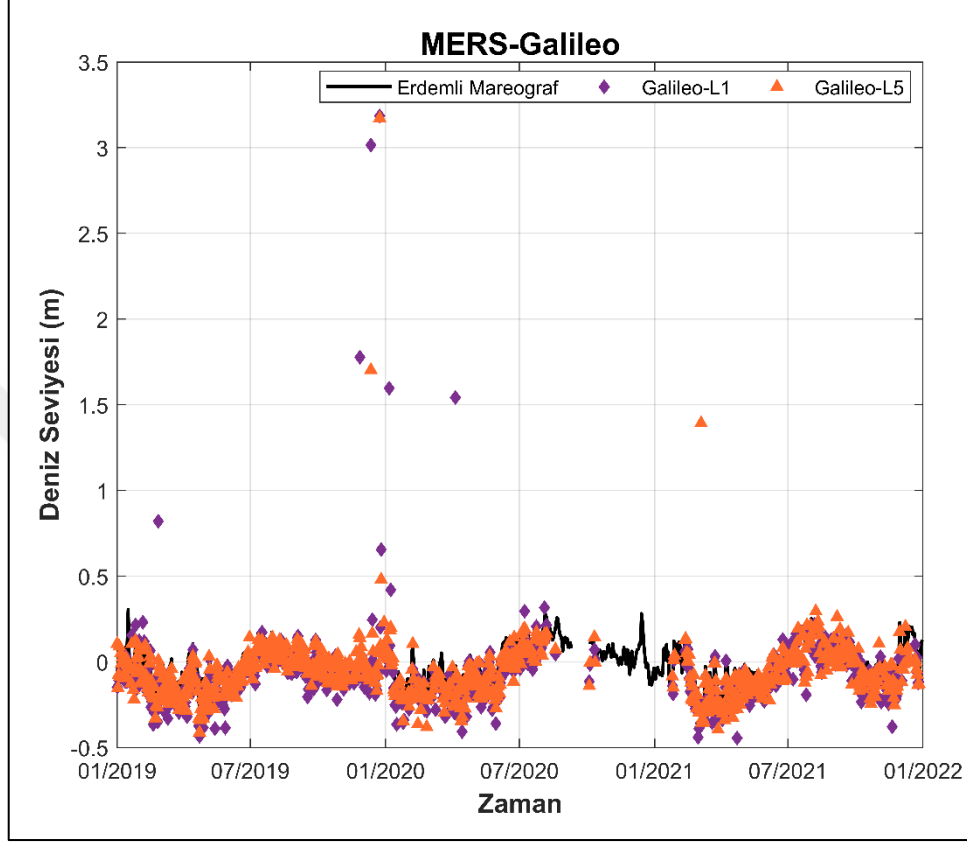


Şekil 61. Pik-Gürültü Oranı testine göre MERS sabit GNSS istasyonu GPS gözlemlerinden GNSS-IR ile tahmin edilen ve Erdemli mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi grafiği

GPS L1 sinyali kullanılarak belirlenen deniz seviyesi değişimi ve mareograf arasındaki Pearson korelasyonu 0.82 iken GPS L5 sinyali kullanılarak belirlenen deniz seviyesi değişimi ile mareograf arasındaki Pearson korelasyonu ise 0.87 olarak bulunmuştur.

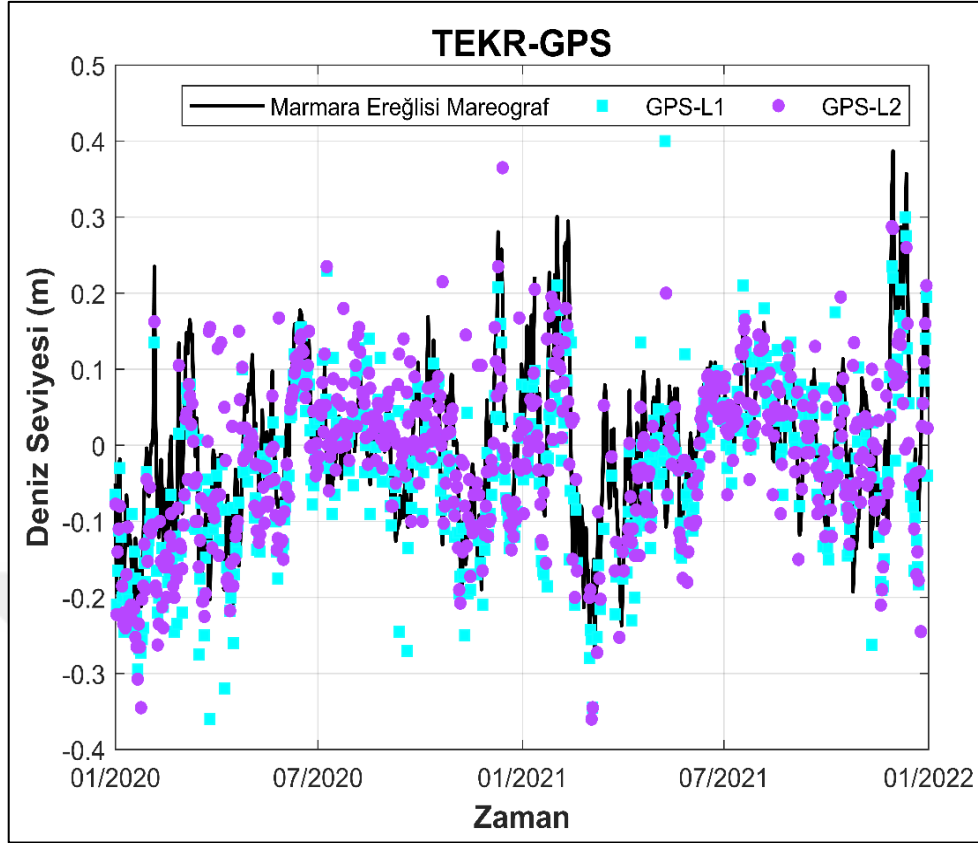
MERS sabit GNSS istasyonunda ayrıca Galileo L1 ve L5 sinyalleri SNR gözlemlerinden deniz seviyesi değişimi belirlenmiştir. Aynı şekilde istasyon yakınında bulunan Erdemli mareograf istasyonu ile karşılaştırılarak sırasıyla 0.71 ve 0.77 şeklinde

Pearson korelasyonu hesaplanmıştır. Şekil 62’de deniz seviyesi değişimi grafiği sunulmuştur.



Şekil 62. Pik-Gürültü Oranı testine göre MERS sabit GNSS istasyonu Galileo gözlemlerinden GNSS-IR ile tahmin edilen ve Erdemli mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi grafiği

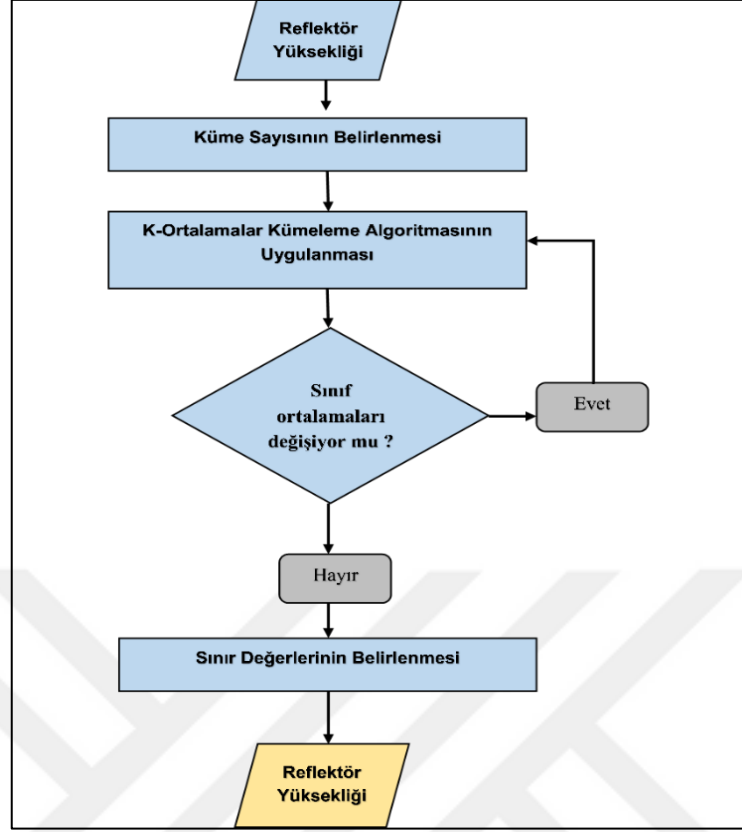
- TUSAGA-Aktif Ağı İstasyonu: Bu kısımda TUSAGA-Aktif ağındaki bulunan TEKR sabit GNSS istasyonu sonucu gösterilmiştir. TEKR sabit GNSS istasyonunda 1 Ocak 2020-31 Aralık 2021 zaman aralığında kaydedilen GPS L1 SNR ve GPS L2 SNR verilerinden GNSS-IR tekniğine dayalı olarak elde edilen deniz seviyesi değişimi belirlenmiştir. Ardından elde edilen sonuçlar istasyonun yaklaşık 40 km yakınında bulunan Marmara Ereğlisi mareograf kayıtları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 63). Her iki deniz seviyesi değişimi arasındaki Pearson korelasyonu L1 frekansında 0.79, L2 frekansında ise 0.68 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 63. Pik-Gürültü Oranı testine göre TEKR sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen ve Marmara Ereğlisi mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi grafiği

2.5.2. K-Ortalamlar Kümeleme Algoritmasının Uygulanması

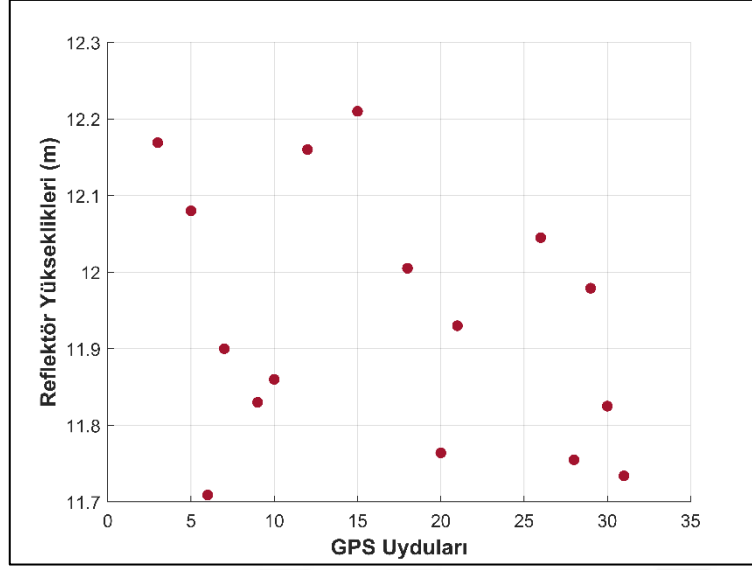
Bu bölümde GNSS-IR tekniği ile hesaplanan reflektör yüksekliklerinin K-Ortalamlar Kümeleme algoritması ile filtrelenmesine yönelik yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Bölüm 1.12.1’de gösterildiği üzere Pik-Gürültü Oranı testinde en yüksek reflektör yüksekliği genliğinin gürültüye oranı belirlenen eşik değerinden büyük olan yansılardan reflektör yüksekliği hesaplanmıştır. Fakat bu yöntem, bazen kullanışlı olabilecek reflektör yüksekliklerinin analizden çıkarılmasına neden olabilmektedir. Bazen de gerçeği yansıtmayan yani fiziksel olmayan reflektör yüksekliklerini ve/veya gürültülü reflektör yüksekliklerini de analize dahil edebilmektedir. K-Ortalamlar Kümeleme algoritması ile LSP sonuçları üzerinde reflektör yüksekliği ve sonuçların doğruluğunun geliştirilmesi amaçlanmıştır. Aslında bu algoritma ile her bir uydu izi için hesaplanan periyodograma ait aynı değer etrafındaki pik değerlerini kümeleyerek reflektör yükseklikleri filtrelenmiştir. Şekil 64’te yöntemle ilişkin iş akış şeması verilmiştir.



Şekil 64. K-Ortalamlar Kümeleme algoritması iş akış şeması

Aşağıda algoritmanın uygulanmasına yönelik işlem adımları sıralanmıştır.

1. Öncelikle, LSP analizi ile hesaplanan reflektör yüksekliklerinin tümü herhangi bir eşik değeri belirlemeden K-Ortalamlar Kümeleme algoritması için girdi verisi olarak kullanılmıştır. Örneğin, Şekil 65'te MERS istasyonunda 2020 yılı, DoY 114 için GPS uydu izlerine göre belirlenen reflektör yüksekliklerinin dağılımları gösterilmiştir.



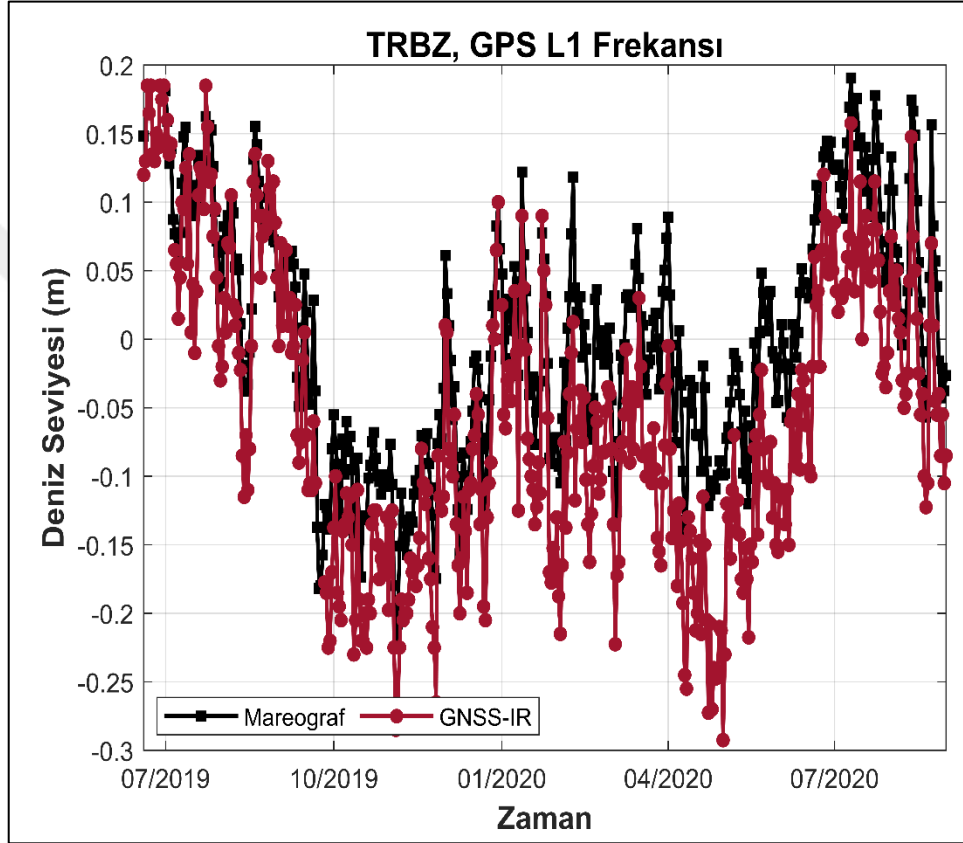
Şekil 65. Reflektör yükseklikleri dağılımı

2. Her bir istasyon için reflektör yüksekliklerinin dağılımına göre küme sayısına karar verilmiştir.
3. LSP analizi sonucu hesaplanan reflektör yükseklikleri ile küme sayısı kullanılarak küme sayısı kadar rasgele küme merkezleri belirlenmiştir.
4. Reflektör yüksekliklerinin küme merkezlerine uzaklığı hesaplanarak her bir reflektör yüksekliği en yakın olduğu kümeye atanmıştır.
5. Her kümenin ortalaması alınarak küme ortalaması değişmeyinceye kadar Bölüm 1.12.2’de anlatılan algoritma devam ettirilmiştir.
6. Gerçeği yansıtmayan reflektör yüksekliklerini analizden çıkarmak için istasyonun ortalama deniz yüzeyinden yüksekliğine göre reflektör yüksekliği aralıkları belirlenmiştir. Reflektör yükseklikleri aralıkları olarak Tablo 12’de gösterilen değerler alınmıştır.
7. Belirlenen aralıklarda bulunan reflektör yüksekliklerini içeren küme veya kümeler ilgili güne ait yeni reflektör yükseklikleri olarak atanmıştır.
8. Son olarak reflektör yüksekliklerinden deniz seviyesi değişimi belirlenmiştir.

Aşağıda sırasıyla mareograf ortak yerleşkeli TUDES ağ istasyonları, IGS ağı istasyonu ve TUSAGA-Aktif ağ istasyonları için elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

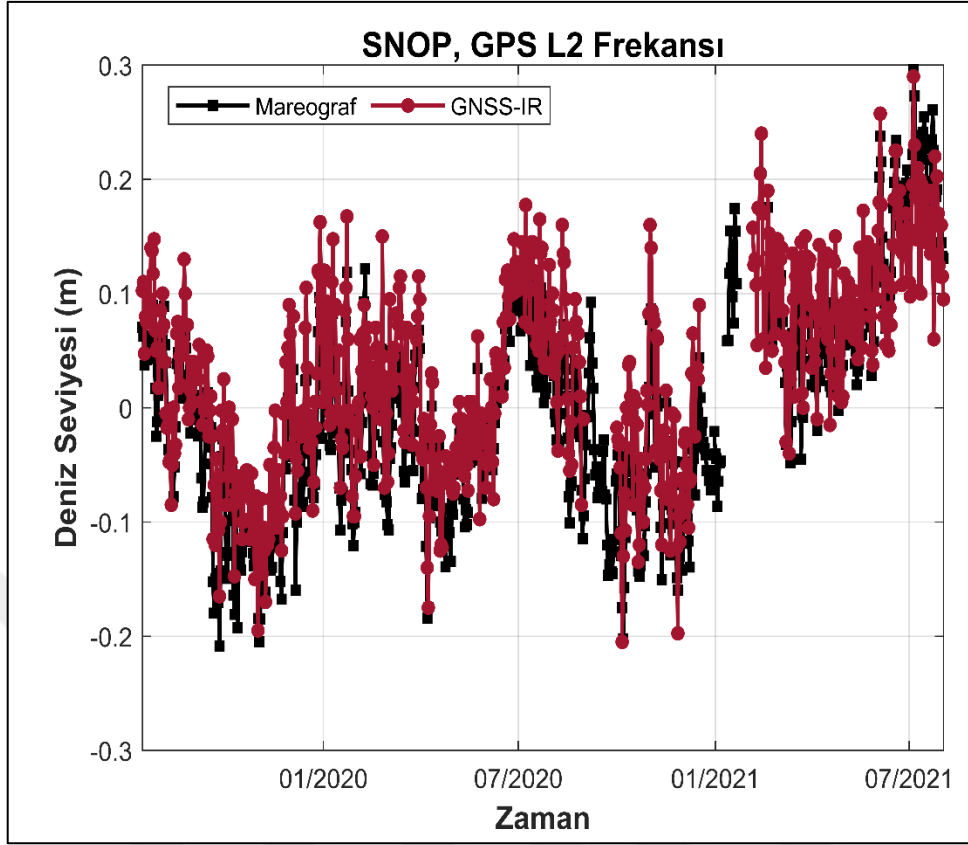
- Mareograf Ortak Yerleşkeli TUDES Ağ İstasyonları: TRBZ ve SNOP mareograf ortak yerleşkeli sabit GNSS istasyonlarında K-Ortalamalar Kümeleme algoritması ile deniz seviyesi değişimi belirlenmiştir. Öncelikle, TRBZ istasyonunda reflektör

yükseklikleri dağılımına bakıldığında küme sayısının 3 olması gerektiğine karar verilmiştir. Ardından yukarıdaki işlem adımlarına göre GNSS-IR tekniği ile deniz seviyesi değişimi belirlenmiştir. Şekil 66'da TRBZ istasyonu GPS L1 SNR verilerinden K-Ortalamalar Kümeleme algoritması ile belirlenen deniz seviyesi değişimi grafiği gösterilmiştir.



Şekil 66. K-Ortalamalar kümeleme algoritmasına göre TRBZ sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen ve Trabzon mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi

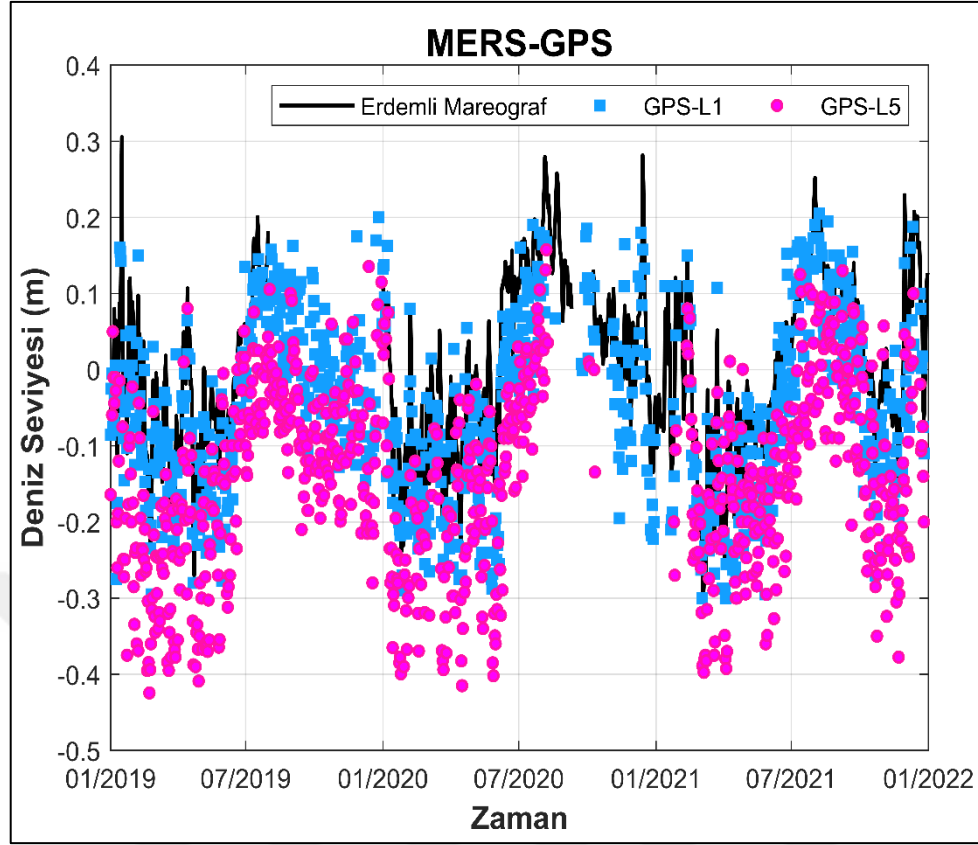
GNSS-IR deniz seviyesi ile Trabzon mareograf istasyonu arasındaki Pearson korelasyonu 0.93 olarak hesaplanmıştır. Ardından SNOP sabit GNSS istasyonuna geçilmiştir. Reflektör yükseklikleri dağılımına bakıldığında SNOP istasyonunda da küme sayısının 3 olması gerektiğine karar verilmiştir. Şekil 67'de ise SNOP sabit GNSS istasyonu GPS L2 SNR verilerinden K-Ortalamalar Kümeleme algoritması ile belirlenen deniz seviyesi değişimi gösterilmiştir.



Şekil 67. K-Ortalamlar kümeleme algoritmasına göre SNOP sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen ve Sinop mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi

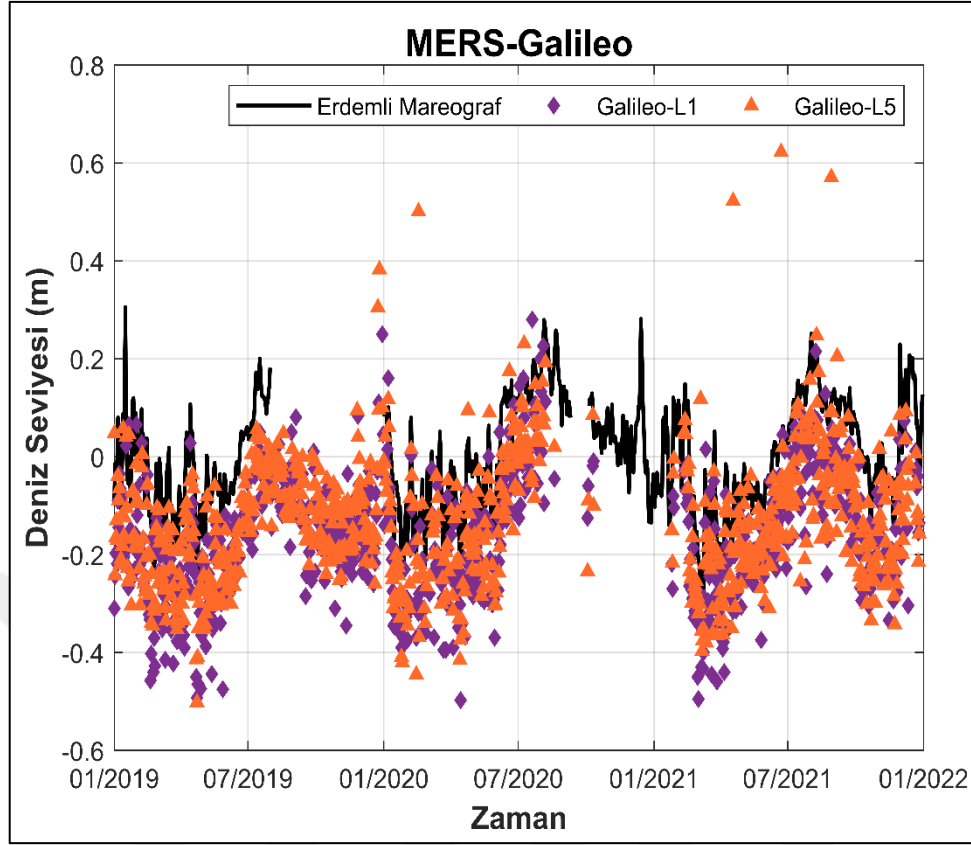
Burada, GNSS-IR ve Sinop mareograf istasyonu deniz seviyesi değişimleri arasında 0.92 Pearson korelasyonu hesaplanmıştır.

- IGS Ağı İstasyonu: MERS sabit GNSS istasyonunda öncelikle GPS L1 SNR ve GPS L5 SNR verilerinden elde edilen reflektör yüksekliklerine K-Ortalamlar Kümeleme algoritması uygulanmıştır. Her iki veri seti için küme sayısı 2 olarak belirlenmiş olup yukarıda anlatıldığı şekilde deniz seviyesi değişimi elde edilmiştir. Şekil 68’de GPS gözlemlerinde K-Ortalamlar Kümeleme algoritması sonucu elde edilen deniz seviyesi değişimi ve Erdemli mareograf deniz seviyesi değişimi grafiği gösterilmiştir.



Şekil 68. K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasına göre MERS sabit GNSS istasyonu GPS gözlemlerinden GNSS-IR ile tahmin edilen ve Erdemli mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi

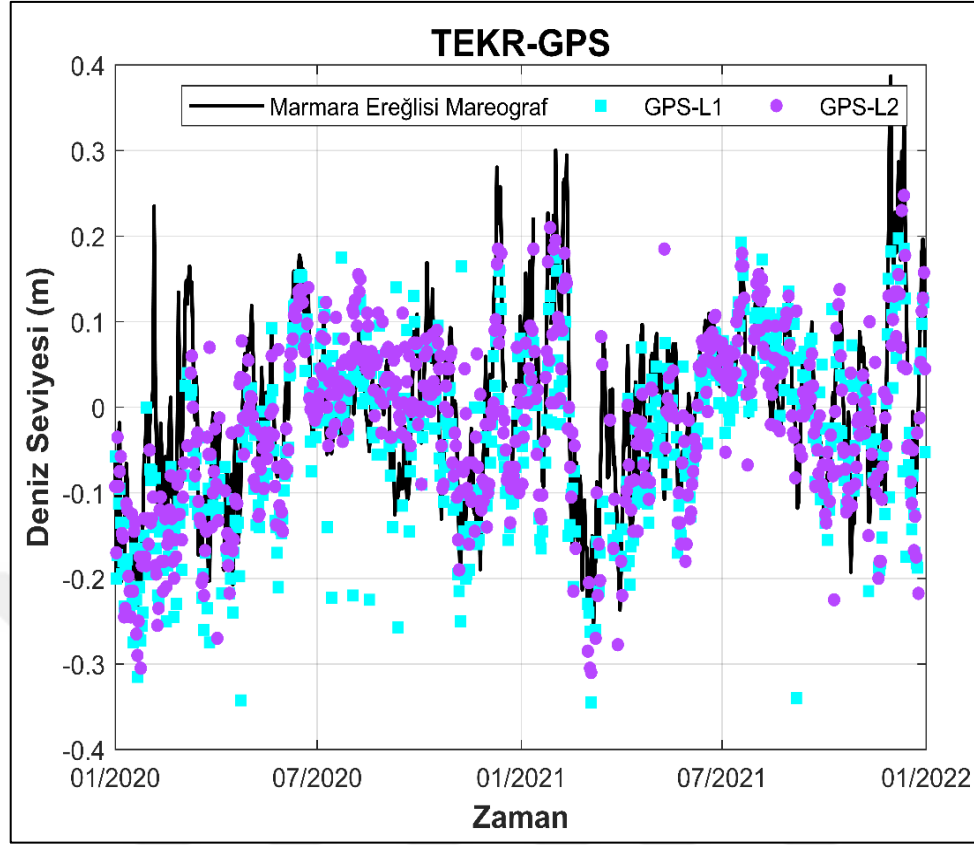
Algoritma sonucu elde edilen deniz seviyesi değişiminin mareograf kayıtları ile karşılaştırılması sonucunda GPS L1 ve GPS L5 sinyalleri için sırasıyla 0.90 ve 0.79 Pearson korelasyonu hesaplanmıştır. Ardından aynı istasyonun Galileo L1 SNR ve Galileo L5 SNR verilerinden hesaplanan reflektör yüksekliklerine K-Ortalamlar Kümeleme algoritması uygulanmıştır. Hem Galileo L1 hem de Galileo L5 verilerinde küme sayısı 2 olarak alınmıştır. Şekil 69’da Galileo gözlemlerinde K-Ortalamlar Kümeleme algoritması sonucu elde edilen deniz seviyesi değişimi ve Erdemli mareograf deniz seviyesi değişimi grafiği gösterilmiştir.



Şekil 69. K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasına göre MERS sabit GNSS istasyonu Galileo gözlemlerinden GNSS-IR ile tahmin edilen ve Erdemli mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi

Buradan elde edilen deniz seviyesi değişiminin mareograf kayıtları ile karşılaştırılması ile Galileo L1 ve L5 sinyalleri için sırasıyla 0.85 ve 0.77 Pearson korelasyonu hesaplanmıştır.

- TUSAGA-Aktif Ağı İstasyonu: Son olarak TUSAGA-Aktif ağındaki bulunan TEKR sabit GNSS istasyonunda GPS L1 SNR ve GPS L2 SNR verilerinden belirlenen reflektör yüksekliklerine K-Ortalamlar Kümeleme algoritması uygulanmış olup küme sayısı 2 olarak belirlenmiştir. Bölümün başında ayrıntıları verildiği şekilde deniz seviyesi değişimi belirlenmiştir. Şekil 70’te TEKR sabit GNSS istasyonu deniz seviyesi değişimi ve Marmara Ereğlisi mareograf kayıtları deniz seviyesi değişimi grafiği verilmiştir.

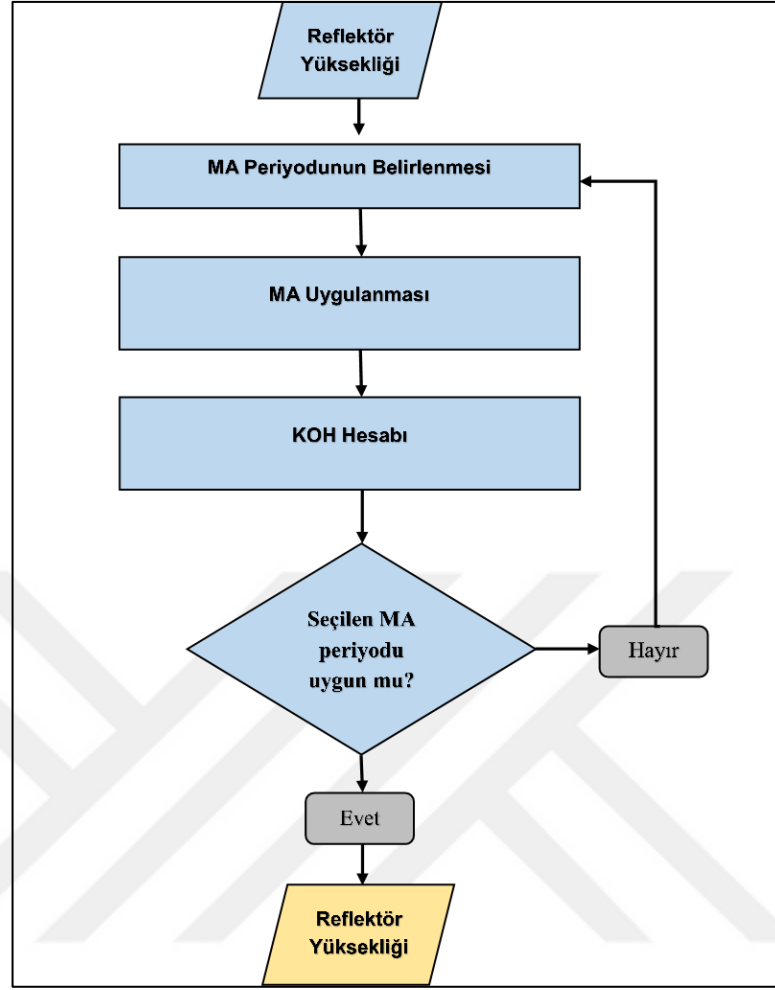


Şekil 70. K-Ortalamlar kümeleme algoritmasına göre TEKR sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen deniz seviyesi değişimi

K-Ortalamlar Kümeleme algoritması kullanılarak GNSS-IR tekniği ile elde edilen deniz seviyesi değişimi ve Marmara Ereğlisi mareograf deniz seviyesi değişimi arasında Pearson korelasyonu hem GPS L1 hem de GPS L2 için 0.77 olarak hesaplanmıştır.

2.5.3. LSP-MA Yönteminin Uygulanması

Bu kısımda tez çalışması kapsamında geliştirilen LSP-MA yönteminin analiz detayları açıklanacaktır. LSP analizi ile hesaplanan reflektör yükseklikleri kaba hatalı ölçüler içerebilmektedir. Fiziksel olmayan reflektör yükseklikleri ve gürültülü sonuçlar GNSS-IR deniz seviyesi değişimi zaman serisinde kaba hatalı ölçü olarak görülebilmektedir. Bunun sonucunda deniz seviyesi kestirim performansı düşmektedir. Elde edilen reflektör yüksekliklerinin doğruluk analizi ve iyileştirilmesi için ek analizlere ihtiyaç duyulmaktadır. LSP-MA yöntemine ait iş akışı Şekil 71’de gösterilmiştir.



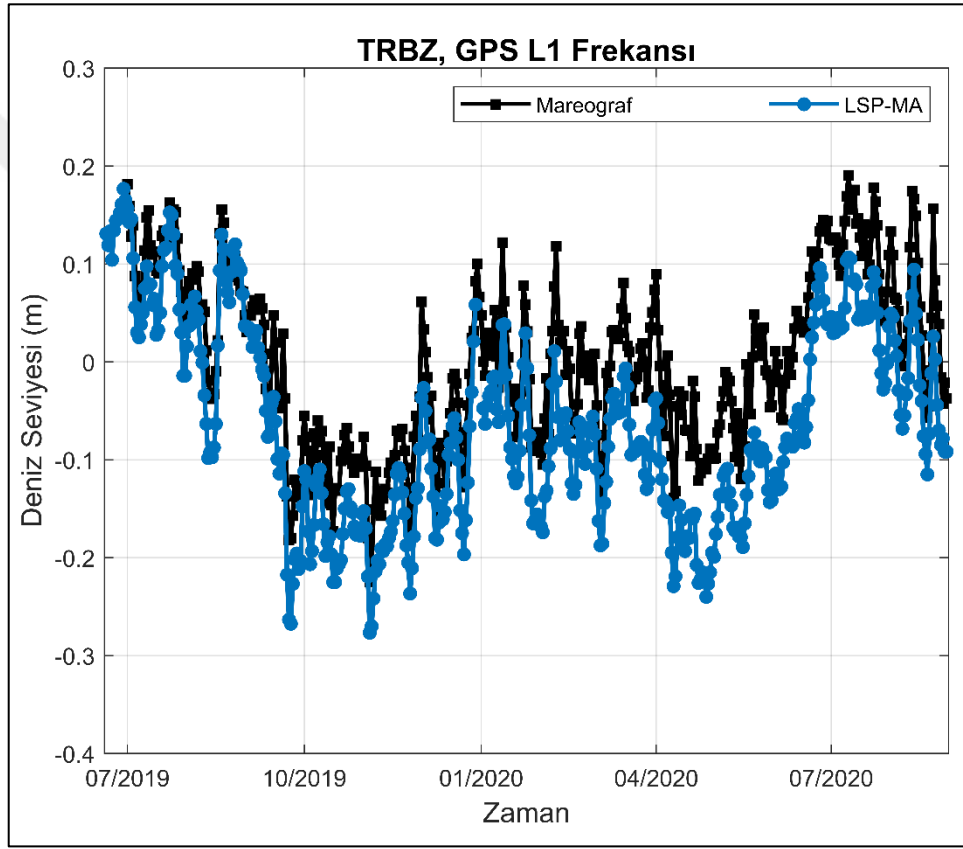
Şekil 71. LSP-MA iş akış şeması

LSP-MA yönteminin uygulanma algoritması aşağıda verilmiştir.

1. Öncelikle, LSP analizi ile reflektör yükseklikleri hesaplanmıştır.
2. Hesaplanan reflektör yükseklikleri MA için girdi verisi olarak kullanılmıştır.
3. MA periyot sayısı seçilmiştir. Bu aşamada seçilen periyotla zaman serisindeki önemli salınımların kaybedilmemesine dikkat edilmiştir. Bu nedenle küçük katsayılar ile başlanılmış olup 3 ile 15 arasında değişen katsayılar kullanılarak MA filtrelemesi yapılmıştır. Her bir yeni katsayı için GNSS-IR ve mareograf deniz seviyesi değişimi gözlemleri arasında KOH değeri hesaplanarak en uygun periyoda karar verilmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak tüm istasyonlarda 3-periyot MA uygun bulunmuştur.
4. Ardından yeniden hesaplanan reflektör yüksekliklerinden deniz seviyesi değişimi belirlenmiştir.

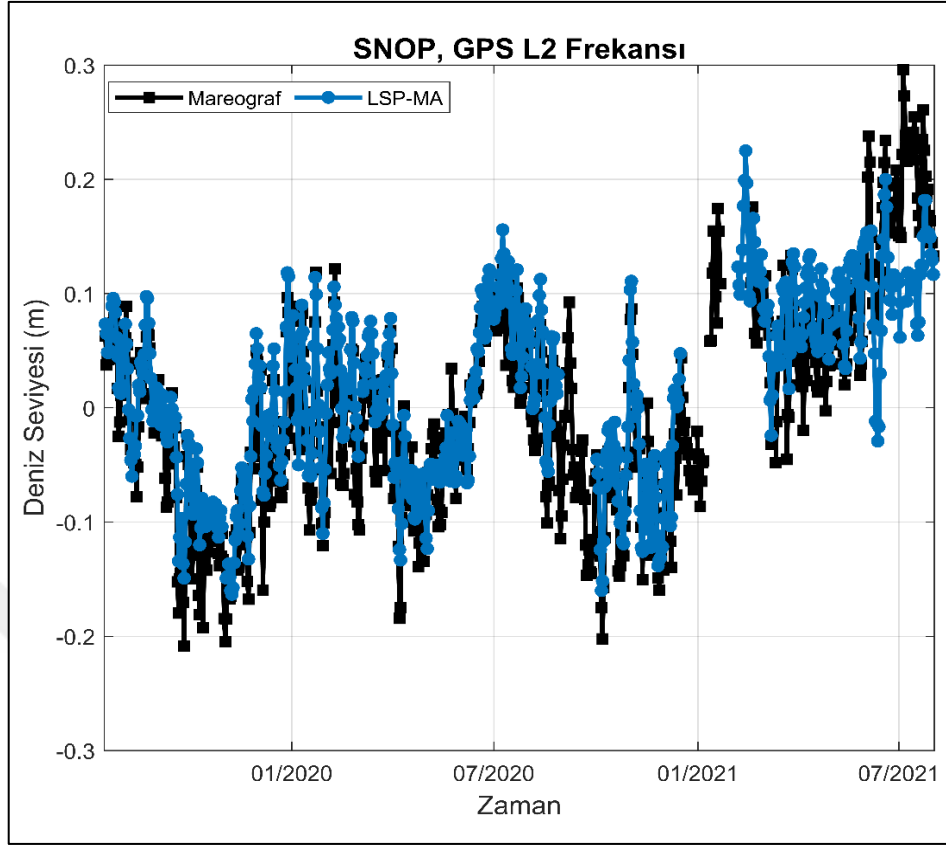
Aşağıda sırasıyla mareograf ortak yerleşkeli TUDES ağ istasyonları, IGS ağı istasyonu ve TUSAGA-Aktif istasyonu için elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

- Mareograf Ortak Yerleşkeli TUDES Ağ İstasyonları: TRBZ istasyonunda Temmuz 2019-Ağustos 2020 periyodunda LSP-MA yöntemi uygulanarak GNSS-IR tekniğine dayalı belirlenen deniz seviyesi değişimi grafiği Şekil 72’de gösterilmiştir. Burada, GNSS-IR ve mareograf deniz seviyesi değişimi arasında Pearson korelasyonu 0.95 olarak bulunmuştur.



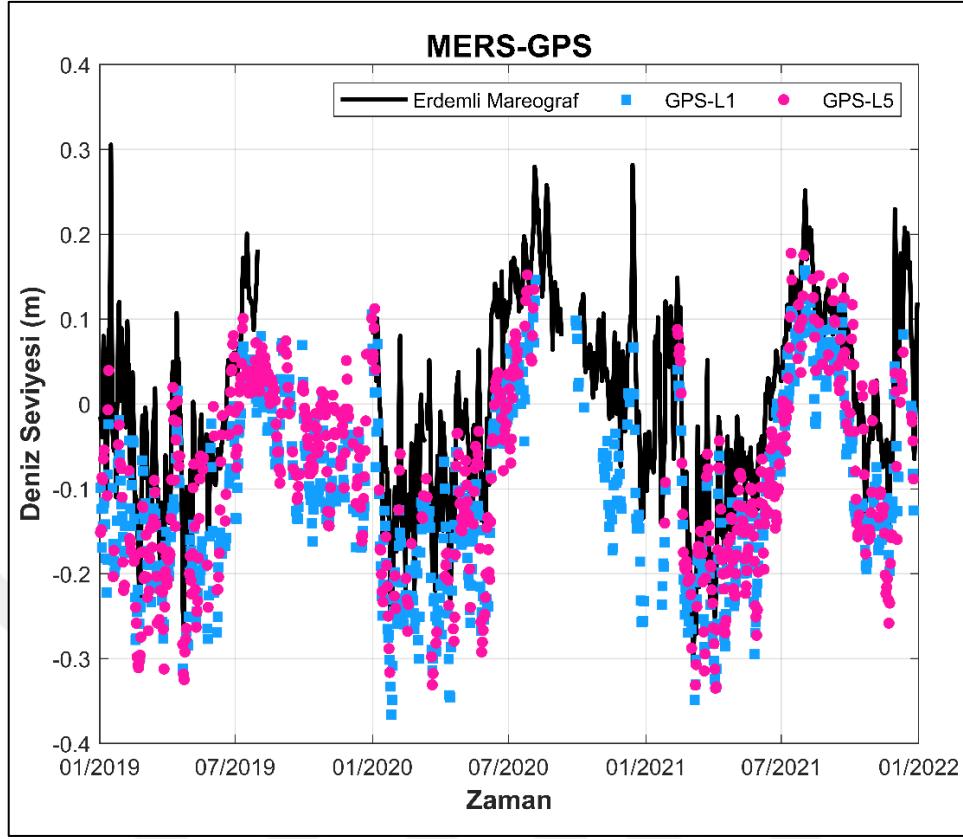
Şekil 72. LSP-MA yöntemine göre TRBZ sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen ve Trabzon mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi

Aynı yöntem SNOP istasyonuna uygulandığında deniz seviyesi değişimi zaman serileri arasında Pearson korelasyonu 0.91 olarak hesaplanmıştır. GNSS-IR tekniğine dayalı hesaplanan deniz seviyesi değişimi ve mareograf deniz seviyesi değişimi zaman serileri Şekil 73’de sunulmuştur.



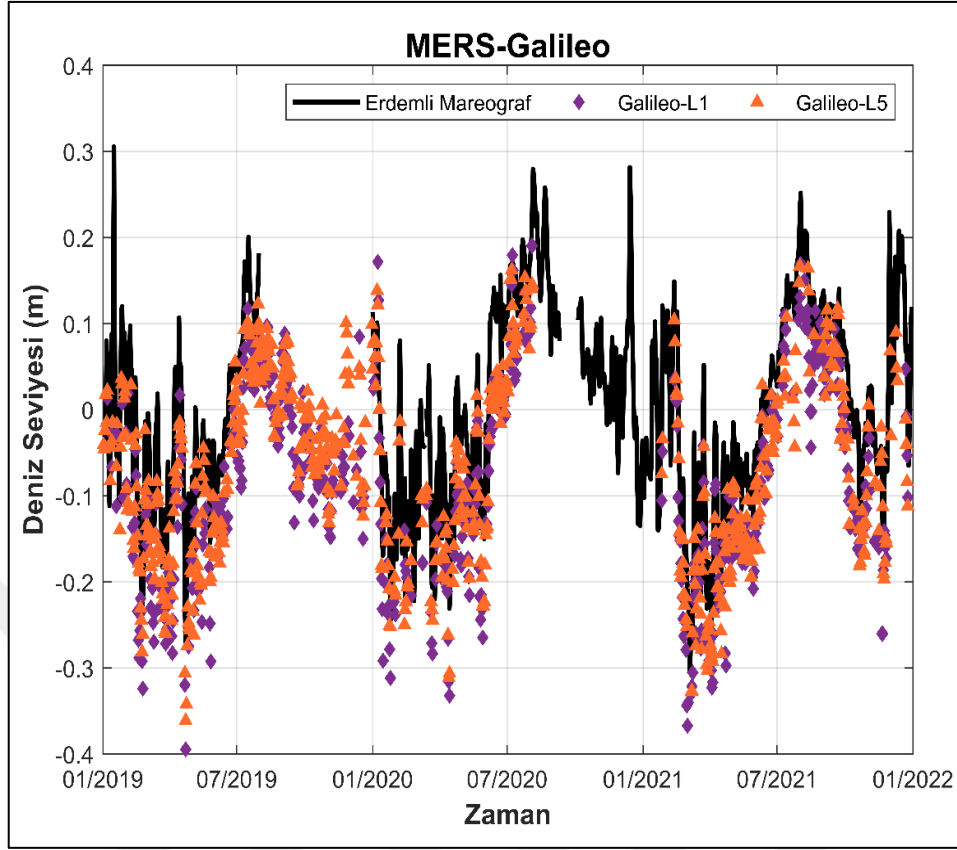
Şekil 73. LSP-MA yöntemine göre SNOP sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen ve Sinop mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi

- IGS Ağı İstasyonu: MERS sabit GNSS istasyonu GPS gözlemlerinde uygulanan LSP-MA yöntemi sonucu elde edilen deniz seviyesi değişiminin mareograf kayıtları ile karşılaştırılması sonucunda GPS L1 ve GPS L5 sinyalleri için sırasıyla 0.92 ve 0.89 Pearson korelasyonu hesaplanmıştır. Şekil 74'te GPS gözlemlerinde LSP-MA sonucu elde edilen deniz seviyesi değişimi ve Erdemli mareograf deniz seviyesi değişimi grafiği gösterilmiştir.



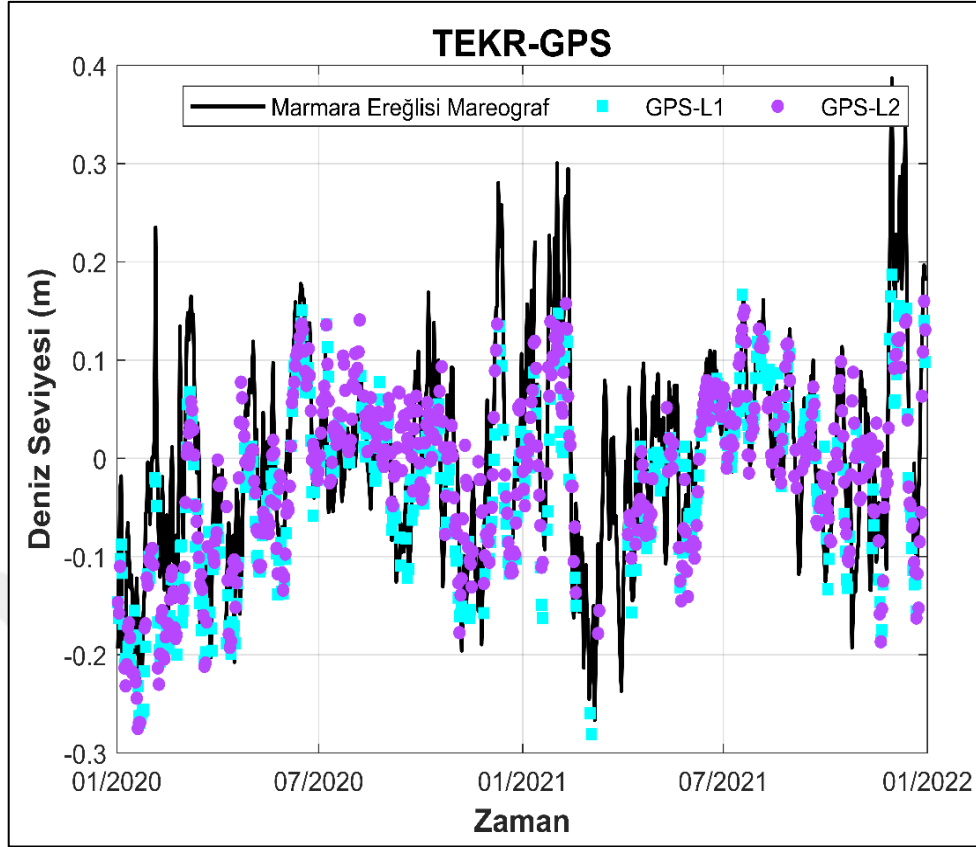
Şekil 74. LSP-MA yöntemine göre MERS sabit GNSS istasyonu GPS gözlemlerinden GNSS-IR ile tahmin edilen ve Erdemli mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi

Aynı istasyonun Galileo gözlemlerine gelindiğinde ise L1 ve L5 sinyallerinden hesaplanan deniz seviyesi değişimi ile mareograf arasındaki Pearson korelasyonu her iki sinyal için 0.94 olarak hesaplanmıştır. Şekil 75'te Galileo gözlemlerinde LSP-MA sonucu elde edilen deniz seviyesi değişimi ve Erdemli mareograf deniz seviyesi değişimi grafiği gösterilmiştir.



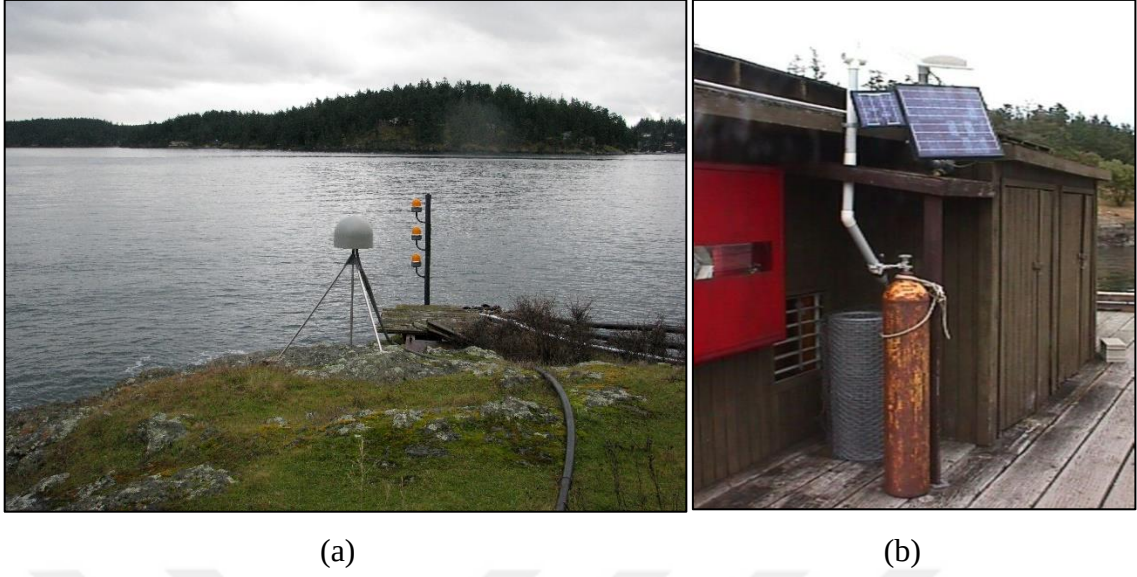
Şekil 75. LSP-MA yöntemine göre MERS sabit GNSS istasyonu Galileo gözlemlerinden GNSS-IR ile tahmin edilen ve Erdemli mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi

- TUSAGA-Aktif Ağı İstasyonu: TUSAGA-Aktif ağında bulunan TEKR istasyonunda ise GPS L1 SNR ve GPS L2 SNR verilerinden belirlenen deniz seviyesi değişimi ve Marmara Ereğlisi mareograf kayıtları arasındaki Pearson korelasyonu sırasıyla 0.84 ve 0.71 olarak bulunmuştur. Şekil 76’da GNSS-IR ve mareograf deniz seviyesi değişimi zaman serisi gösterilmiştir.



Şekil 76. LSP-MA yöntemine göre TEKR sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen ve Marmara Ereğlisi mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi

- ABD Friday Limanı SC02 Sabit GNSS İstasyonu GNSS-IR Analizleri: Çalışmanın bu aşamasına kadar ülkemiz kıyılarında veya kıyıya yakın sabit GNSS istasyonlarından alınan SNR verileri ile deniz seviyesi değişimi belirlenmiş olup yukarıda belirtilen üç farklı kalite değerlendirme yöntemi uygulanmıştır. Uygulanan kalite değerlendirme yöntemlerin performansını değerlendirmek için ülkemizde bulunan istasyonların yanı sıra uluslararası bir istasyon daha kullanılmasına karar verilmiştir. Bu amaçla, GNSS-IR çalışmalarında sıklıkla kullanılan ABD Friday Limanı'nda bulunan SC02 sabit GNSS istasyonu için analizler yapılmıştır (Larson vd., 2017; Löfgren vd., 2014; Purnell vd., 2020; Wang vd., 2018; Williams ve Nievinski, 2017). Şekil 77 (a)'da SC02 sabit GNSS istasyonu ve Şekil 77 (b)'de istasyon yakınında bulunan Friday Limanı mareograf istasyonuna ait görseller sunulmuştur.



Şekil 77. (a) SC02 GNSS İstasyonu (URL-23, 2022), (b) Friday Limanı mareograf istasyonu (URL-24, 2022)

SC02 istasyonu, TRM59800.80 choke-ring anten ve Trimble NETR9 alıcı donanımına sahiptir (URL-23, 2022). Veri kayıt aralığı 15 saniyedir. Antenin deniz seviyesinden olan yüksekliği yaklaşık 5.5 m'dir. Bu çalışmada, SC02 istasyonuna ait 1 yıllık (1 Ocak 2021-31 Aralık 2021) GPS L1 SNR ve GPS L2C SNR verileri UNAVCO (URL-23, 2022) veri tabanından sağlanmıştır. Diğer yandan, istasyona yaklaşık 300 m uzaklıkta bulunan ve NOAA (URL-24, 2022) veri tabanı üzerinden ulaşılan Friday Limanı (9449880) mareograf istasyonu verileri doğrulama amacıyla kullanılmıştır. Tablo 14'te SC02 istasyonuna ait bilgiler verilmiştir.

Tablo 14. SC02 GNSS istasyonu ve Friday Limanı mareograf istasyonu bilgileri

İstasyon	Enlem (derece)	Boylam (derece)	Yükseklik (m)	Veri Kayıt Aralığı
SC02	48.5462N	-123.0076W	-15.036	15 sn
Friday Limanı	48.5450N	-123.0133W	6.0563	6 dk

SNR verileri temin edildikten sonra Bölüm 2.3'te detaylandırıldığı şekilde en uygun uydu yükseklik açısı ve azimut aralığı belirlenmiştir. Buna göre, SC02 istasyonunda uydu

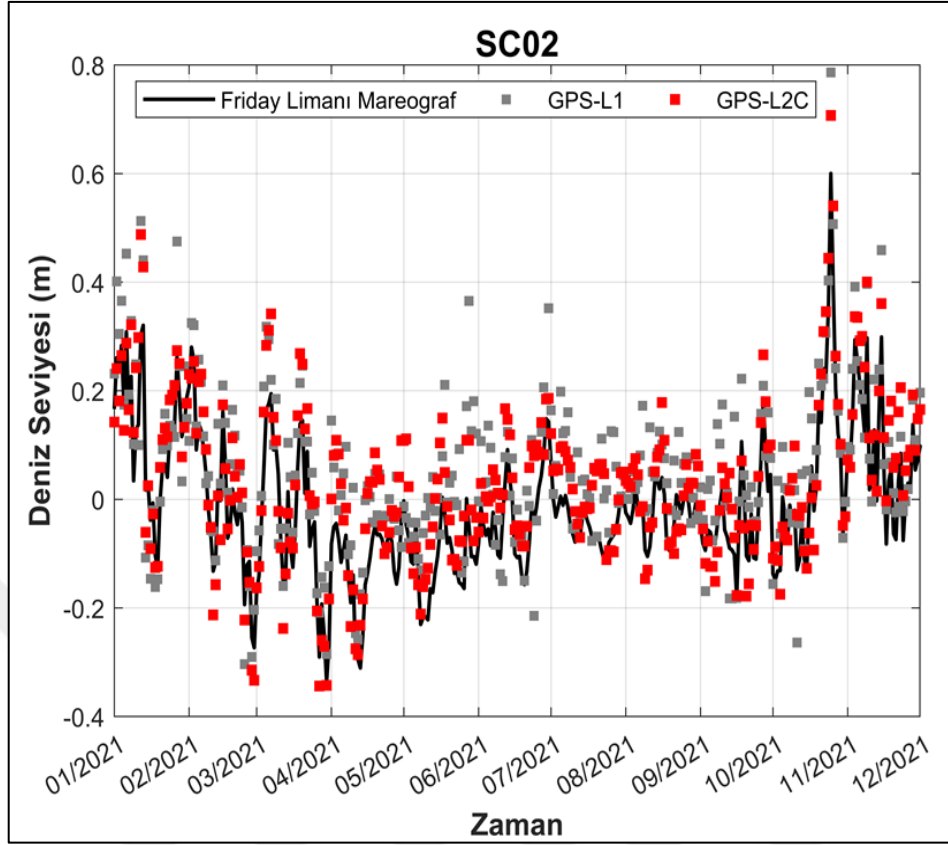
yükseklik açısı aralığı 5° - 13° , azimut aralığı ise 50° - 230° olarak seçilmiştir. Şekil 78’de belirlenen aralıklardaki uydu izleri için Fresnel bölgesi gösterilmiştir.



Şekil 78. SC02 istasyonu Fresnel bölgesi

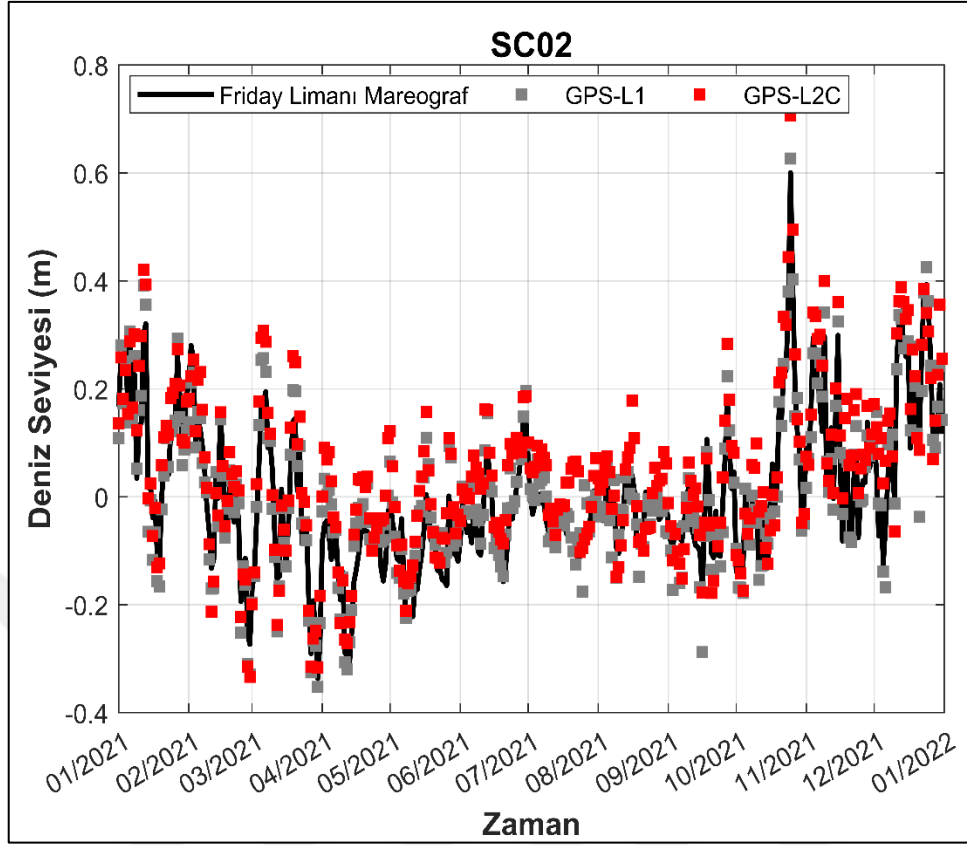
Uygun azimut ve uydu yükseklik açısı aralıkları belirlendikten sonra Bölüm 2.4’te anlatıldığı üzere GNSS-IR tekniğine dayalı olarak deniz seviyesi değişimi belirlenmiş olup elde edilen sonuç Friday Limanı mareograf verileri ile karşılaştırılmıştır. Aşağıda her bir yöntemle göre belirlenen deniz seviyesi değişimi zaman serisi grafikleri gösterilmiştir.

- **Pik-Gürültü Oranı Testi:** Öncelikle Bölüm 2.5.1’de anlatılan hususlara dikkat edilerek SC02 istasyonunda eşik değeri 3 olarak belirlenmiştir. Eşitlik (43)’te gösterildiği üzere en yüksek reflektör yüksekliği genliğinin gürültüye oranı 3 eşik değerinden büyük olan yansımalar analizde kullanılarak reflektör yükseklikleri hesaplanmıştır. Ardından reflektör yüksekliklerinden Bölüm 2.4’teki gibi deniz seviyesi değişimi belirlenmiştir. Şekil 79’da SC02 istasyonunda 1 Ocak-31 Aralık 2021 periyodunda GPS L1 SNR ve GPS L2C SNR verilerinden GNSS-IR tekniği ile belirlenen deniz seviyesi değişimi ve Friday Limanı mareograf kayıtları zaman serisi grafiği gösterilmiştir. Burada, GNSS-IR ve mareograf deniz seviyesi değişimi arasında Pearson korelasyonu GPS L1 sinyalinde 0.86, GPS L2C sinyalinde ise 0.92 olarak bulunmuştur.



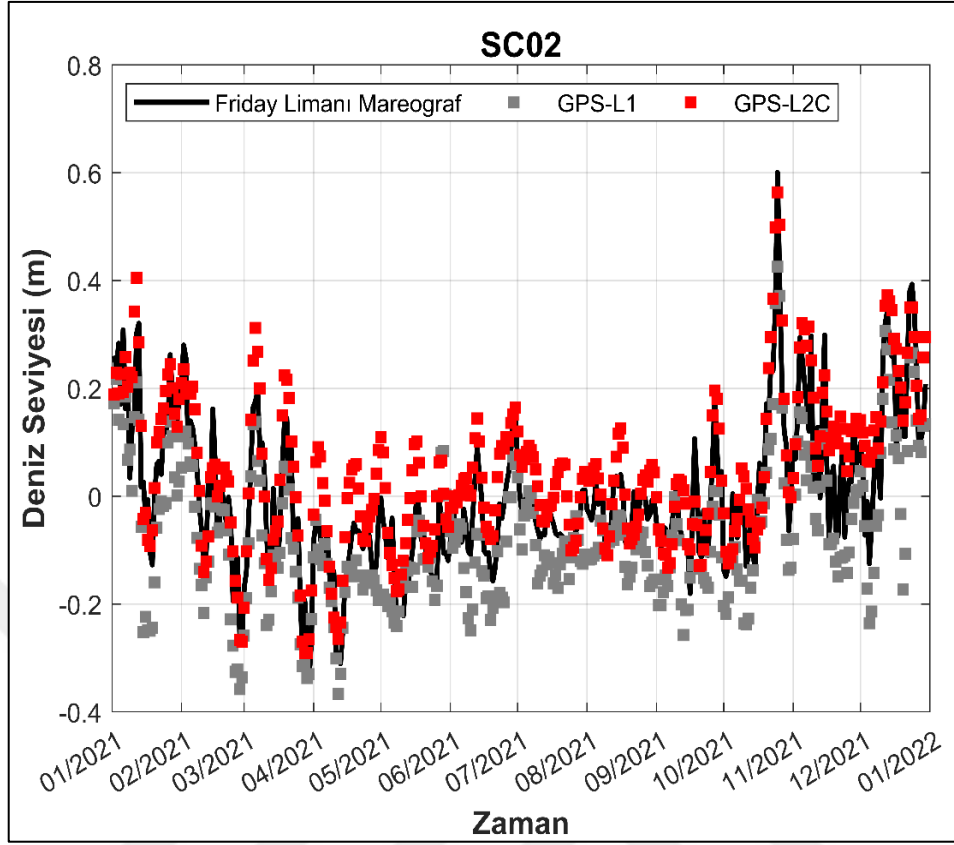
Şekil 79. Pık-Gürültü Oranı testine göre SC02 sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen deniz seviyesi değişimi

- K-Ortalamlar Kümeleme Algoritması: Bu kısım, Bölüm 2.5.2'deki işlem adımlarına göre gerçekleştirilmiştir. SC02 istasyonu için küme sayısı 3 olarak alınmış olup hem GPS L1 SNR hem de GPS L2C SNR verilerinden deniz seviyesi değişimi belirlenmiştir. Şekil 80'de K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasına göre SC02 istasyonunda 1 Ocak-31 Aralık 2021 periyodunda GPS L1 SNR ve GPS L2C SNR verilerinden GNSS-IR tekniği ile belirlenen deniz seviyesi değişimi ve Friday Limanı mareograf kayıtları zaman serisi grafiği gösterilmiştir. GNSS-IR ve mareograf deniz seviyesi değişimi arasında Pearson korelasyonu GPS L1 sinyalinde 0.95, GPS L2C sinyalinde ise 0.93 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 80. K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasına göre SC02 sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen deniz seviyesi değişimi

- LSP-MA Yöntemi: LSP-MA yönteminin uygulama detayları Bölüm 2.5.3'te verilmiştir. Burada SC02 istasyonu için MA periyodu 3 olarak belirlenmiştir. Ardından Bölüm 2.5.3'te anlatıldığı şekilde deniz seviyesi değişimi elde edilmiştir. Şekil 81'de SC02 istasyonunda 1 Ocak-31 Aralık 2021 periyodunda GPS L1 SNR ve GPS L2C SNR verilerinden GNSS-IR tekniği ile belirlenen deniz seviyesi değişimi ve Friday Limanı mareograf kayıtları zaman serisi grafiği gösterilmiştir. GNSS-IR ve mareograf deniz seviyesi değişimi arasında Pearson korelasyonu GPS L1 sinyalinde 0.88, GPS L2C sinyalinde ise 0.89 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 81. LSP-MA yöntemine göre SC02 sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen deniz seviyesi değişimi

2.6. Meteorolojik Parametrelerin GNSS Yansıma Sinyali Üzerindeki Etkisinin Belirlenmesi

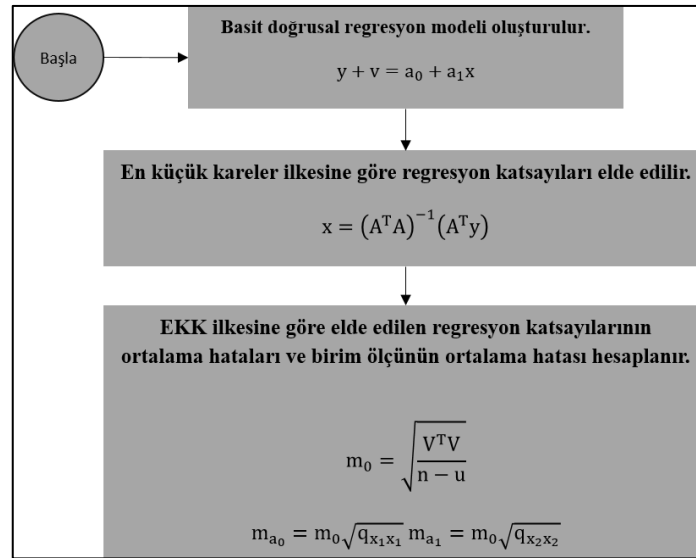
Sıcaklık, rüzgar hızı, atmosferik basınç gibi meteorolojik parametrelerin deniz seviyesi değişimi üzerinde etkisinin olduğu bilinmektedir. Bu parametrelerin deniz yüzeyinde oluşturacağı pürüzlülük yansıyan sinyali etkileyen bir faktördür ve bununla beraber GNSS tabanlı deniz seviyesi kestirimi de etkilemektedir. İlgili parametrelerin deniz seviyesi değişimi açısından meydana getirdiği sonuçlar ve GNSS-IR tekniğine etkisi aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- Sıcaklık: Sıcaklığın artması ile birlikte deniz suyu sıcaklığı da artarak genişlemeye uğramaktadır. Bunun sonucunda deniz seviyesi yükselmektedir. Çoğunlukla sıcaklıktaki artış SNR genliklerinin artmasına neden olmaktadır.
- Rüzgar hızı: Temelde suyun sürüklenmesine neden olmaktadır. Deniz yüzeyindeki sürüklenme kuvveti deniz seviyesinin değiştirmektedir. Aynı zamanda deniz

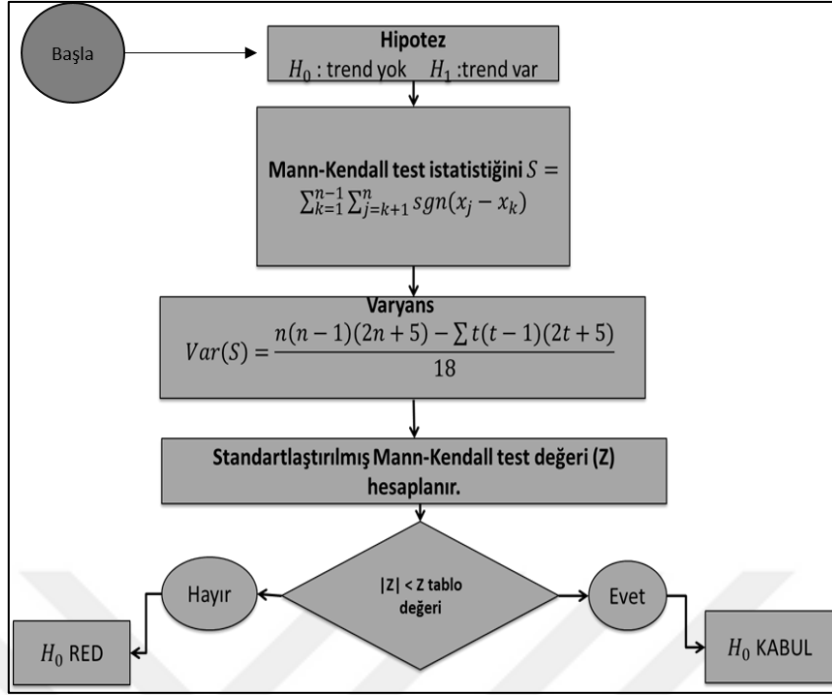
pürüzlülüğüne neden olması sebebiyle GNSS yansıyan sinyal üzerinde bir etkiye sahiptir.

- **Atmosferik Basınç:** Deniz seviyesini etkileyen birinci faktördür ve ters yönlü bir etkiye neden olmaktadır. Örneğin, atmosfer basıncında yaşanacak olan 1 milibarlık artış deniz seviyesinde 1 cm azalmaya neden olmaktadır. Bu etki “ters barometrik etki” olarak adlandırılmaktadır (Gürdal, 2002).

Deniz yüzeyi pürüzlülüğü GNSS yansıma sinyallerini etkileyen faktörlerden biridir (Asgarimehr vd., 2018; Ghiasi vd., 2021). Bu bölümde deniz seviyesi gözlemlerini etkileyen sıcaklık, atmosferik basınç ve rüzgar hızı meteorolojik parametrelerinin yansıyan GNSS sinyali üzerindeki etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, TUDES ağında mareograf istasyonu ile ortak yerleşkeli TRBZ sabit GNSS istasyonuna ait δ SNR verileri kullanılmıştır. Meteorolojik parametrelerin yansıyan sinyaller üzerindeki etkisini incelemek için ise TUDES üzerinden sağlanan TRBZ istasyonuna ait hava basıncı verisi ve ERA5 veri setinden (URL-25, 2021) sağlanan sıcaklık ve rüzgar hızı verileri kullanılmıştır. Sıcaklık, hava basıncı ve rüzgar hızı meteorolojik parametreleri ile δ SNR genlikleri karşılaştırılmıştır. Bunun için, δ SNR genlikleri ve meteorolojik parametreler için sırasıyla Basit Doğrusal Regresyon ve Mann-Kendall trend testleri uygulanmıştır (Mann, 1945; Kendall 1975; Beşel, 2017). Basit Doğrusal Regresyon ve Mann-Kendall testi iş akış şeması Şekil 82 ve Şekil 83’te gösterilmiştir.

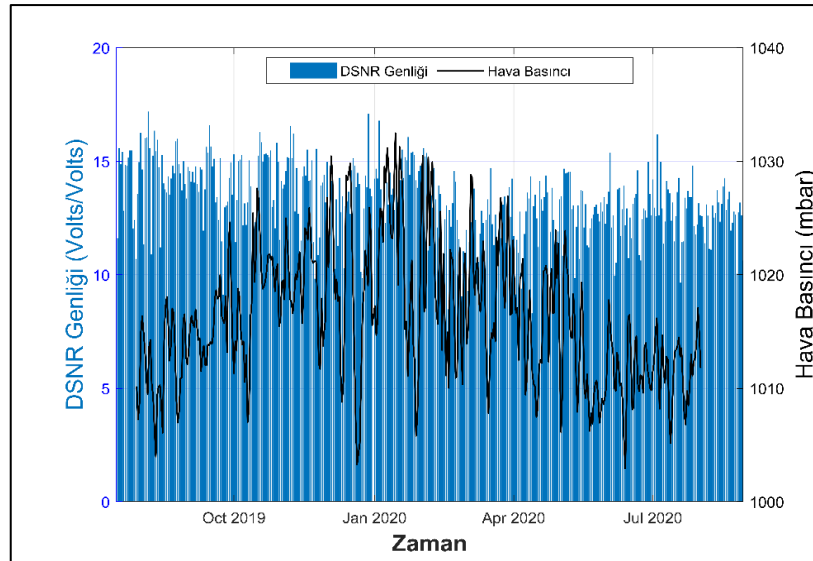


Şekil 82. Basit Doğrusal Regresyon iş akış şeması



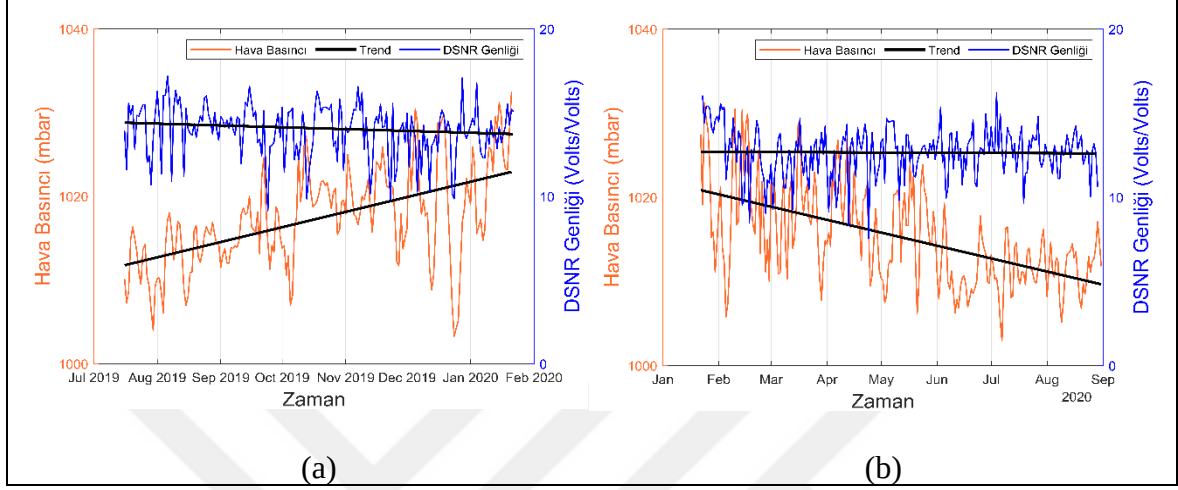
Şekil 83. Mann-Kendall testi iş akış şeması

Aşağıda sırasıyla δ SNR genliği ile hava basıncı, rüzgar hızı ve sıcaklık parametreleri ilişkisi incelenmiştir. Şekil 84'te δ SNR genliği ve hava basıncı arasındaki ilişki gösterilmiştir.



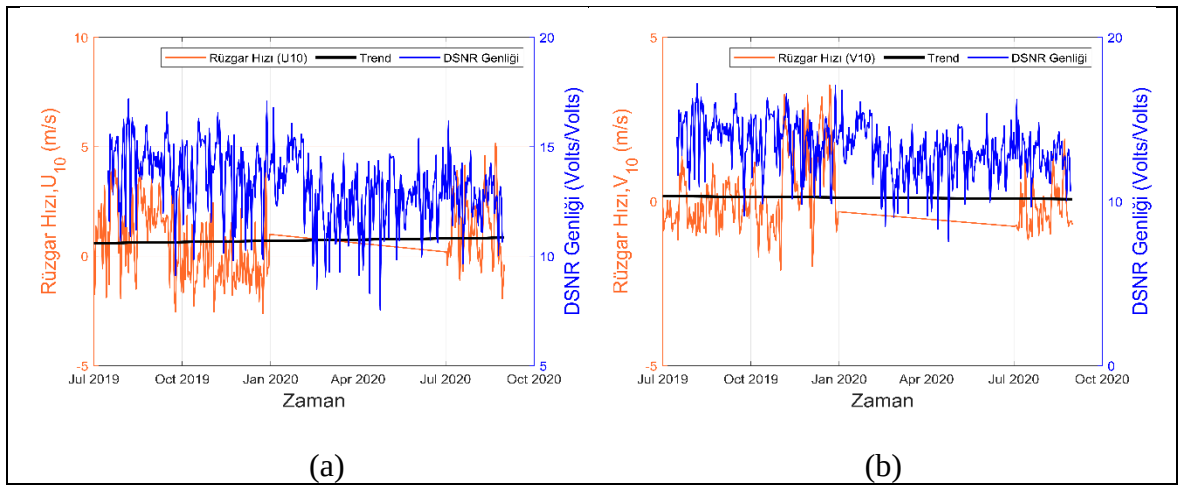
Şekil 84. δ SNR genliği ve hava basıncı ilişkisi

Şekil 84'te zaman serisinin genel seyrine bakıldığında artan ve azalan yönde trendler olduğu görülmektedir. Bu nedenle seri iki ayrı parçaya bölünerek parçalı trend analizi ile ayrı ayrı değerlendirilmiştir (Şekil 85).



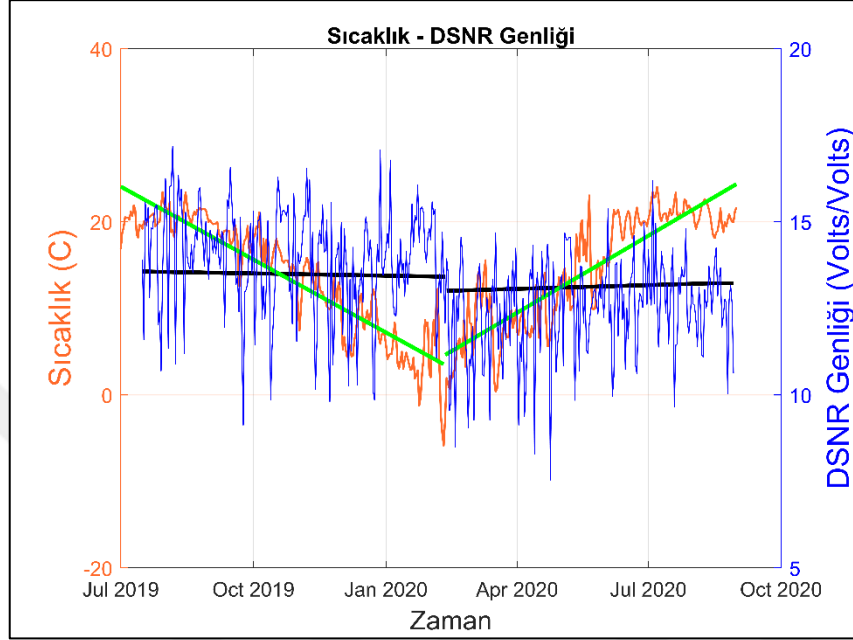
Şekil 85. δ SNR genliği ve hava basıncı ilişkisi. (a) ilk dönem, (b) ikinci dönem

δ SNR genliği ve hava basıncı arasındaki ilişkiye bakıldığında, Temmuz 2019-Şubat 2020 döneminde hava basıncında artan yönde trend, δ SNR genliğinde ise azalan yönde trend gözlemlenmiştir. Şubat 2020-Eylül 2020 dönemine gelindiğinde ise hava basıncında azalan yönde trend mevcutken δ SNR genliğinde artan yönde trend mevcuttur. Şekil 86'da doğu yönündeki (U10) ve kuzey yönündeki (V10) rüzgar hızları ile δ SNR ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 86. δ SNR genliği ve rüzgar hızı ilişkisi. (a) doğu yönündeki rüzgar hızı, (b) kuzey yönündeki rüzgar hızı

Şekil 86'ya göre, doğu yönündeki rüzgar hızı (U10) ile δ SNR genliği arasında aynı yönde bir eğilim vardır. Kuzey yönündeki rüzgar hızında ise trend yoktur. Son olarak δ SNR genliği ile sıcaklık ilişkisi incelenmiştir (Şekil 87).



Şekil 87. δ SNR genliği ve sıcaklık ilişkisi

Şekil 87'de zaman serisi iki ayrı döneme bölünerek parçalı trend analizi yapılmıştır. Buna göre; Temmuz 2019-Şubat 2020 döneminde sıcaklık ve δ SNR genliğinde azalan yönde trend, Şubat 2020-Eylül 2020 döneminde ise sıcaklık ve δ SNR genliğinde artan yönde trend görülmüştür.

Diğer yandan sıcaklık, rüzgar hızı, hava basıncı parametrelerinin zaman içerisinde gösterdiği eğilim ile δ SNR genliği arasındaki ilişkiye Mann-Kendall trend analizi kullanılarak bakılmıştır. Aşağıda sırasıyla elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.

Tablo 15. δ SNR ve sıcaklık Mann-Kendall trend analizi

	Veri	Mann-Kendall İstatistiği (Z)	Trend	Trend Yönü
1.DÖNEM	Sıcaklık	-14.6121	Trend var.	Azalan
	δ SNR	-2.7796	Trend var.	Azalan
2.DÖNEM	Sıcaklık	15.5262	Trend var.	Artan
	δ SNR	2.2711	Trend var.	Artan

Tablo 15'te sıcaklık ve δ SNR verilerine uygulanan Mann-Kendall trend analizi sonuçları verilmiştir. Buna göre, birinci dönemde sıcaklık ve δ SNR verilerinde artan yönde trend, ikinci dönemde ise azalan yönde trend bulunmuştur.

Tablo 16. δ SNR ve rüzgar hızı Mann-Kendall trend analizi

Veri	Mann-Kendall İstatistiği (Z)	Trend	Trend Yönü
Rüzgar Hızı (V10)	1.8757	Trend yok.	-
Rüzgar Hızı (U10)	-2.0848	Trend var.	Azalan
δ SNR	-8.3576	Trend var.	Azalan

Tablo 16'da rüzgar hızı ve δ SNR verilerine uygulanan Mann-Kendall trend analizi sonuçları verilmiştir. Buna göre, kuzeye bakan rüzgar hızında (V10) herhangi bir trend yok iken doğuya bakan rüzgar hızında (U10) azalan yönde trend mevcuttur. Aynı şekilde δ SNR genliği de zaman içerisinde azalan yönde bir eğilim göstermiştir.

Tablo 17. δ SNR ve hava basıncı Mann-Kendall trend analizi

	Veri	Mann-Kendall İstatistiği (Z)	Trend	Trend Yönü
1.DÖNEM	Hava basıncı	-2.0315	Trend var.	Artan
	δ SNR	-2.7796	Trend var.	Azalan
2.DÖNEM	Hava basıncı	2.2118	Trend var.	Azalan
	δ SNR	2.2711	Trend var.	Artan

Tablo 17’de hava basıncı ve δ SNR verilerine uygulanan Mann-Kendall trend analizi sonuçları verilmiştir. Buna göre, birinci dönemde sıcaklık ve δ SNR verilerinde artan yönde trend, ikinci dönemde ise hava basıncında artan yönde trend, δ SNR genliğinde azalan yönde trend bulunmuştur.

2.7. GNSS-IR Tekniği ile Gelgit Analizi

Çalışmanın bu bölümünde ülkemizde kıyıda veya kıyıya yakın bir sabit GNSS istasyonundan alınan SNR verileri ile GNSS-IR tekniğine dayalı belirlenen deniz seviyesi değişiminden yararlanarak GNSS-IR’ın gelgit bileşenlerinin belirlenmesindeki uygulanabilirliğinin araştırılması amaçlanmaktadır. Bunun için öncelikle gelgit harmonik analizi ile gelgit bileşenleri belirlenmiş olup sonuçlar küresel okyanus gelgit modelleri ile karşılaştırılmıştır.

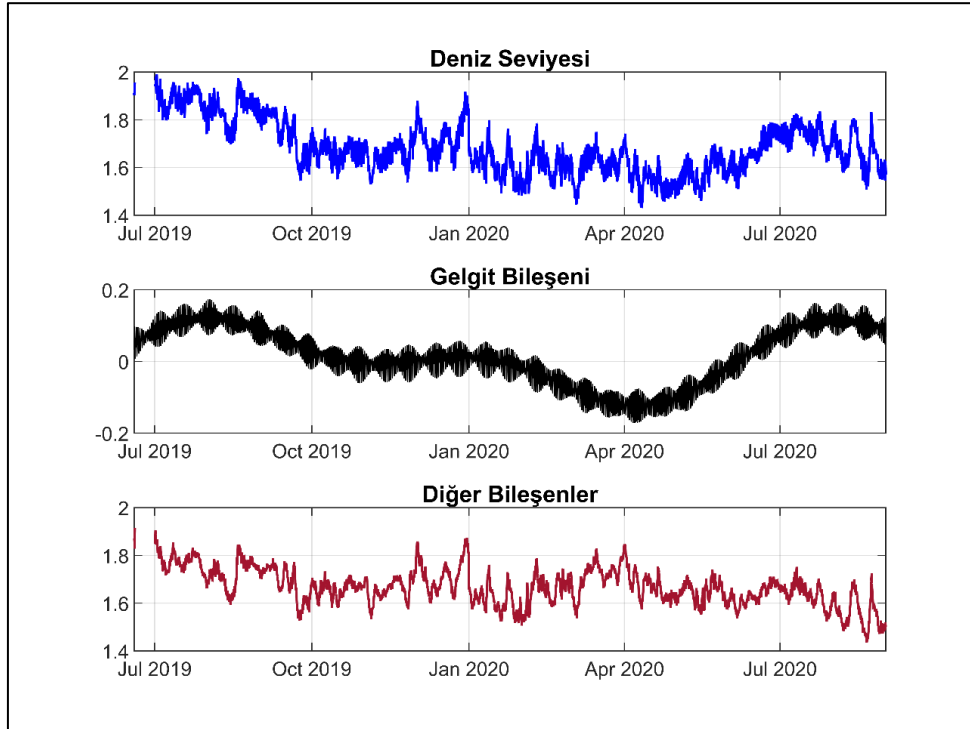
2.7.1. Gelgit Harmonik Analizi

GNSS-IR tekniği deniz seviyesi değişimi gözlemlerinden gelgit harmonik analizi ile gelgit bileşenleri belirlenmiştir. Çalışmada, gelgit bileşenlerini belirlemek için Pawlowicz vd., (2002) tarafından geliştirilen ve MATLAB programlama dilinde yazılan T_Tide klasik

gelgit harmonik analiz yazılımından yararlanılmıştır. GNSS-IR ile gelgit bileşenlerinin belirlenmesine ilişkin detaylar aşağıda verilmiştir.

1. Öncelikle bu bölümde amaçlanan ülkemizde GNSS-IR ile gelgit bileşenlerinin belirlenebilirliğinin araştırılması olduğundan bir test alanı seçilmiştir. Bu kapsamda test alanı olarak TRBZ sabit GNSS istasyonu ele alınmıştır.
2. TRBZ sabit GNSS istasyonu Temmuz 2019- Ağustos 2020 periyodunda kaydedilen SNR verileri kullanılarak Bölüm 2.4'te anlatıldığı üzere deniz seviyesi değişimi belirlenmiştir.
3. Trabzon mareograf istasyonu deniz seviyesi değişimi verileri alınmıştır.
4. GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi değişimi ve mareograf kayıtlarından gelgit harmonik analizi ile günlük (P1, K1, O1) ve yarı-günlük (M2, S2) temel gelgit bileşenleri genlikleri ve fazları hesaplanmıştır (Şekil 88).

Tablo 18'de GNSS-IR tekniği deniz seviyesi değişimi ve mareograf kayıtlarından hesaplanan gelgit bileşenlerinin genlikleri, fazları ve %95 istatistik güvenle duyarlılıkları verilmiştir.



Şekil 88. TRBZ istasyonu gelgit bileşeni

Tablo 18. GNSS-IR tekniği ve mareograf ile elde edilen deniz seviyesi değişimlerinden hesaplanan gelgit genlikleri, faz ve duyarlıkları

Bileşen	Mareograf				GNSS-IR				Farklar	
	Gen. (cm)	Gen. Duy. (cm)	Faz (°)	Faz Duy. (°)	Gen. (cm)	Gen. Duy. (cm)	Faz (°)	Faz Duy. (°)	Gen. (cm)	Faz (°)
P1	0.45	0.1	221.08	12.7	1.05	0.7	62.73	43.1	0.6	158.35
K1	0.83	0.1	256.3	5.72	4.99	0.6	231.7	7.49	4.16	24.6
O1	0.66	0.1	245.05	6.61	0.57	0.5	239.23	62.98	-0.09	5.82
M2	2.53	0.1	260.42	1.5	1.73	0.6	213.43	18.3	-0.8	46.99
S2	1.16	0.1	203.9	3	0.91	0.5	342.09	36.22	-0.25	-138.19

GNSS-IR seviyesi değişimi ve mareograf kayıtları kullanılarak belirlenen gelgit bileşenleri genlikleri karşılaştırıldığında; maksimum fark 4.16 ± 0.5 cm ile K1 bileşeninde, minimum fark -0.09 ± 0.4 cm ile O1 bileşeninde bulunmuştur.

2.7.2. Küresel Okyanus Gelgit Modelleri ile Karşılaştırma

Gelgit genlik ve fazı, gelgit akımları ve gelgit yüklemelerini sağlayan çeşitli küresel okyanus modelleri vardır. Bu çalışmada FES2014, TPXO9-Atlas ve EOT20 küresel okyanus gelgit modellerinden alınan günlük (P1, K1, O1) ve yarı-günlük (M2, S2) gelgit bileşenleri kullanılmıştır. FES2014 ve TPXO9-Atlas küresel okyanus gelgit modelleri verileri Chalmers Üniversitesi, Okyanus Gelgit Yükleme Servisi'nden sağlanmıştır (URL-26, 2021). EOT20 küresel okyanus gelgit modeli ise Münih Teknik Üniversitesi, Alman Jeodezik Araştırma Enstitüsü (DGFI-TUM) tarafından geliştirilmiştir. Özellikle kıyı alanları için iyi sonuçlar sağladığı belirtilmektedir (Hart-Davis vd., 2021). Tablo 19'da modellere ilişkin bilgiler sunulmuştur.

Tablo 19. Çalışmada kullanılan küresel okyanus gelgit modelleri

Model	Girdi	Çözünürlük	Gelgit Bileşenleri	Referans
FES2014	Topex/Poseidon, Jason-1/2, TPN-J1N, ERS-1/2, Envisat	$0.0625^\circ \times 0.0625^\circ$	34 bileşen (K1 , M2 , M4 , N2 , O1 , P1 , Q1 , S1 , S2 , K2 , 2N2 , E2 , J1 , L2 , La2 , M3 , M6 , M8 , Mf , MKS2 , Mm ,	Carrere vd. 2015

Tablo 19'un devamı

FES2014	Topex/Poseidon, Jason-1/2, TPN-J1N, ERS-1/2, Envisat	0.0625°x0.0625°	MN4, MS4, MSf, MSqm, Mtm, Mu2, N4, Nu2, R2, S4, Sa, Ssa, T2)	Carrere vd. 2015
TPXO9-Atlas	Topex/Poseidon, Jason-1/2, ERS-1/2, Envisat, TG	0.0333° x 0.0333°	13 bileşen (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf, Mm, M4, MS4, MN4)	Egbert ve Erofeeva, 2002
EOT20	Topex/Poseidon, Jason-1/2/3, ERS-1/2, Envisat, ALES retracker	0.125° x 0.125°	17 bileşen (2N2, J1, K1, K2, M2, M4, MF, MM, N2, O1, P1, Q1, S1, S2, SA, SSA ve T2)	Hart-Davis vd., 2021

Hem GNSS-IR hem de mareograf deniz seviyesi değişiminden gelgit harmonik analizi ile elde edilen gelgit bileşenleri genlikleri FES2014, TPXO9-Atlas ve EOT20 küresel okyanus gelgit modelleri ile karşılaştırılmıştır. Tablo 20'de mareograf, GNSS-IR ve çalışmada kullanılan küresel okyanus gelgit modellerine ait gelgit genlikleri gösterilmiştir. Küresel okyanus modelleri sonuçlarına bakıldığında da ülkemiz Karadeniz kıyılarında düşük gelgit genliklerinin olduğu görülmüştür.

Tablo 20. Mareograf, GNSS-IR ve küresel okyanus gelgit modelleri gelgit genlikleri

Bileşen	Mareograf (cm)	GNSS-IR (cm)	FES2014 (cm)	TPXO9-Atlas (cm)	EOT20 (cm)
P1	0.45	1.05	0.1	0.08	0.11
K1	0.83	4.99	0.34	0.3	0.34
O1	0.66	0.57	0.22	0.2	0.22
M2	2.53	1.73	0.3	0.3	0.3
S2	1.16	0.91	0.098	0.1	0.097

Tablo 20'ye bakıldığında; en büyük gelgit genliği GNSS-IR ile K1 günlük bileşeninde elde edilmiştir. Küresel okyanus gelgit modellerinden elde edilen sonuçların kendi içerisinde tutarlı olduğu görülmüştür.

3. BULGULAR VE İRDELEME

Bu bölümde tez çalışmasının tamamında yapılan çalışmalar üzerinden elde edilen bulgular ve irdelemeler yapılmıştır. Bu kapsamda sırasıyla (1) GNSS-IR tekniği ile deniz seviyesi değişiminin belirlenmesi üzerine istasyonlar bazında elde edilen bulgular, (2) ardından her bir istasyon için sırasıyla tekniğin performansını geliştirmeye yönelik yapılmış olan kalite değerlendirmesi bulguları, son olarak (3) GNSS yansıma sinyalleri üzerindeki meteorolojik etkiler bulguları ve (4) GNSS-IR tekniği ile gelgit bileşenlerinin belirlenmesine yönelik bulgular sunulmuştur.

3.1. GNSS-IR Tekniği ile Deniz Seviyesi Değişiminin Belirlenmesi Bulguları

Çalışmada öncelikle ülkemizin farklı kıyılarında kıyıda ve/veya kıyıya yakın konumda bulunan Karadeniz’de TRBZ, SNOP, FASA, KURU, SNOP, SLEE, RZE1 ve ZONG, Ege’de DATC, Akdeniz’de ANMU, Marmara’da TEKR istasyonu, Akdeniz’de IGS bünyesindeki MERS istasyonu olmak üzere toplam 12 sabit GNSS istasyonu değerlendirmeye alınmıştır. Bölüm 2.3 başlığı altında anlatıldığı üzere tüm istasyonlarda SNR verilerinin ön işleme yapılmıştır. Bu aşamada her bir istasyon için en uygun uydu yükseklik açısı ve azimut açısı aralıkları belirlenmiştir. En uygun uydu yükseklik açısı ve azimut aralıklarına göre Bölüm 2.3’te anlatıldığı üzere Fresnel bölgeleri çizdirilmiştir. Sonuç olarak TRBZ, SNOP, MERS ve TEKR sabit GNSS istasyonları GNSS-IR tekniği ile deniz seviyesi değişimi belirlenmesine uygun istasyonlar olarak bulunmuştur. Diğer istasyonlara bakıldığında,

- FASA, SLEE ve ZONG istasyonlarında denizel alandan gelen yansıma sinyallerini almak için 5° - 7° gibi dar uydu yükseklik açısı aralığının kullanılması gerekliliğinden dolayı yeteri kadar SNR verisi alınamamıştır.
- SINP istasyonu dar azimut aralığına sahip olduğundan yeteri kadar SNR verisi ve uydu izine sahip değildir.
- KURU ve RZE1 istasyonlarındaki uydu izlerinin büyük bölümünün karaya denk gelmiştir.

- ANMU ve DATC istasyonlarının ise zayıf yansıma genliklerine sahip olduğu görülmüştür.

Çalışmada GNSS-IR ile deniz seviyesi değişimi belirlenmesine uygun bulunan GNSS istasyonları için farklı GNSS sistemlerinin çoklu sinyalleri değerlendirilerek performanslarına bakılmıştır.

- TRBZ istasyonunda sadece GPS L1, SNOP istasyonunda ise sadece GPS L2 sinyalinden güçlü yansımalar elde edildiğinden farklı bir sinyal kullanılamamıştır. Diğer yandan TRBZ istasyonunda sadece GPS gözlemleri mevcutken SNOP istasyonunda GLONASS gözlemleri de bulunmaktadır. SNOP istasyonu GLONASS L1 ve GLONASS L2 sinyalleri incelendiğinde zayıf yansıma genliklerine sahip olduğu görüldüğünden çalışmaya dahil edilmemiştir.
- MERS istasyonunda GPS, GLONASS ve Galileo gözlemlerine bakılmıştır. GPS verilerinin L1, L2 ve L5 sinyalleri incelenmiş olup L2 sinyalinde bozulma olduğu tespit edildiğinden temel L1 sinyali ve yeni nesil L5 sinyali kullanılmıştır. GLONASS verilerine gelindiğinde ise MERS istasyonunda fazlaca kaba hatalı ölçüye sahip ve veri boşluğunun çok olduğu görülmüştür. Bu nedenle çalışmaya dahil edilmemiştir. Galileo verilerinde ise GPS verilerinde olduğu gibi L1 ve L5 sinyallerinin çalışmaya dahil edilebilir olduğu tespit edilmiştir.
- TEKR istasyonunda sadece GPS L1 ve GPS L2 verileri çalışmaya katılmıştır.
- Tüm bu ulusal istasyonların yanında çalışmaya uluslararası bir istasyon daha dahil edilerek uygulanan analiz stratejilerinin bu istasyonda denenmesi ile uluslararası anlamda karşılaştırma yapılması amaçlanmıştır. Bu amaçla SC02 sabit GNSS istasyonu çalışmaya dahil edilmiştir. Bu istasyonda sadece GPS L1 ve GPS L2C sinyalleri kullanılmıştır.

Yukarıda belirtilen istasyon ve sinyallerle Bölüm 2.4'te detaylandırıldığı üzere deniz seviyesi değişimi belirlenmiştir. Tablo 21'de sabit GNSS istasyonlarından kestirilen deniz seviyesi ve mareograf kayıtlarına ait boşluk oranları verilmiştir. Tablo 21'e bakıldığında en fazla veri boşluğunun MERS Galileo L1'de olduğu görüşmüştür. Tüm istasyonlarda GPS L1 sinyali verileri daha fazladır. Çalışmada kullanılan SC02 istasyonu için hem mareograf hem de GNSS verilerinde boşluk yoktur.

Tablo 21. Deniz seviyesi değişimi boşluk oranı

	İstasyon Adı	Boşluk Oranı (%)
Mareograf	Trabzon	2.5
	Sinop	4.80
	Erdemli	16.51
	Marmara Ereğlisi	0
	Friday Limanı	0
GNSS-IR	TRBZ GPS L1	0.22
	SNOP GPS L2	10.94
	MERS GPS L1	13.78
	MERS GPS L5	25.91
	MERS Galileo L1	28.10
	MERS Galileo L5	26.18
	TEKR GPS L1	7.93
	TEKR GPS L2	8.89
	SC02 GPS L1	0
	SC02 GPS L2C	0

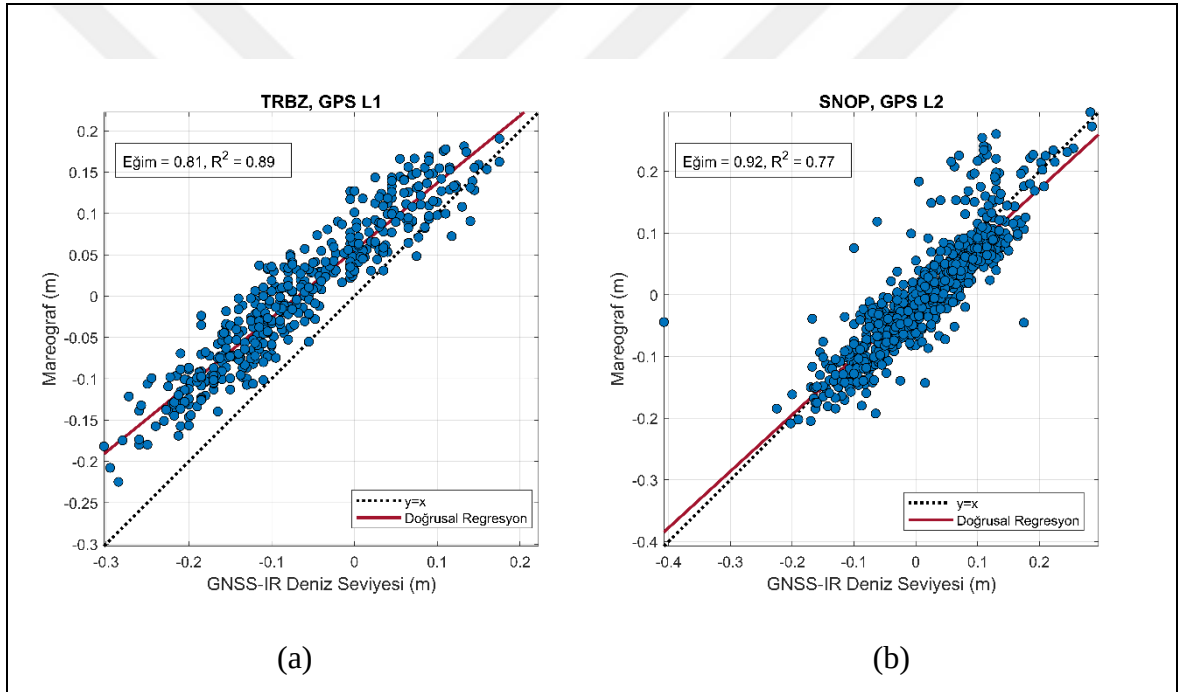
3.2. GNSS-IR Deniz Seviyesi Değişimi Kalite Değerlendirmesi Bulguları

GNSS-IR tekniğinin deniz seviyesi değişimi belirleme performansının geliştirilmesine yönelik tez çalışması kapsamında kullanılmış olan Pik-Gürültü Oranı testi, K-Ortalamlar Kümeleme algoritması ve LSP-MA yöntemine ilişkin bulgular aşağıda sırasıyla gösterilmiştir. Bu bölümde, GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi değişimi ve mareograf arasındaki Pearson korelasyonu, KOH, uygulanan doğrusal regresyon sonucu hesaplanan regresyon eğimi ve R^2 belirleyicilik katsayısı üzerinden bulgular sunulmuştur.

3.2.1. Pik-Gürültü Oranı Testi Bulguları

Aşağıda sırasıyla TRBZ ve SNOP mareograf ortak yerleşke istasyonları, MERS IGS ağı istasyonu, TEKR TUSAGA-Aktif ağı istasyonu ve ABD Friday Limanı SC02 istasyonu Pik-Gürültü Oranı testi bulguları verilmiştir.

- Mareograf Ortak Yerleşkeli TUDES Ağı İstasyonları: TRBZ ve SNOP mareograf ortak yerleşke sabit GNSS istasyonlarında Pik-Gürültü Oranı testi kullanılarak GNSS-IR ve Trabzon ve Sinop mareograf deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği Şekil 89’da gösterilmiştir.



Şekil 89. Pik-Gürültü Oranı testine göre TRBZ ve SNOP sabit GNSS istasyonları GNSS-IR ile tahmin edilen ve mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği

TRBZ istasyonunda doğrusal regresyon eğim değeri $0.81 \text{ m/m} \pm 0.01 \text{ m/m}$ olarak hesaplanmış olup R^2 katsayısı %89 seviyesinde yüksek oranda elde edilmiştir. Diğer yandan SNOP istasyonunda eğim değeri $0.92 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$, R^2 katsayısı ise %77 olarak hesaplanmıştır. Tablo 22’de ise GNSS-IR ve mareograf arasında hesaplanan Pearson korelasyonu, KOH, eğim ve R^2 parametresi verilmiştir.

Tablo 22. Mareograf ortak yerleşke istasyonlarında Pik-Gürültü Oranı testine göre GNSS-IR ve mareograf karşılaştırması

	TRBZ	SNOP
Korelasyon	0.95	0.88
KOH (cm)	2.89	4.56
Eğim (m/m)	0.81±0.01	0.92±0.02
R ²	%89	%77

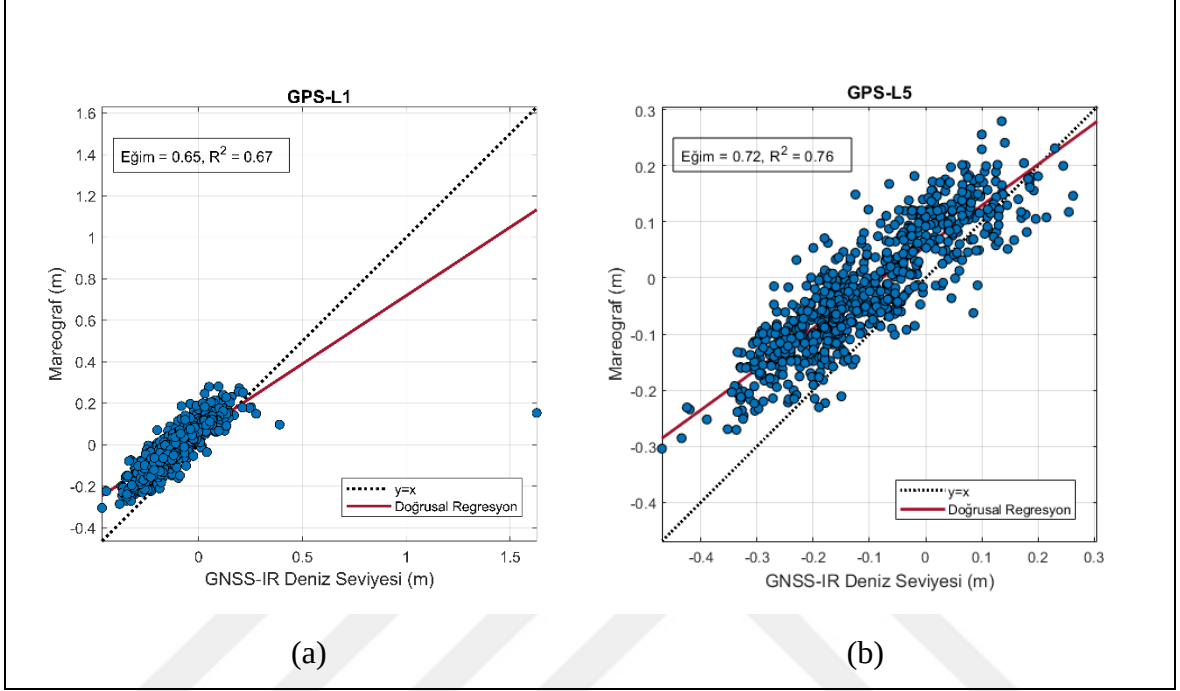
TRBZ sabit GNSS istasyonundan Temmuz 2019-Eylül 2020 periyodunda GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi değişimi ve aynı istasyonla ortak yerleşkeli Trabzon mareograf kayıtları arasında 0.95 şeklinde yüksek oranda Pearson korelasyonu elde edilmiştir. KOH büyüklüğüne bakıldığında 2.89 cm ile iyi bir sonuç yakalanmıştır. Aynı istasyonun iki farklı dönemde alınan verileri eklendiğinde korelasyonda düşüş olduğu Bölüm 2.5.1’de açıklanmıştır. Tablo 23’te görüldüğü üzere Eylül 2020 sonrası eklenen verilerle tüm parametreler düzeyinde sonuçlarda bozulmalar görülmüştür.

Tablo 23. TRBZ istasyonu dönemlere göre GNSS-IR ve mareograf karşılaştırması

	Temmuz 2019- Eylül 2020	Temmuz 2019- Aralık 2020	Temmuz 2019- Ağustos 2021
Korelasyon	0.95	0.70	0.71
KOH (cm)	2.89	6.37	6.21
Eğim (m/m)	0.81	0.60	0.44
R ²	%89	%48	%50

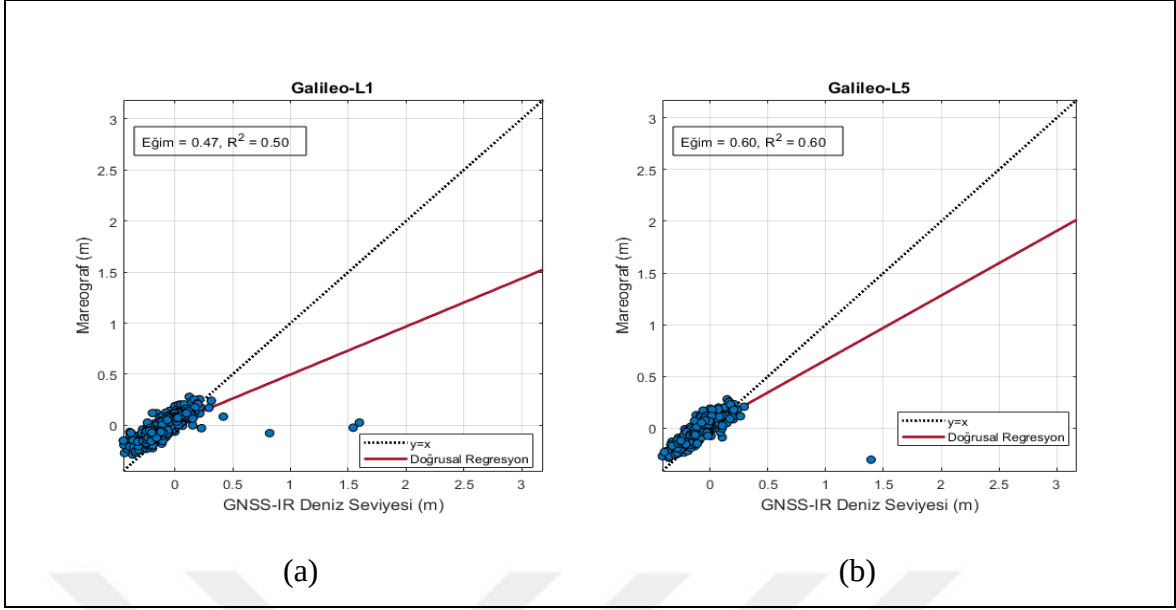
Tablo 23’te SNOP sabit GNSS istasyonuna bakıldığında ise GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi değişimi ve aynı istasyonla ortak yerleşkeli Sinop mareograf kayıtları arasında 0.88 şeklinde yüksek oranda Pearson korelasyonu hesaplanmıştır. KOH değeri ise 4.56 cm olarak bulunmuştur. Korelasyon ve KOH parametreleri açısından değerlendirildiğinde TRBZ istasyonunun SNOP istasyonuna göre daha iyi sonuç verdiği söylenebilir.

- IGS Ağı İstasyonu: MERS sabit GNSS istasyonunda GPS gözlemleri için Pik-Gürültü Oranı testi kullanılarak GNSS-IR ve Erdemli mareograf deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği Şekil 90'da gösterilmiştir.



Şekil 90. Pik-Gürültü Oranı testine göre MERS sabit GNSS istasyonu GPS gözlemlerinden GNSS-IR ile tahmin edilen ve Erdemli mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği

MERS GPS L1 sinyalinde GNSS-IR tekniği ile hesaplanan deniz seviyesi değişimi ve mareograf arasındaki doğrusal regresyon eğim değeri $0.72 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ iken R^2 parametresi %67 olarak hesaplanmıştır. MERS GPS L5 sinyalinde ise doğrusal regresyon eğimi $0.65 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ iken R^2 parametresi %76 şeklindedir. Doğrusal regresyon eğimi ve R^2 parametreleri yönünden GPS L5 sinyalinde daha iyi sonuç elde edilmiştir. Şekil 91'de MERS sabit GNSS istasyonunda Galileo gözlemleri için Pik-Gürültü Oranı testi kullanılarak GNSS-IR ve Erdemli mareograf deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği gösterilmiştir.



Şekil 91. Pik-Gürültü Oranı testine göre MERS sabit GNSS istasyonu Galileo gözlemlerinden GNSS-IR ile tahmin edilen ve Erdemli mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği

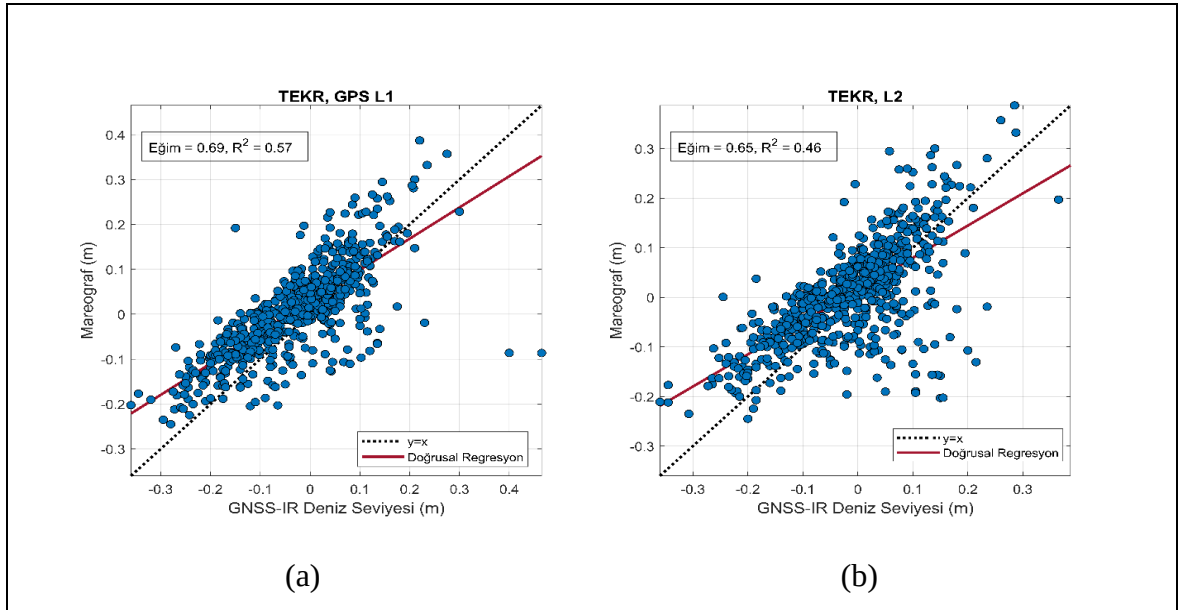
MERS Galileo L1 sinyalinde GNSS-IR tekniği ile hesaplanan deniz seviyesi değişimi ve mareograf arasındaki doğrusal regresyon eğim değeri $0.47 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ iken R^2 parametresi %50 olarak hesaplanmıştır. MERS Galileo L5 sinyalinde ise doğrusal regresyon eğim değeri $0.60 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ iken R^2 parametresi %60 şeklindedir. Eğim ve R^2 parametreleri yönünden Galileo L5 sinyalinde daha iyi sonuç elde edilmiştir. Tablo 24'te ise hem GPS hem de Galileo gözlemleri için GNSS-IR ve mareograf arasında hesaplanan Pearson korelasyonu, KOH, eğim ve R^2 parametresi verilmiştir.

Tablo 24. MERS istasyonunda Pik-Gürültü Oranı testine göre GPS ve Galileo gözlemleri için GNSS-IR ve mareograf karşılaştırması

	GPS		Galileo	
	L1	L5	L1	L5
Korelasyon	0.82	0.87	0.71	0.77
KOH (cm)	6.37	5.5	7.91	7.09
Eğim (m/m)	0.65 ± 0.02	0.72 ± 0.02	0.47 ± 0.02	0.60 ± 0.02
R^2	%67	%76	%50	%60

Tablo 24’te MERS GPS L1 sinyalinde GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi değişimi ve Erdemli mareograf kayıtları arasında Pearson korelasyonu 0.82 iken GPS L5 sinyalinde 0.87 olarak hesaplanmıştır. KOH büyüklüğüne bakıldığında, GPS L1 sinyalinde 6.37 cm olup GPS L5 sinyalinde 5.5 cm olarak elde edilmiştir. MERS istasyonu GPS gözlemleri kullanılarak hesaplanan deniz seviyesi değişiminde L5 sinyalinin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. MERS Galileo gözlemlerine gelindiğinde, L1 sinyalinde GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi değişimi ve Erdemli mareograf kayıtları arasında Pearson korelasyonu 0.71 iken L5 sinyalinde 0.77 olarak bulunmuştur. KOH büyüklüğü ise L1 sinyalinde 7.91 cm olup L5 sinyalinde 7.09 cm şeklindedir. Galileo gözlemleri kullanılarak belirlenen deniz seviyesi değişiminde L5 sinyalinde daha iyi sonuç elde edilmiştir. Buradan hareketle MERS istasyonunda yeni nesil L5 sinyalinin hem GPS hem de Galileo’da daha iyi olduğu görülmüştür. Diğer yandan Galileo gözlemlerine nazaran GPS gözlemlerinin performansı daha yüksek bulunmuştur. Galileo SNR verileri boşluk oranının GPS SNR verilerinden daha fazla olması Galileo sonuçlarını olumsuz etkileyen bir faktör olmuştur.

- TUSAGA-Aktif Ağı İstasyonu: TEKR sabit GNSS istasyonunda GPS L1 ve GPS L2 için Pik-Gürültü Oranı testi kullanılarak GNSS-IR ve Marmara Ereğlisi mareograf deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği Şekil 92’de gösterilmiştir.



Şekil 92. Pik-Gürültü Oranı testine göre TEKR sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen ve Marmara Ereğlisi mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği

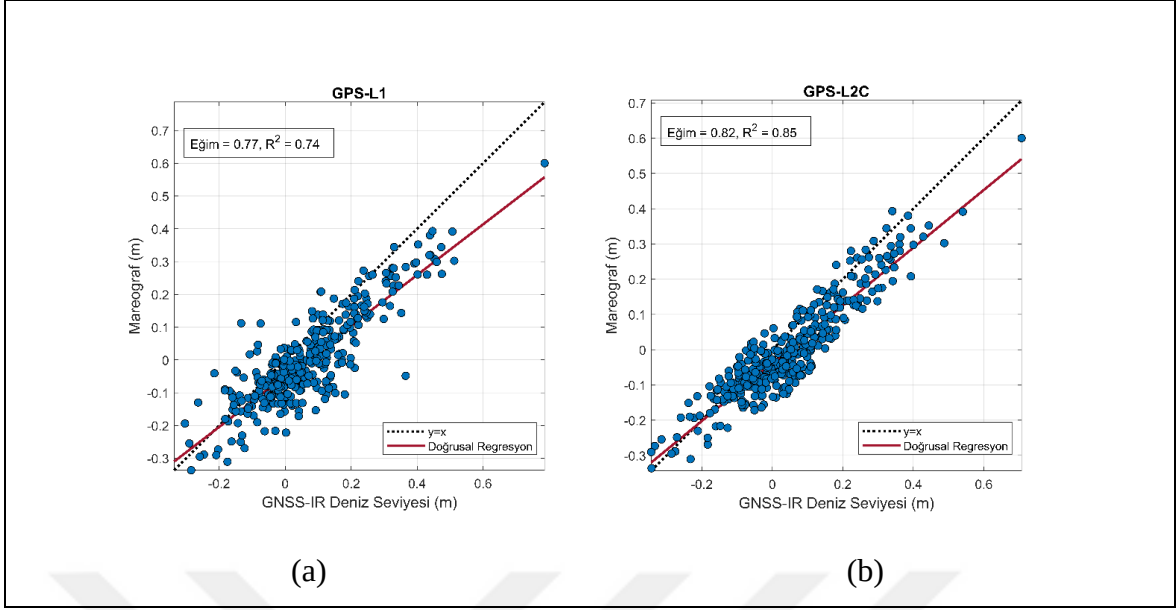
TEKR GPS L1 sinyalinde GNSS-IR tekniğine dayalı hesaplanan deniz seviyesi değişimi ve Marmara Ereğlisi mareograf kayıtları arasındaki doğrusal regresyon eğimi $0.69 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ iken R^2 parametresi %57 olarak hesaplanmıştır. GPS L2 sinyalinde ise doğrusal regresyon eğimi $0.65 \text{ m/m} \pm 0.03 \text{ m/m}$ iken R^2 parametresi %46 olarak bulunmuştur. Tablo 25'te GNSS-IR ve mareograf arasında hesaplanan Pearson korelasyonu, KOH, eğim ve R^2 parametresi verilmiştir.

Tablo 25. TEKR istasyonunda Pik- Gürültü Oranı testine göre GNSS-IR ve mareograf karşılaştırması

	GPS-L1	GPS-L2
Korelasyon	0.79	0.68
KOH (cm)	6.62	7.35
Eğim (m/m)	0.69 ± 0.02	0.65 ± 0.03
R^2	0.57	0.46

Tablo 25'te TEKR GPS gözlemleri kullanılarak hesaplanan deniz seviyesi değişimi ve Marmara Ereğlisi mareograf kayıtları arasında Pearson korelasyonu L1 sinyali için 0.79 iken L2 sinyali için 0.68 olarak bulunmuştur. KOH büyüklüğü ise L1 sinyalinde 6.62 cm olup L2 sinyalinde 7.35 cm'dir. Tüm parametreler açısından her iki sinyal karşılaştırıldığında GPS L1 sinyali ile daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

- ABD Friday Limanı SC02 istasyonu: SC02 sabit GNSS istasyonunda GPS L1 ve GPS L2C sinyalleri için Pik-Gürültü Oranı testi kullanılarak GNSS-IR ve Friday Limanı mareograf deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği Şekil 93'te gösterilmiştir.



Şekil 93. Pik-Gürültü Oranı testine göre SC02 sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen ve Friday Limanı mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği

SC02 sabit GNSS istasyonu GPS L1 sinyalinde doğrusal regresyon eğimi $0.77 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ iken GPS L2C sinyalinde $0.82 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ olarak hesaplanmıştır. R^2 parametresi ise, GPS L1 sinyalinde %74, GPS L2C sinyalinde %85 olarak elde edilmiştir. Tablo 26’da GNSS-IR ve mareograf arasında hesaplanan Pearson korelasyonu, KOH, eğim ve R^2 parametresi verilmiştir.

Tablo 26. SC02 istasyonunda Pik- Gürültü Oranı testine göre GNSS-IR ve mareograf karşılaştırması

	GPS-L1	GPS-L2C
Korelasyon	0.86	0.92
KOH (cm)	6.95	5.35
Eğim (m/m)	0.77 ± 0.02	0.82 ± 0.02
R^2	%74	%85

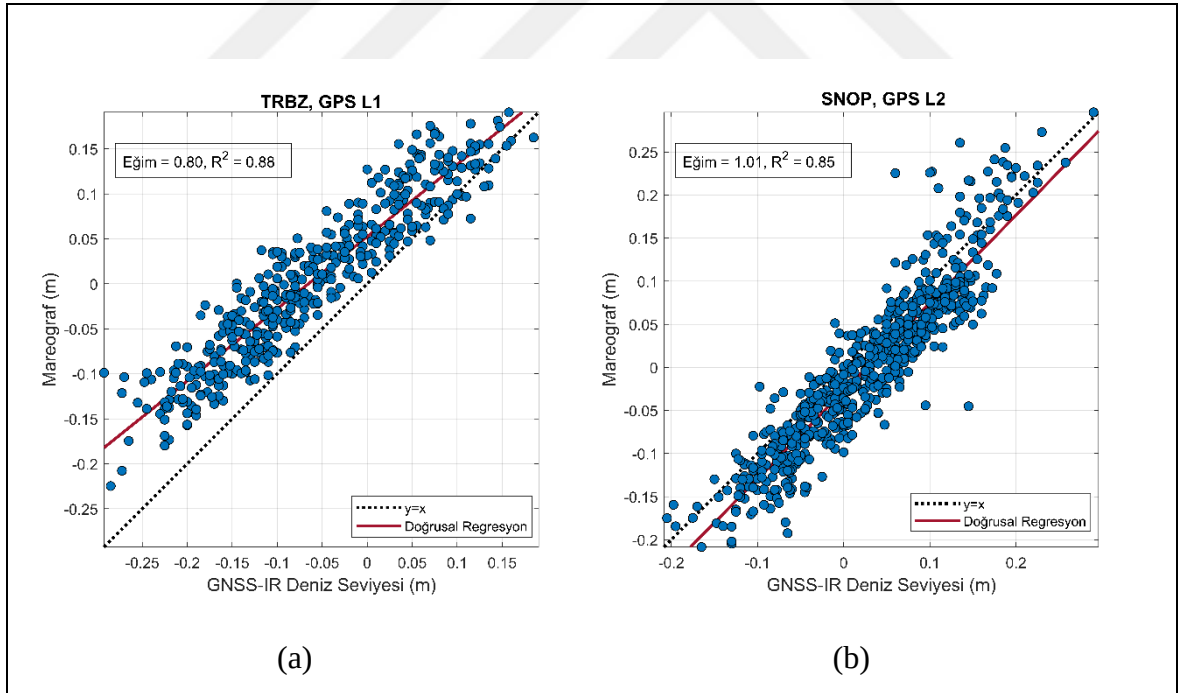
Tablo 26’da SC02 GPS gözlemleri kullanılarak hesaplanan deniz seviyesi değişimi ve Friday Limanı mareograf kayıtları arasında Pearson korelasyonu L1 sinyali için 0.86 iken L2C sinyali için 0.92 şeklinde yüksek bir korelasyon elde edilmiştir. KOH büyüklüğü ise L1

sinyalinde 6.95 cm olup L2C sinyalinde 5.35 cm olarak hesaplanmıştır. Tüm parametreler açısından her iki sinyal karşılaştırıldığında, SC02 istasyonunda GPS L2C sinyali ile daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

3.2.2. K-Ortalamlar Kümeleme Algoritması Bulguları

Aşağıda sırasıyla TRBZ ve SNOP mareograf ortak yerleşke istasyonları, MERS IGS ağı istasyonu, TEKR TUSAGA-Aktif ağı istasyonu ve ABD Friday Limanı SC02 istasyonu K-Ortalamlar Kümeleme algoritması bulguları verilmiştir.

- Mareograf Ortak Yerleşkeli TUDES Ağ İstasyonları: TRBZ ve SNOP mareograf ortak yerleşkeli sabit GNSS istasyonlarında K-Ortalamlar Kümeleme algoritması kullanılarak GNSS-IR ve Trabzon ve Sinop mareograf deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği Şekil 94'te gösterilmiştir.



Şekil 94. K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasına göre TRBZ ve SNOP sabit GNSS istasyonları GNSS-IR ile tahmin edilen ve mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği

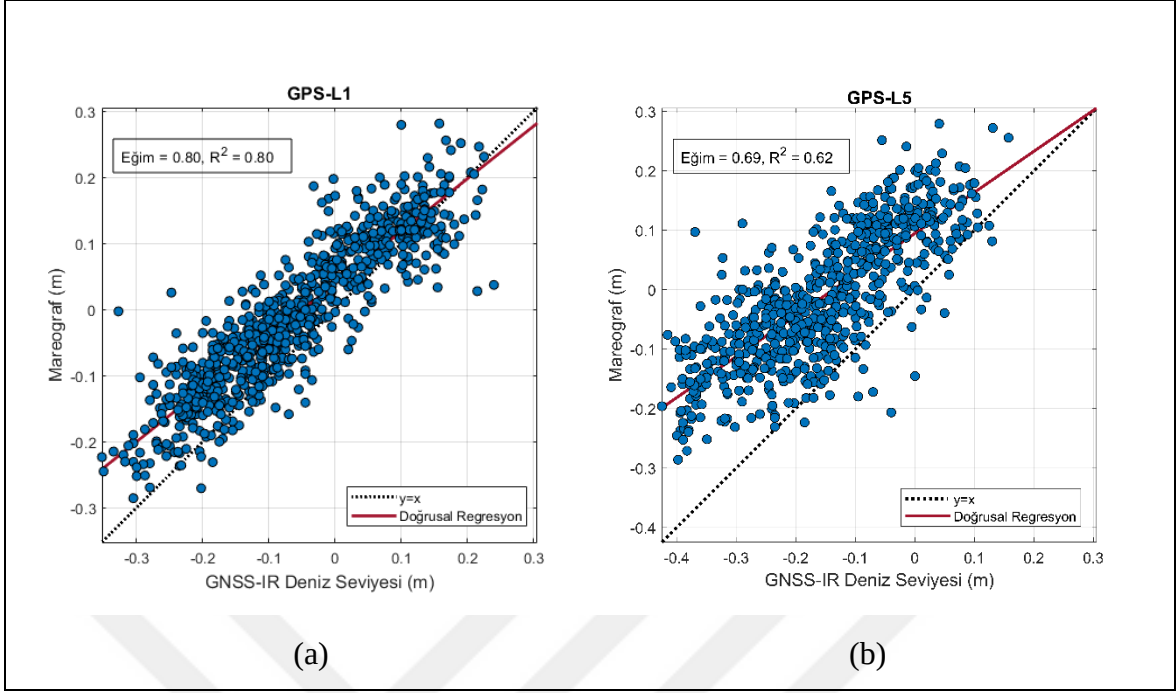
TRBZ istasyonunda doğrusal regresyon eğim değeri $0.80 \text{ m/m} \pm 0.03 \text{ m/m}$ olarak hesaplanmış olup R^2 katsayısı %88 seviyesinde yüksek şekilde elde edilmiştir. Diğer yandan SNOP istasyonunda doğrusal regresyon eğim değeri $1.01 \text{ m/m} \pm 0.01 \text{ m/m}$, R^2 katsayısı ise %85 olarak hesaplanmıştır. Tablo 27’de ise GNSS-IR ve mareograf arasında hesaplanan Pearson korelasyonu, KOH, eğim ve R^2 parametresi verilmiştir.

Tablo 27. Mareograf ortak yerleşke istasyonlarında K-Ortalamalar Kümeleme algoritmasına göre GNSS-IR ve mareograf karşılaştırması

	TRBZ	SNOP
Korelasyon	0.93	0.92
KOH (cm)	3.05	3.64
Eğim (m/m)	0.80 ± 0.03	1.01 ± 0.01
R^2	%88	%85

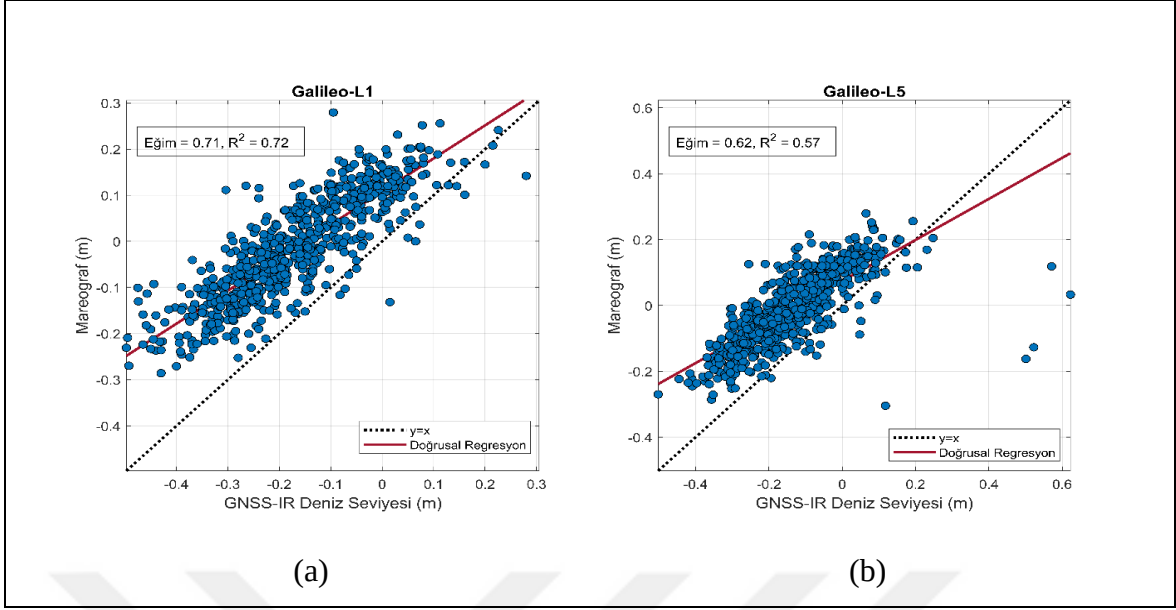
Tablo 27’de TRBZ sabit GNSS istasyonundan GNSS-IR tekniğine dayalı olarak belirlenen deniz seviyesi değişimi ve Trabzon mareograf kayıtları arasında Pearson korelasyonu 0.93 olup KOH büyüklüğü 3.05 cm olarak elde edilmiştir. SNOP istasyonunda ise GNSS-IR tekniğine dayalı olarak belirlenen deniz seviyesi değişimi ve Sinop mareograf kayıtları arasında Pearson korelasyonu 0.92 olup KOH büyüklüğü 3.64 cm olarak hesaplanmıştır.

- IGS Ağı İstasyonu: MERS sabit GNSS istasyonunda GPS gözlemleri için K-Ortalamalar Kümeleme algoritması kullanılarak GNSS-IR ve Erdemli mareograf deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği Şekil 95’te gösterilmiştir.



Şekil 95. K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasına göre MERS sabit GNSS istasyonu GPS gözlemlerinden GNSS-IR ile tahmin edilen ve Erdemli mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği

MERS GPS L1 sinyalinde GNSS-IR tekniği ile hesaplanan deniz seviyesi değişimi ve mareograf arasındaki doğrusal regresyon eğimi $0.80 \text{ m/m} \pm 0.01 \text{ m/m}$ iken R^2 parametresi %80 olarak hesaplanmıştır. MERS GPS L5 sinyalinde ise doğrusal regresyon eğimi $0.69 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ iken R^2 parametresi %62 şeklindedir. Eğim ve R^2 parametreleri yönünden GPS L1 sinyalinde daha iyi sonuç elde edilmiştir. Şekil 96'da MERS sabit GNSS istasyonunda Galileo gözlemleri için K-Ortalamlar Kümeleme algoritması kullanılarak GNSS-IR ve Erdemli mareograf deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği gösterilmiştir.



Şekil 96. K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasına göre MERS sabit GNSS istasyonu Galileo gözlemlerinden GNSS-IR ile tahmin edilen ve Erdemli mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği

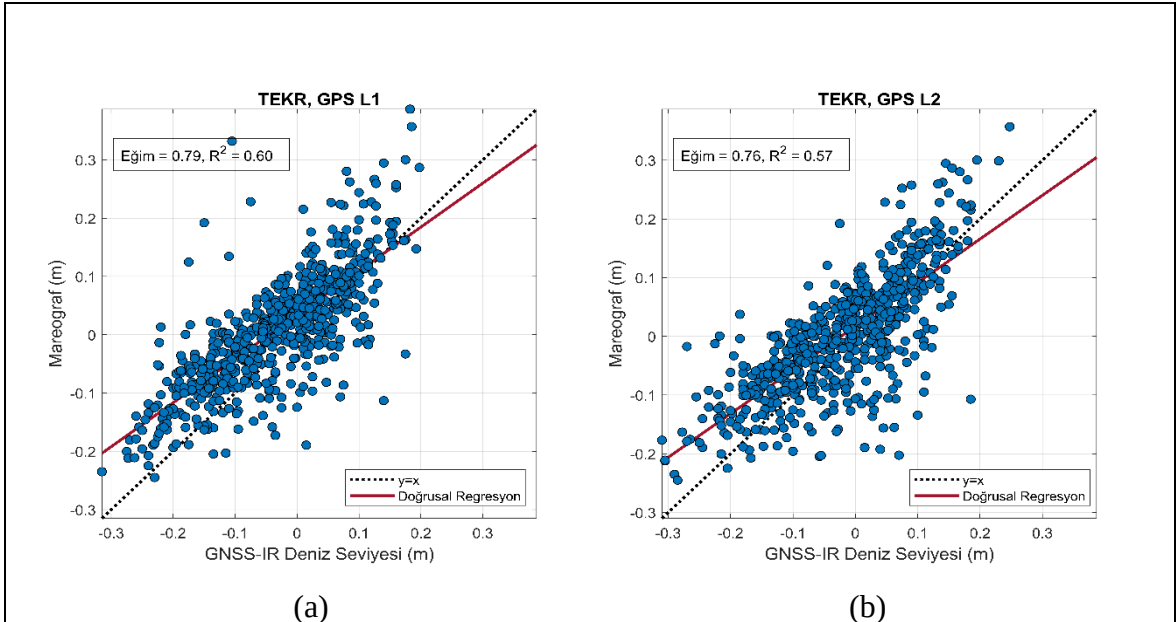
Burada; MERS Galileo L1 sinyalinde GNSS-IR tekniği ile hesaplanan deniz seviyesi değişimi ve mareograf arasındaki doğrusal regresyon eğimi $0.71 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ iken R^2 parametresi %72 olarak hesaplanmıştır. MERS Galileo L5 sinyalinde ise doğrusal regresyon eğimi $0.62 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ iken R^2 parametresi %57 bulunmuştur. Eğim ve R^2 parametreleri yönünden Galileo L1 sinyalinde daha iyi sonuç elde edilmiştir. Tablo 28’de ise hem GPS hem de Galileo gözlemleri için GNSS-IR ve mareograf arasında hesaplanan Pearson korelasyonu, KOH, eğim ve R^2 parametresi verilmiştir.

Tablo 28. MERS istasyonunda K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasına göre GPS ve Galileo gözlemleri için GNSS-IR ve mareograf karşılaştırması

	GPS		Galileo	
	L1	L5	L1	L5
Korelasyon	0.90	0.79	0.85	0.77
KOH (cm)	4.93	6.9	5.95	7.35
Eğim (m/m)	0.80 ± 0.01	0.69 ± 0.02	0.71 ± 0.02	0.62 ± 0.02
R^2	%80	%62	%72	%57

Tablo 28’de MERS GPS L1 sinyalinde GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi değişimi ve Erdemli mareograf kayıtları arasında Pearson korelasyonu 0.90 iken GPS L5 sinyalinde 0.79 olarak hesaplanmıştır. KOH büyüklüğüne bakıldığında, GPS L1 sinyalinde 4.93 cm olup GPS L5 sinyalinde 6.9 cm olarak elde edilmiştir. MERS istasyonu GPS gözlemleri kullanılarak hesaplanan deniz seviyesi değişiminde L1 sinyalinin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. MERS Galileo gözlemlerine gelindiğinde, L1 sinyalinde GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi değişimi ve Erdemli mareograf kayıtları arasında Pearson korelasyonu 0.85 iken L5 sinyalinde 0.77 olarak bulunmuştur. KOH büyüklüğü ise L1 sinyalinde 5.95 cm olup L5 sinyalinde 7.35 cm şeklindedir. Galileo gözlemleri kullanılarak belirlenen deniz seviyesi değişiminde L1 sinyalinde daha iyi sonuç elde edilmiştir. Buradan hareketle K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında MERS istasyonunda L1 sinyalinin hem GPS hem de Galileo da daha iyi olduğu görülmüştür. Ayrıca Galileo gözlemlerine nazaran GPS gözlemlerinin performansı bu yöntemde de daha yüksek bulunmuştur.

- TUSAGA-Aktif Ağı İstasyonu: TEKR sabit GNSS istasyonunda GPS L1 ve GPS L2 için K-Ortalamlar Kümeleme algoritması kullanılarak GNSS-IR ve Marmara Ereğlisi mareograf deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği Şekil 97’de gösterilmiştir.



Şekil 97. K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasına göre TEKR sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen ve Marmara Ereğlisi mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği

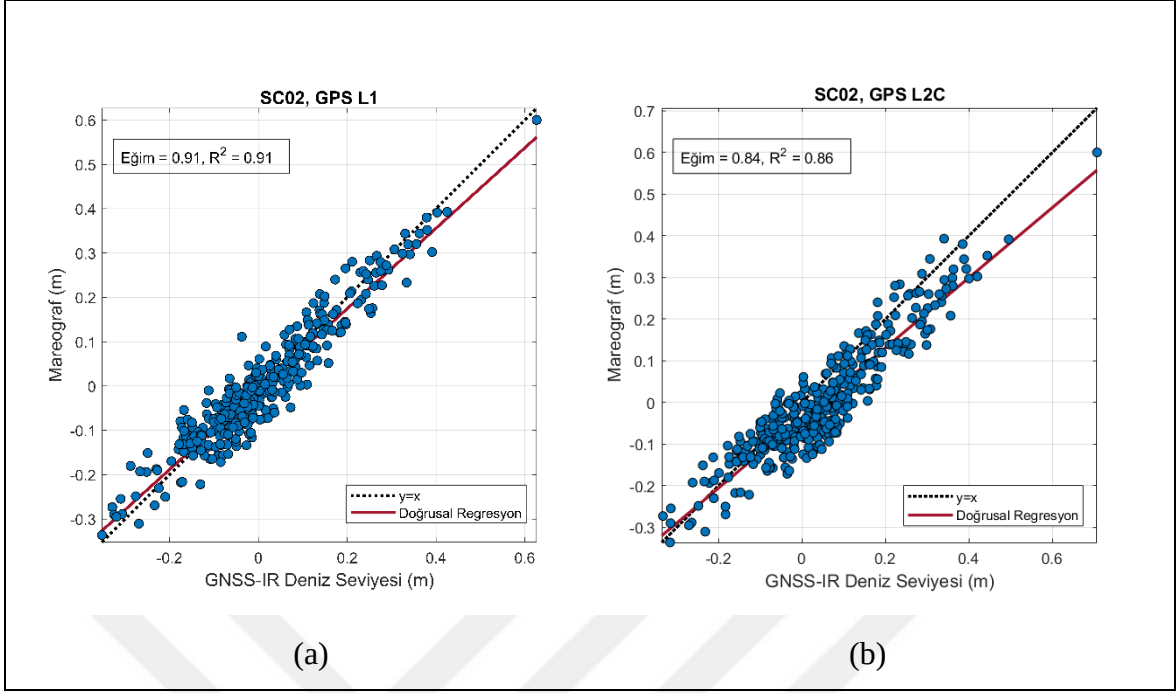
TEKR GPS L1 sinyalinde GNSS-IR tekniğine dayalı hesaplanan deniz seviyesi değişimi ve Marmara Ereğlisi mareograf kayıtları arasındaki doğrusal regresyon eğimi $0.79 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ iken R^2 parametresi %60 olarak hesaplanmıştır. GPS L2 sinyalinde ise doğrusal regresyon eğimi $0.76 \text{ m/m} \pm 0.03 \text{ m/m}$ iken R^2 parametresi %57 olarak bulunmuştur. Tablo 29’da GNSS-IR ve mareograf arasında hesaplanan Pearson korelasyonu, KOH, eğim ve R^2 parametresi verilmiştir.

Tablo 29. TEKR istasyonunda K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasına göre GNSS-IR ve mareograf karşılaştırması

	GPS-L1	GPS-L2
Korelasyon	0.77	0.75
KOH (cm)	6.46	6.58
Eğim (m/m)	0.79 ± 0.02	0.76 ± 0.03
R^2	%60	%57

Tablo 29’da TEKR GPS gözlemleri kullanılarak hesaplanan deniz seviyesi değişimi ve Marmara Ereğlisi mareograf kayıtları arasında Pearson korelasyonu L1 sinyali için 0.77 iken L2 sinyali için 0.75 olarak bulunmuştur. KOH büyüklüğü ise L1 sinyalinde 6.46 cm olup L2 sinyalinde 6.58 cm’dir. Tüm parametreler açısından her iki sinyal karşılaştırıldığında K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında GPS L1 sinyali ile daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

- ABD Friday Limanı SC02 İstasyonu: SC02 sabit GNSS istasyonunda GPS L1 ve GPS L2C sinyalleri için K-Ortalamlar Kümeleme algoritması kullanılarak GNSS-IR ve Friday Limanı mareograf deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği Şekil 98’de gösterilmiştir.



Şekil 98. K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasına göre SC02 sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen ve Friday Limanı mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği

SC02 sabit GNSS istasyonu GPS L1 sinyalinde doğrusal regresyon eğimi $0.91 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ iken GPS L2C sinyalinde $0.84 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ olarak hesaplanmıştır. R^2 parametresi ise, GPS L1 sinyalinde %91, GPS L2C sinyalinde %86 olarak elde edilmiştir. Tablo 30'da GNSS-IR ve mareograf arasında hesaplanan Pearson korelasyonu, KOH, eğim ve R^2 parametresi verilmiştir.

Tablo 30. SC02 istasyonunda K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasına göre GNSS-IR ve mareograf karşılaştırması

	GPS-L1	GPS-L2C
Korelasyon	0.95	0.93
KOH (cm)	4.19	5.19
Eğim (m/m)	0.91 ± 0.02	0.84 ± 0.02
R^2	%91	%86

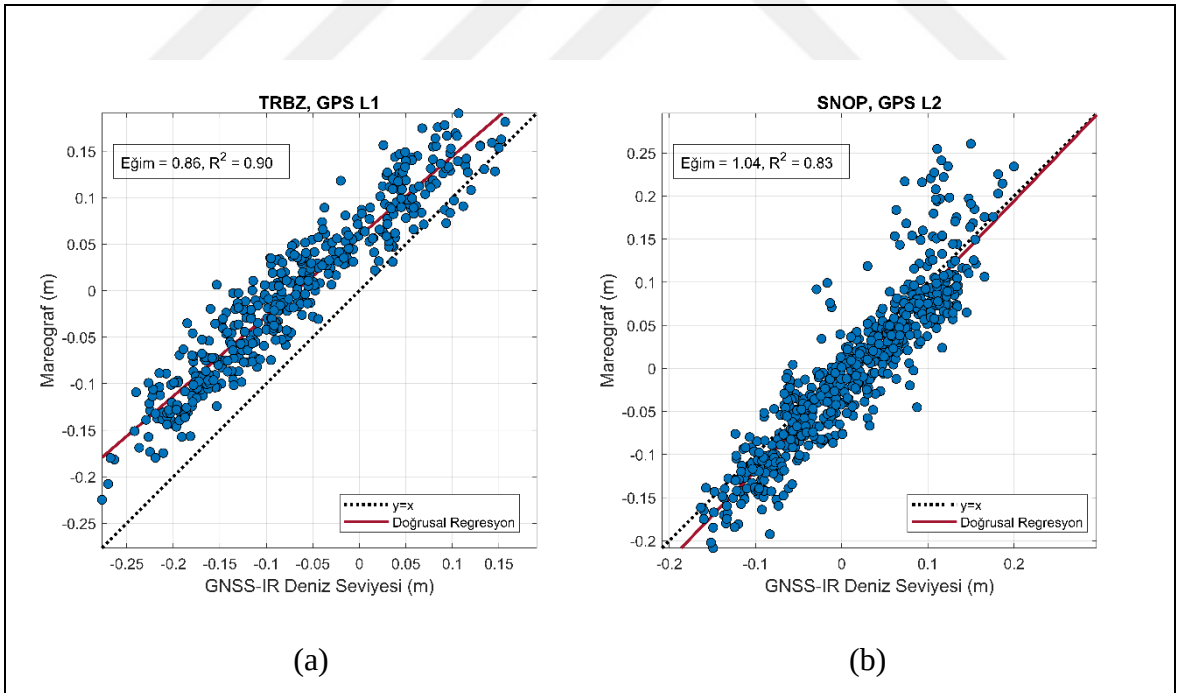
Tablo 30'da SC02 GPS gözlemleri kullanılarak hesaplanan deniz seviyesi değişimi ve Friday Limanı mareograf kayıtları arasında Pearson korelasyonu L1 sinyali için 0.95 iken

L2C sinyali için 0.93 şeklinde yüksek bir korelasyon elde edilmiştir. KOH büyüklüğü ise L1 sinyalinde 4.19 cm olup L2C sinyalinde 5.19 cm olarak hesaplanmıştır. Tüm parametreler açısından her iki sinyal karşılaştırıldığında, SC02 istasyonunda GPS L1 sinyali ile daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

3.2.3. LSP-MA Yöntemi Bulguları

Aşağıda sırasıyla TRBZ ve SNOP mareograf ortak yerleşke istasyonları, MERS IGS ağı istasyonu, TEKR TUSAGA-Aktif ağı istasyonu ve ABD Friday Limanı SC02 istasyonu LSP-MA yöntemi bulguları verilmiştir.

- Mareograf Ortak Yerleşkeli TUDES Ağ İstasyonları: TRBZ ve SNOP mareograf ortak yerleşkeli sabit GNSS istasyonlarında LSP-MA yöntemi kullanılarak GNSS-IR ve Trabzon ve Sinop mareograf deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği Şekil 99'da gösterilmiştir.



Şekil 99. LSP-MA yöntemine göre TRBZ ve SNOP sabit GNSS istasyonları GNSS-IR ile tahmin edilen ve mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği

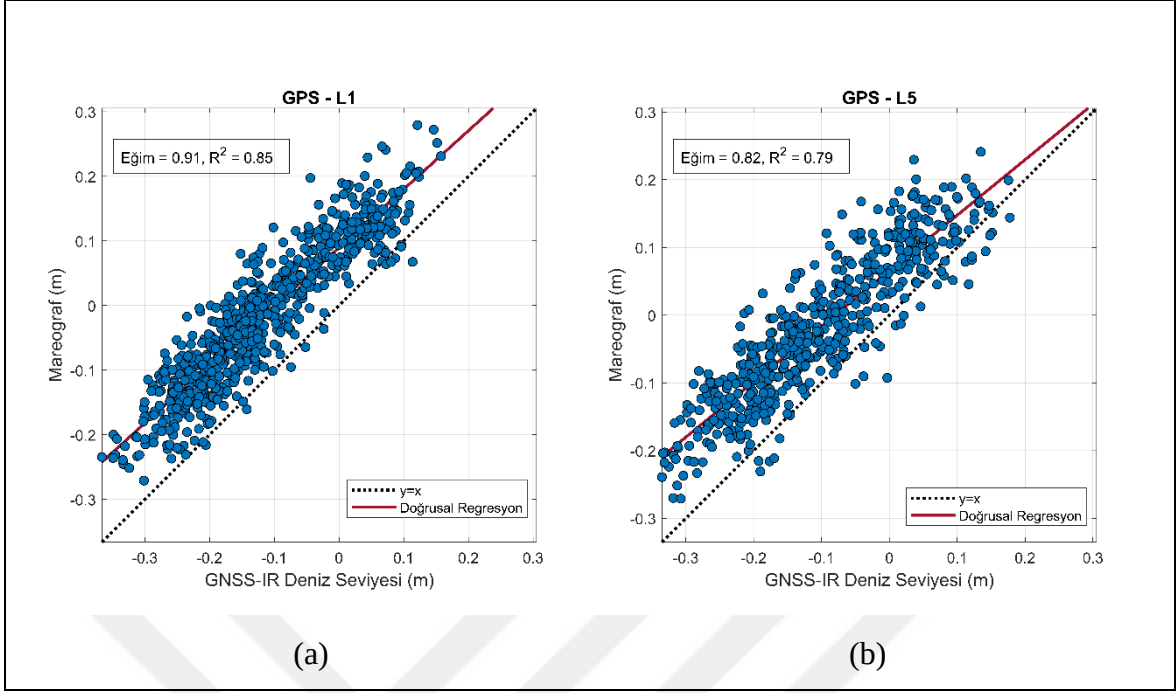
TRBZ istasyonunda doğrusal regresyon eğim değeri $0.86 \text{ m/m} \pm 0.01 \text{ m/m}$ olarak hesaplanmış olup R^2 katsayısı %90 seviyesinde yüksek şekilde elde edilmiştir. Diğer yandan SNOP istasyonunda doğrusal regresyon eğim değeri $1.04 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$, R^2 katsayısı ise %83 olarak hesaplanmıştır. Tablo 31’de ise GNSS-IR ve mareograf arasında hesaplanan Pearson korelasyonu, KOH, eğim ve R^2 parametresi verilmiştir.

Tablo 31. Mareograf ortak yerleşke istasyonlarında LSP-MA yöntemine göre GNSS-IR ve mareograf karşılaştırması

	TRBZ	SNOP
Korelasyon	0.95	0.91
KOH (cm)	2.78	3.66
Eğim (m/m)	0.86 ± 0.01	1.04 ± 0.02
R^2	%90	%83

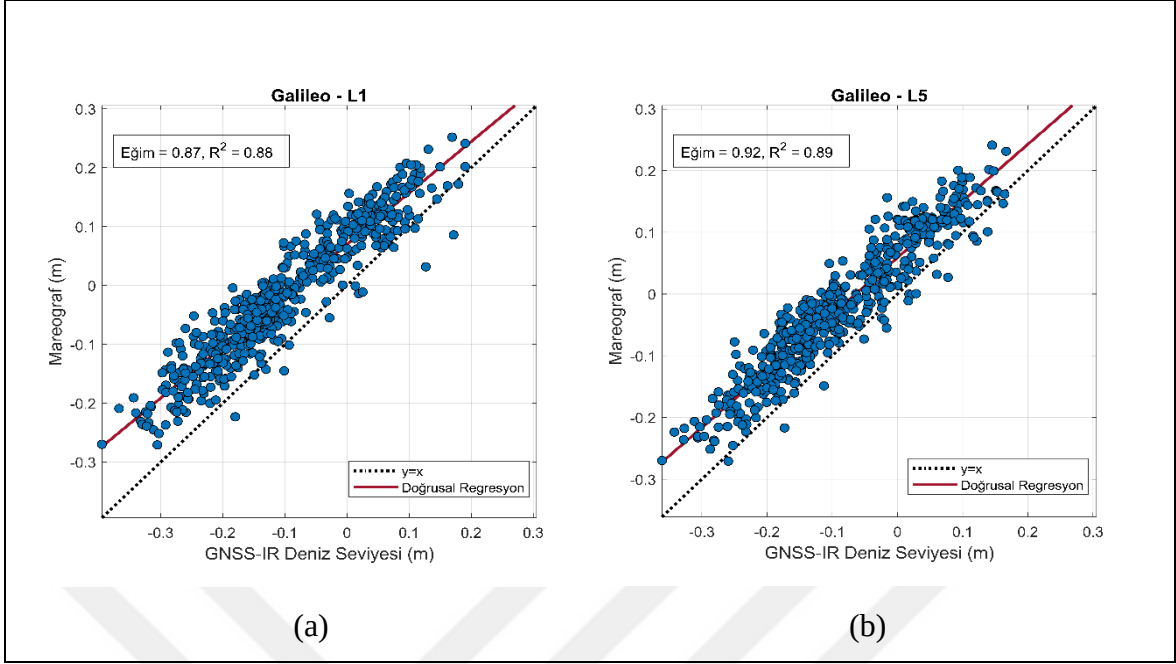
Tablo 31’de TRBZ sabit GNSS istasyonundan GNSS-IR tekniğine dayalı olarak belirlenen deniz seviyesi değişimi ve Trabzon mareograf kayıtları arasında Pearson korelasyonu 0.95 olup KOH büyüklüğü 2.78 cm olarak elde edilmiştir. SNOP istasyonunda ise GNSS-IR tekniğine dayalı olarak belirlenen deniz seviyesi değişimi ve Sinop mareograf kayıtları arasında Pearson korelasyonu 0.91 olup KOH büyüklüğü 3.66 cm olarak hesaplanmıştır.

- IGS Ağı İstasyonu: MERS sabit GNSS istasyonunda GPS L1 ve GPS L5 sinyalleri için LSP-MA yöntemi kullanılarak GNSS-IR ve Erdemli mareograf deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği Şekil 100’de gösterilmiştir.



Şekil 100. LSP-MA yöntemine göre MERS sabit GNSS istasyonu GPS gözlemlerinden GNSS-IR ile tahmin edilen ve Erdemli mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği

MERS GPS L1 sinyalinde GNSS-IR tekniği ile hesaplanan deniz seviyesi değişimi ve mareograf arasındaki doğrusal regresyon eğimi $0.91 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ iken R^2 parametresi %85 olarak hesaplanmıştır. MERS GPS L5 sinyalinde ise doğrusal regresyon eğimi $0.82 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ iken R^2 parametresi %79 şeklindedir. Eğim ve R^2 parametreleri yönünden GPS L1 sinyalinde daha iyi sonuç elde edilmiştir. Şekil 101’de MERS sabit GNSS istasyonunda Galileo gözlemleri için LSP-MA yöntemi kullanılarak GNSS-IR ve Erdemli mareograf deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği gösterilmiştir.



Şekil 101. LSP-MA yöntemine göre MERS sabit GNSS istasyonu Galileo gözlemlerinden GNSS-IR ile tahmin edilen ve Erdemli mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği

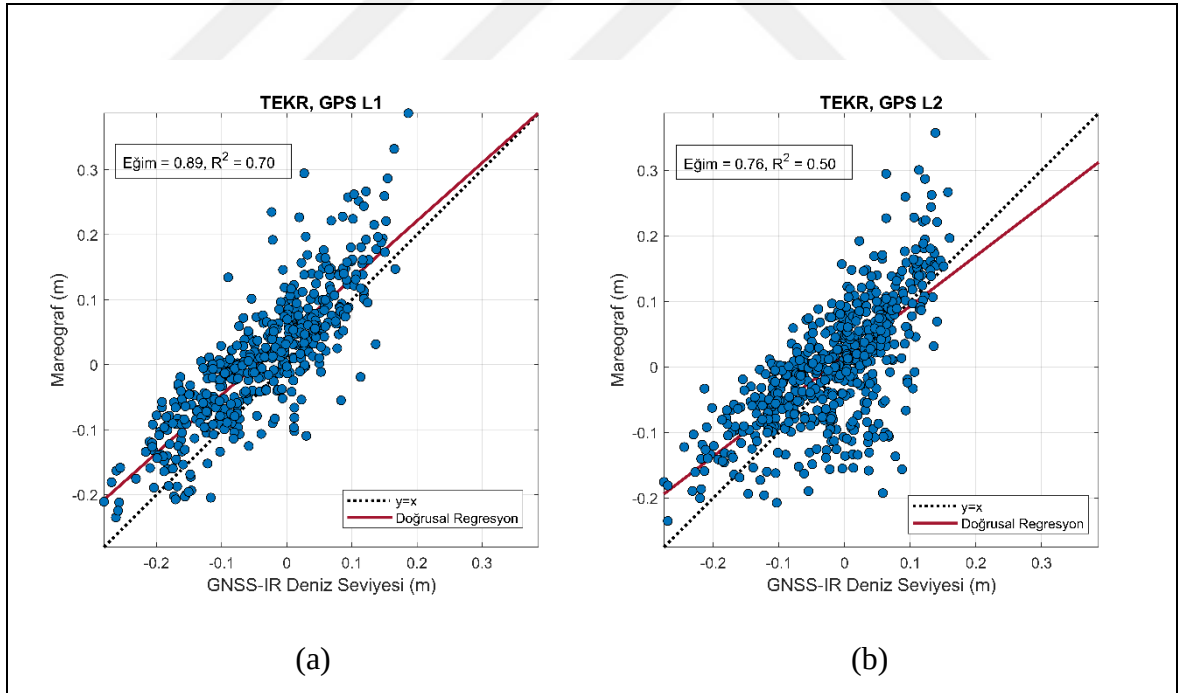
MERS Galileo L1 sinyalinde GNSS-IR tekniği ile hesaplanan deniz seviyesi değişimi ve mareograf arasındaki doğrusal regresyon eğimi $0.87 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ iken R^2 parametresi %88 olarak hesaplanmıştır. MERS Galileo L5 sinyalinde ise doğrusal regresyon eğimi $0.92 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ iken R^2 parametresi %89 bulunmuştur. Eğim ve R^2 parametreleri yönünden Galileo L5 sinyalinde daha iyi sonuç elde edilmiştir. Tablo 32’de ise hem GPS hem de Galileo gözlemleri için GNSS-IR ve mareograf arasında hesaplanan Pearson korelasyonu, KOH, eğim ve R^2 parametresi verilmiştir.

Tablo 32. MERS istasyonunda LSP-MA yöntemine göre GPS ve Galileo gözlemleri için GNSS-IR ve mareograf karşılaştırması

	GPS		Galileo	
	L1	L5	L1	L5
Korelasyon	0.92	0.89	0.94	0.94
KOH (cm)	4.24	4.89	3.82	3.54
Eğim (m/m)	0.91 ± 0.02	0.82 ± 0.02	0.87 ± 0.02	0.92 ± 0.02
R^2	%85	%79	%88	%89

Tablo 32’de MERS GPS L1 sinyalinde GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi değişimi ve Erdemli mareograf kayıtları arasında Pearson korelasyonu 0.92 iken GPS L5 sinyalinde 0.89 olarak hesaplanmıştır. KOH büyüklüğüne bakıldığında, GPS L1 sinyalinde 4.24 cm olup GPS L5 sinyalinde 4.89 cm olarak elde edilmiştir. MERS istasyonu GPS gözlemleri kullanılarak hesaplanan deniz seviyesi değişiminde L1 sinyalinin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. MERS Galileo gözlemlerine gelindiğinde, L1 sinyalinde GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi değişimi ve Erdemli mareograf kayıtları arasında Pearson korelasyonu 0.94 iken L5 sinyalinde de 0.94 olarak bulunmuştur. KOH büyüklüğü ise L1 sinyalinde 3.82 cm olup L5 sinyalinde 3.54 cm şeklindedir. Galileo gözlemleri kullanılarak belirlenen deniz seviyesi değişiminde L5 sinyalinde daha iyi sonuç elde edilmiştir.

- TUSAGA-Aktif Ağı İstasyonu: TEKR sabit GNSS istasyonunda GPS L1 ve GPS L2 sinyalleri için LSP-MA yöntemi kullanılarak GNSS-IR ve Marmara Ereğlisi mareograf deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği Şekil 102’de gösterilmiştir.



Şekil 102. LSP-MA yöntemine göre TEKR sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen ve Marmara Ereğlisi mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği

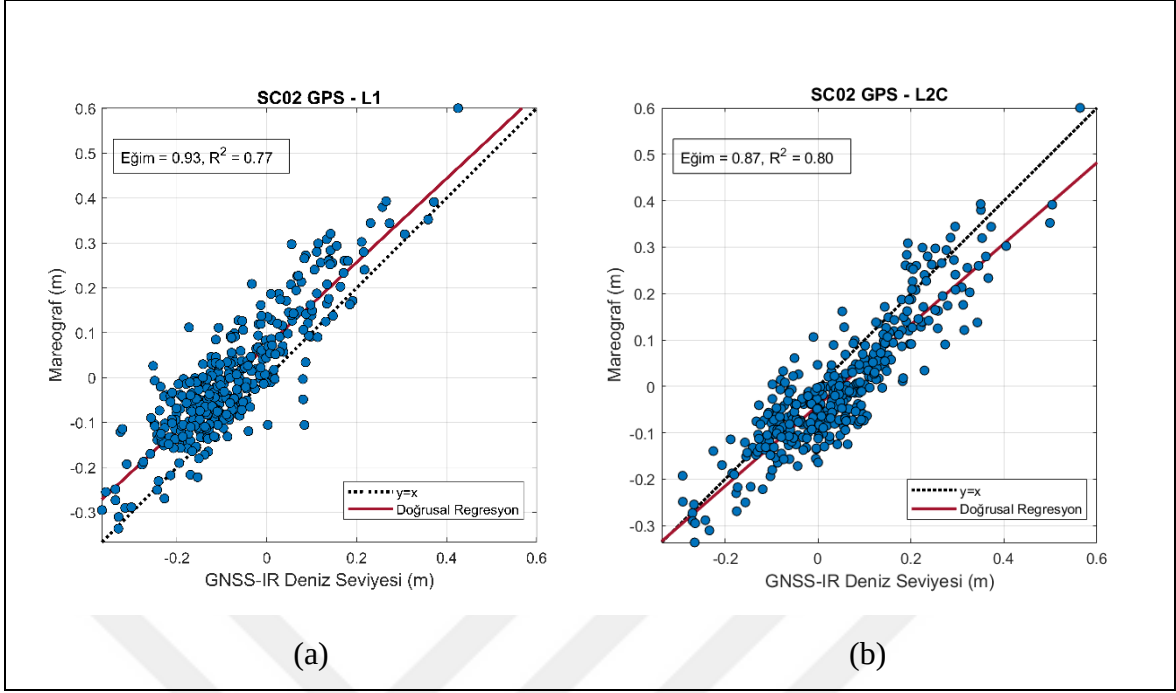
TEKR GPS L1 sinyalinde GNSS-IR tekniğine dayalı hesaplanan deniz seviyesi değişimi ve Marmara Ereğlisi mareograf kayıtları arasındaki doğrusal regresyon eğimi $0.89 \text{ m/m} \pm 0.03 \text{ m/m}$ iken R^2 parametresi %70 olarak hesaplanmıştır. GPS L2 sinyalinde ise doğrusal regresyon eğimi $0.76 \text{ m/m} \pm 0.03 \text{ m/m}$ iken R^2 parametresi %50 olarak bulunmuştur. Tablo 33'te GNSS-IR ve mareograf arasında hesaplanan Pearson korelasyonu, KOH, eğim ve R^2 parametresi verilmiştir.

Tablo 33. TEKR istasyonunda LSP-MA yöntemine göre GNSS-IR ve mareograf karşılaştırması

	GPS-L1	GPS-L2
Korelasyon	0.84	0.71
KOH (cm)	5.43	6.57
Eğim (m/m)	0.89 ± 0.03	0.76 ± 0.03
R^2	%70	%50

Tablo 33'te TEKR GPS gözlemleri kullanılarak hesaplanan deniz seviyesi değişimi ve Marmara Ereğlisi mareograf kayıtları arasında Pearson korelasyonu L1 sinyali için 0.84 iken L2 sinyali için 0.71 olarak bulunmuştur. KOH büyüklüğü ise L1 sinyalinde 5.43 cm olup L2 sinyalinde 6.57 cm'dir. Tüm parametreler açısından her iki sinyal karşılaştırıldığında LSP-MA yönteminde GPS L1 sinyali ile daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

- ABD Friday Limanı SC02 sabit GNSS İstasyonu: SC02 sabit GNSS istasyonunda GPS L1 ve GPS L2C sinyalleri için LSP-MA yöntemi kullanılarak GNSS-IR ve Friday Limanı mareograf deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği Şekil 103'te gösterilmiştir.



Şekil 103. LSP-MA yöntemine göre SC02 sabit GNSS istasyonunda GNSS-IR ile tahmin edilen ve Friday Limanı mareograf kayıtlarından alınan deniz seviyesi değişimi saçınım grafiği

SC02 sabit GNSS istasyonu GPS L1 sinyalinde doğrusal regresyon eğimi $0.93 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ iken GPS L2C sinyalinde $0.87 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ olarak hesaplanmıştır. R^2 parametresi ise, GPS L1 sinyalinde %77, GPS L2C sinyalinde %80 olarak elde edilmiştir. Tablo 34’te GNSS-IR ve mareograf arasında hesaplanan Pearson korelasyonu, KOH, eğim ve R^2 parametresi verilmiştir.

Tablo 34. SC02 istasyonunda LSP-MA yöntemine göre GNSS-IR ve mareograf karşılaştırması

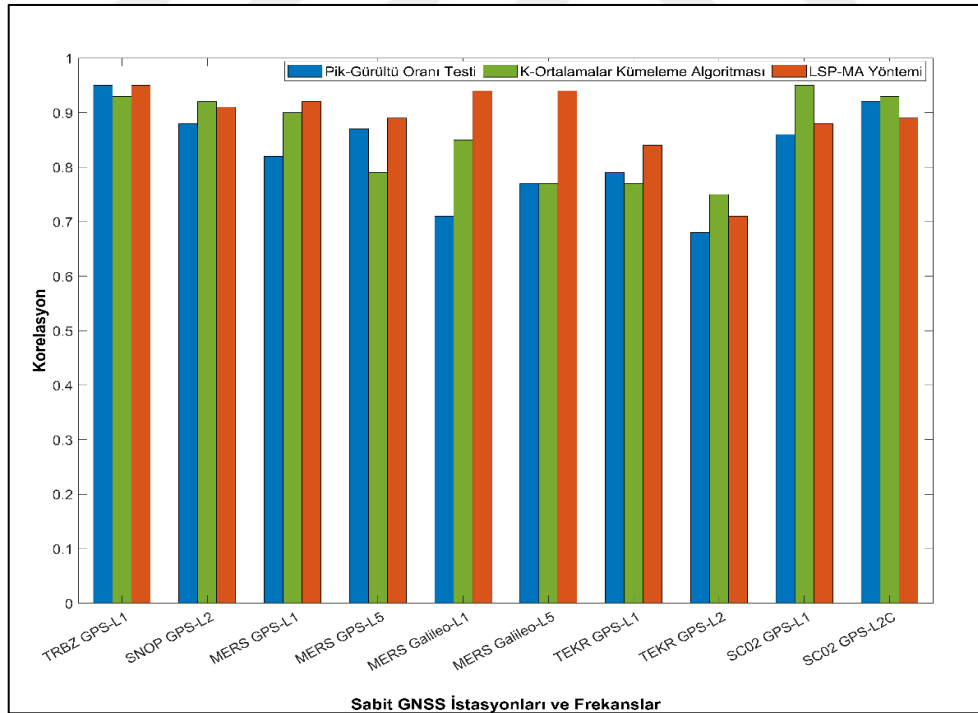
	GPS-L1	GPS-L2C
Korelasyon	0.88	0.89
KOH (cm)	6.6	6.14
Eğim (m/m)	0.93 ± 0.02	0.87 ± 0.02
R^2	%77	%80

Tablo 34’te SC02 GPS gözlemleri kullanılarak hesaplanan deniz seviyesi değişimi ve Friday Limanı mareograf kayıtları arasında Pearson korelasyonu L1 sinyali için 0.88 iken

L2C sinyali için 0.89 şeklinde yüksek bir korelasyon elde edilmiştir. KOH büyüklüğü ise L1 sinyalinde 6.6 cm olup L2C sinyalinde 6.14 cm olarak hesaplanmıştır. Tüm parametreler açısından her iki sinyal karşılaştırıldığında, SC02 istasyonunda GPS L2C sinyali ile daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

3.3. Kalite Değerlendirmesi Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde Pik-Gürültü Oranı testi, K-Ortalamlar Kümeleme algoritması ve LSP-MA yönteminden elde edilen sonuçların karşılaştırması yapılmıştır. Aşağıda birçok çalışmada sıklıkla kullanılan Pik-Gürültü Oranı testi referans alınarak bu tez çalışması ile ilk kez kullanılan LSP-MA yönteminin ve daha önce bu çalışmada yapılan yaklaşıma benzer şekilde bir GNSS-IR çalışmasında kullanımına rastlanılmayan K-Ortalamlar Kümeleme algoritması karşılaştırılarak tekniğin performansındaki iyileşme korelasyon, KOH, doğrusal regresyon eğimi ve R^2 açısından istasyonlar bazında irdelenmiştir.

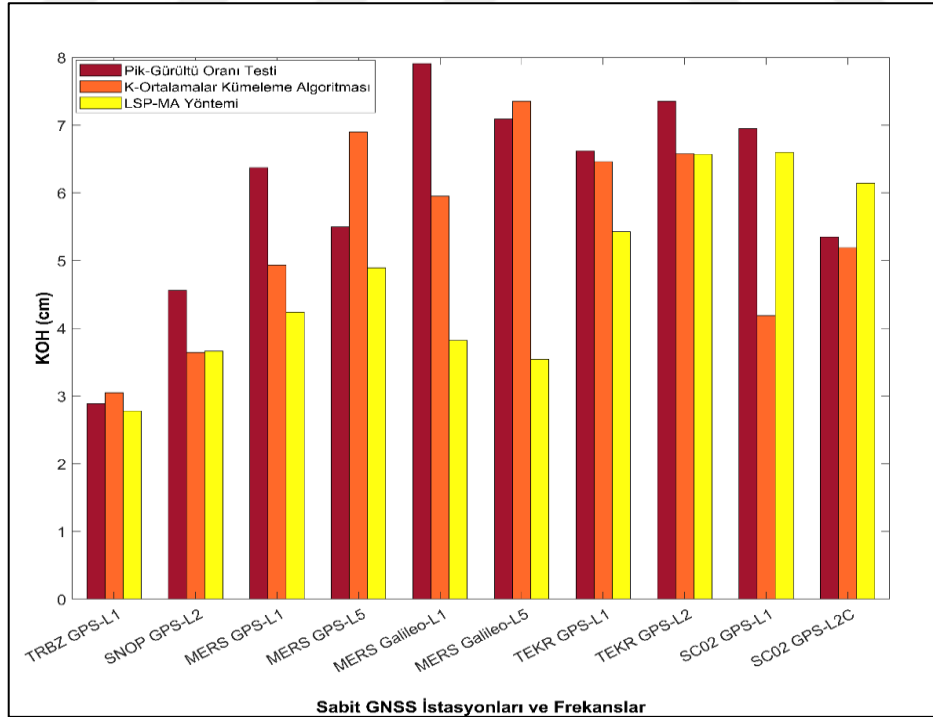


Şekil 104. Kalite değerlendirmesi yöntemlerine göre istasyonlar bazında korelasyon değerleri

Her bir kalite değerlendirmesi yöntemi ile GNSS-IR ve mareograf deniz seviyesi değişimi arasında hesaplanan Pearson korelasyon katsayıları şekil 104'te gösterilmiştir. Buna göre,

- TRBZ istasyonunda Pik-Gürültü Oranı testi ile 0.95 olan Pearson korelasyonu, K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında 0.93 seviyesine gerilemiş olup LSP-MA yönteminde tekrar 0.95 olarak elde edilmiştir.
- SNOP istasyonunda Pik-Gürültü Oranı testi ile 0.88 olarak hesaplanan Pearson korelasyonu diğer iki yöntemde sırasıyla 0.92 ve 0.91 olarak bulunmuş olup yaklaşık değerler elde edilmiştir.
- MERS istasyonu GPS L1 sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testi ile 0.82 olarak hesaplanan Pearson korelasyonu, diğer iki yöntemde gelişim göstererek K-Ortalamlar Kümeleme algoritması ile 0.90 seviyesine, LSP-MA yöntemiyle ise 0.92 seviyesine yükselmiştir.
- MERS GPS L5 sinyalinde ise Pik-Gürültü Oranı testi ile 0.87 olarak hesaplanan Pearson korelasyonu, K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında 0.79 seviyesine gerilerken, LSP-MA yönteminde 0.89 seviyesine yükselmiştir.
- MERS istasyonunda kullanılan iki farklı GPS sinyalinden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında en iyi sonucun GPS-L1 sinyalinde 0.92 Pearson korelasyonu ile LSP-MA yönteminde elde edildiği grlmştir.
- MERS Galileo L1 sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testi ile 0.71 olarak hesaplanan Pearson korelasyonu diğer iki yöntemde gelişim göstererek K-Ortalamlar Kümeleme algoritması ile 0.85 seviyesine, LSP-MA yöntemiyle ise 0.94 seviyesine yükselmiştir.
- MERS Galileo L5 sinyalinde ise Pik-Gürültü Oranı testi ile 0.77 olarak hesaplanan Pearson korelasyonu, K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında da 0.77 olup LSP-MA yönteminde 0.94 seviyesine yükselmiştir.
- MERS istasyonunda kullanılan Galileo L1 ve L5 sinyallerinde performanslarına bakıldığında, her iki frekansta en iyi sonuç 0.94 Pearson korelasyonu ile LSP-MA yönteminde grlmştir.
- TEKR istasyonu GPS L1 sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testi ile 0.79 olarak hesaplanan Pearson korelasyonu, K-Ortalamlar Kümeleme algoritması ile 0.77 seviyesine düşerken LSP-MA yöntemi ile 0.84 seviyesine yükselmiştir.

- TEKR istasyonu GPS L2 sinyalinde ise Pik-Gürültü Oranı testi ile 0.68 olarak hesaplanan Pearson korelasyonu, K-Ortalamlar Kümeleme algoritması ile 0.75, LSP-MA yöntemi ile ise 0.71 seviyesine yükselmiştir.
- TEKR istasyonu GPS L1 ve L2 sinyallerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında en iyi sonucun GPS-L1 sinyalinde 0.84 Pearson korelasyonu ile LSP-MA yönteminde elde edildiği görülmüştür.
- SC02 istasyonunda GPS L1 sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testi ile 0.86 olarak hesaplanan Pearson korelasyonu, K-Ortalamlar Kümeleme algoritması ile 0.95 seviyesine, LSP-MA yöntemi ile 0.88 seviyesine yükselmiştir.
- SC02 istasyonunda GPS L2C sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testi ile 0.92 olarak hesaplanan Pearson korelasyonu, K-Ortalamlar Kümeleme algoritması ile 0.93 seviyesine yükselmiş olup LSP-MA yöntemi ile 0.89 seviyesine düşmüştür.
- SC02 istasyonu GPS L1 ve L2C sinyallerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında en iyi sonucun GPS L1 sinyalinde 0.95 Pearson korelasyonu ile K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında olduğu görülmüştür.

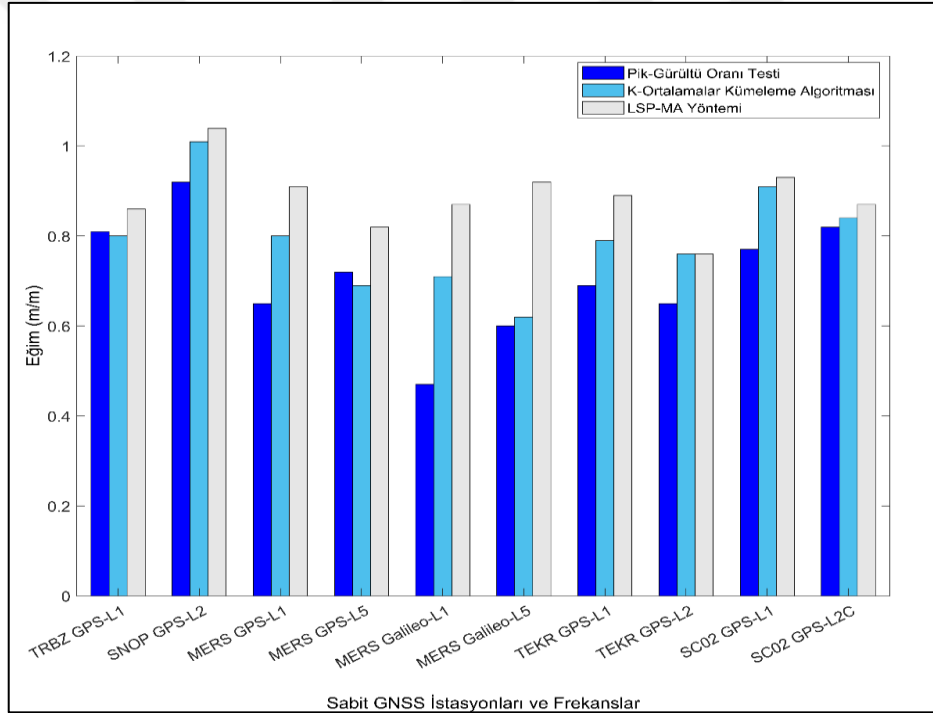


Şekil 105. Kalite değerlendirmesi yöntemlerine göre istasyonlar bazında karesel ortalama hata değerleri

Şekil 105'te her bir kalite değerlendirmesi yönteminde istasyonlar için hesaplanan KOH büyüklükleri gösterilmiştir. Buna göre,

- TRBZ istasyonunda Pik-Gürültü Oranı testinin kullanıldığı durumda KOH 2.89 cm iken, K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında 3.05 cm, LSP-MA yönteminde ise 2.78 cm'ye düşmüştür.
- SNOP istasyonunda Pik-Gürültü Oranı testinin kullanıldığı durumda KOH 4.56 cm iken diğer iki yöntemde düşüş göstererek K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında 3.64 cm, LSP-MA yönteminde ise 3.66 cm olmuştur.
- MERS istasyonu GPS L1 sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testi kullanıldığında KOH 6.37 cm iken yine diğer iki yöntemde düşüş göstererek K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında 4.93 cm, LSP-MA yönteminde ise 4.24 cm olmuştur.
- MERS istasyonu GPS L5 sinyalinde ise Pik-Gürültü Oranı testi kullanıldığında KOH 5.5 cm iken K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında 6.95 cm'ye yükselirken LSP-MA yönteminde ise 4.89 cm değerine düşmüştür.
- MERS istasyonu GPS L1 ve L5 sinyalleri karşılaştırıldığında en iyi KOH 4.24 cm ile GPS L1 sinyalinde LSP-MA yöntemi ile elde edilmiştir.
- MERS istasyonu Galileo L1 sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testi kullanıldığında KOH 7.91 cm iken yine diğer iki yöntemde düşüş göstererek K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında 5.95 cm, LSP-MA yönteminde ise 3.82 cm olmuştur.
- MERS istasyonu Galileo L5 sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testi kullanıldığında KOH 7.09 cm iken K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında 7.35 cm'ye yükselmiş olup LSP-MA yönteminde ise 3.54 cm'ye düşmüştür.
- MERS istasyonu Galileo L1 ve L5 sinyalleri karşılaştırıldığında en iyi KOH 3.54 cm ile Galileo L5 sinyalinde LSP-MA yöntemi ile elde edilmiştir.
- TEKR istasyonu GPS L1 sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testi kullanıldığında KOH 6.62 cm iken yine diğer iki yöntemde düşüş göstererek K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında 6.46 cm, LSP-MA yönteminde ise 5.43 cm olmuştur. Her ne kadar KOH büyüklüğünde düşüş sağlansa da 5 cm'nin altına düşülememiştir.
- TEKR istasyonu GPS L2 sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testi kullanıldığında KOH 7.35 cm iken yine diğer iki yöntemde düşüş göstererek K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında 6.58 cm, LSP-MA yönteminde ise 6.57 cm olmuştur. Burada da KOH büyüklüğünde düşüş yaşanmış olsa da 5 cm'nin altına düşülememiştir.

- TEKR istasyonu GPS L1 ve L2 sinyalleri karşılaştırıldığında en iyi KOH 5.43 cm ile GPS L1 sinyalinde LSP-MA yöntemi ile elde edilmiştir.
- SC02 istasyonu GPS L1 sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testi kullanıldığında KOH 6.95 cm iken yine diğer iki yöntemde düşüş göstererek K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında 4.19 cm, LSP-MA yönteminde 6.6 cm olmuştur.
- SC02 istasyonu GPS L2C sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testi kullanıldığında KOH 5.35 cm K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında 5.19 cm, LSP-MA yönteminde 6.14 cm olarak bulunmuştur.
- SC02 istasyonu GPS L1 ve L2C sinyalleri karşılaştırıldığında en iyi KOH 4.19 cm ile GPS L1 sinyalinde K-Ortalamlar Kümeleme algoritması ile elde edilmiştir.



Şekil 106. Kalite değerlendirmesi yöntemlerine göre istasyonlar bazında eğim değerleri

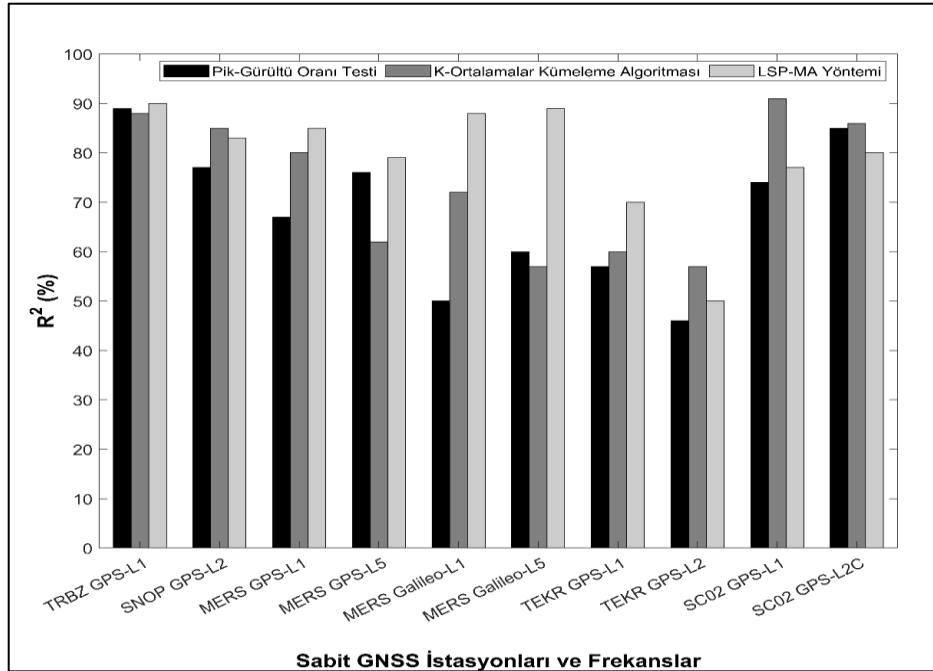
Şekil 106’da her bir kalite değerlendirmesi yönteminde istasyonlar için hesaplanan eğim değerleri gösterilmiştir. Buna göre,

- TRBZ istasyonunda Pik-Gürültü Oranı testinin kullanıldığı durumda doğrusal regresyon eğimi $0.81 \text{ m/m} \pm 0.01 \text{ m/m}$ olup K-Ortalamlar Kümeleme algoritması

ile $0.80 \text{ m/m} \pm 0.03 \text{ m/m}$ değerine düşmüş, LSP-MA yönteminde ise $0.86 \text{ m/m} \pm 0.01 \text{ m/m}$ değerine yükselmiştir.

- SNOP istasyonunda Pik-Gürültü Oranı testi ile doğrusal regresyon eğimi $0.92 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ olup diğer iki yöntemde yükselerek K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında $1.01 \text{ m/m} \pm 0.01 \text{ m/m}$, LSP-MA yönteminde ise $1.04 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ olmuştur.
- MERS istasyonu GPS L1 sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testi kullanıldığında doğrusal regresyon eğimi $0.65 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ iken diğer iki yöntemde yükselerek K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında $0.80 \text{ m/m} \pm 0.01 \text{ m/m}$, LSP-MA yönteminde ise $0.91 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ olmuştur.
- MERS istasyonu GPS L5 sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testi kullanıldığında doğrusal regresyon eğimi $0.72 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ olup K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında $0.69 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ değerine düşmüş ve LSP-MA yönteminde ise $0.82 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ değerine yükselmiştir.
- MERS istasyonu GPS L1 ve L5 sinyalleri karşılaştırıldığında en iyi doğrusal regresyon eğim değeri $0.91 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ ile GPS L1 sinyalinde LSP-MA yöntemi ile elde edilmiştir.
- MERS istasyonu Galileo L1 sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testi kullanıldığında doğrusal regresyon eğimi $0.50 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ iken diğer iki yöntemde yükselerek K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında $0.80 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$, LSP-MA yönteminde ise $0.85 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ olmuştur.
- MERS istasyonu Galileo L5 sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testi kullanıldığında doğrusal regresyon eğimi $0.60 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ olup K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında $0.57 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ değerine düşmüş ve LSP-MA yönteminde ise $0.89 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ değerine yükselmiştir.
- MERS istasyonu Galileo L1 ve L5 sinyalleri karşılaştırıldığında en iyi doğrusal regresyon eğim değeri $0.89 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ ile Galileo L5 sinyalinde LSP-MA yöntemi ile elde edilmiştir.
- TEKR istasyonu GPS L1 sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testi kullanıldığında doğrusal regresyon eğimi $0.69 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ iken diğer iki yöntemde yükselerek K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında $0.79 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$, LSP-MA yönteminde ise $0.89 \text{ m/m} \pm 0.03 \text{ m/m}$ olmuştur.

- TEKR istasyonu GPS L2 sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testi kullanıldığında doğrusal regresyon eğimi $0.65 \text{ m/m} \pm 0.03 \text{ m/m}$ olup K-Ortalamlar Kümeleme algoritması ve LSP-MA yönteminde $0.76 \text{ m/m} \pm 0.03 \text{ m/m}$ değerine yükselmiştir.
- TEKR istasyonu GPS L1 ve L2 sinyalleri karşılaştırıldığında en iyi doğrusal regresyon eğimi $0.89 \text{ m/m} \pm 0.03 \text{ m/m}$ ile GPS L1 sinyalinde LSP-MA yöntemi ile elde edilmiştir.
- SC02 istasyonu GPS L1 sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testi kullanıldığında doğrusal regresyon eğimi $0.77 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ iken diğer iki yöntemde yükselerek K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında $0.91 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$, LSP-MA yönteminde ise $0.93 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ olarak bulunmuştur.
- SC02 istasyonu GPS L2C sinyalinde ise Pik-Gürültü Oranı testi kullanıldığında doğrusal regresyon eğimi $0.82 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ iken diğer iki yöntemde yükselerek K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında $0.84 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$, LSP-MA yönteminde ise $0.87 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ olarak bulunmuştur.
- SC02 istasyonu GPS L1 ve L2C sinyalleri karşılaştırıldığında ise en iyi doğrusal regresyon eğim değeri $0.89 \text{ m/m} \pm 0.02 \text{ m/m}$ ile GPS L1 sinyalinde LSP-MA yöntemi ile elde edilmiştir.



Şekil 107. Kalite değerlendirme yöntemlerine göre istasyonlar bazında R^2 katsayısı

Şekil 107’de her bir kalite değerlendirmesi yönteminde istasyonlar için hesaplanan R^2 katsayıları verilmiştir. Buna göre,

- TRBZ istasyonunda Pik-Gürültü Oranı testinin kullanıldığı durumda R^2 katsayısı %89 olup K-Ortalamlar Kümeleme algoritması ile %88 değerine düşmüş, LSP-MA yönteminde ise %90 seviyesine yükselmiştir.
- SNOP istasyonunda Pik-Gürültü Oranı testinin kullanıldığı durumda R^2 katsayısı %77 olup diğer iki yöntemde yükselerek K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında %85, LSP-MA yönteminde ise %83 olarak hesaplanmıştır.
- MERS istasyonu GPS L1 sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testinin kullanıldığı durumda R^2 katsayısı %67 olup diğer iki yöntemde yükselerek K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında %80, LSP-MA yönteminde ise %85 olarak hesaplanmıştır.
- MERS istasyonu GPS L5 sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testinin kullanıldığı durumda R^2 katsayısı %76 olup K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında %62 seviyesine düşmüştür, LSP-MA yönteminde ise %79 seviyesine yükselmiştir.
- MERS istasyonu GPS L1 ve L5 sinyalleri karşılaştırıldığında R^2 katsayısı %85 değeri ile GPS L1 sinyalinde LSP-MA yöntemi ile elde edilmiştir.
- MERS istasyonu Galileo L1 sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testinin kullanıldığı durumda R^2 katsayısı %50 olup diğer iki yöntemde yükselerek K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında %72, LSP-MA yönteminde ise %88 olarak hesaplanmıştır.
- MERS istasyonu Galileo L5 sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testinin kullanıldığı durumda R^2 katsayısı %60 olup K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında %57 seviyesine düşmüş, LSP-MA yönteminde ise %89 seviyesine yükselmiştir.
- MERS istasyonu Galileo L1 ve L5 sinyalleri karşılaştırıldığında R^2 katsayısı %85 değeri ile Galileo L5 sinyalinde LSP-MA yöntemi ile elde edilmiştir.
- TEKR istasyonu GPS L1 sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testinin kullanıldığı durumda R^2 katsayısı %57 olup diğer iki yöntemde yükselerek K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında %60, LSP-MA yönteminde ise %70 olarak hesaplanmıştır.
- TEKR istasyonu GPS L2 sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testinin kullanıldığı durumda R^2 katsayısı %46 olup diğer iki yöntemde yükselerek K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında %57, LSP-MA yönteminde ise %50 olarak hesaplanmıştır.
- TEKR istasyonu GPS L1 ve L2 sinyalleri karşılaştırıldığında R^2 katsayısı %70 değeri ile GPS L1 sinyalinde LSP-MA yöntemi ile elde edilmiştir.

- SC02 istasyonu GPS L1 sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testinin kullanıldığı durumda R^2 katsayısı %74 olup diğer iki yöntemde yükselerek K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında %91, LSP-MA yönteminde ise %77 olarak hesaplanmıştır.
- SC02 istasyonu GPS L2C sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testinin kullanıldığı durumda R^2 katsayısı %85 olup K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında %86 seviyesine ulaşmıştır, LSP-MA yönteminde ise %80 seviyesine düşmüştür.
- SC02 istasyonu GPS L1 ve L2C sinyalleri karşılaştırıldığında R^2 katsayısı %91 değeri ile GPS L1 sinyalinde K-Ortalamlar Kümeleme algoritması ile elde edilmiştir.

Tablo 35. Kalite değerlendirmesi yöntemleri sonuçları

İstasyon	Parametre	Pik-Gürültü Oranı Testi	K-Ortalamlar Kümeleme Algoritması	LSP-MA Yöntemi
TRBZ GPS L1	Korelasyon	0.95	0.93	<u>0.95</u>
	KOH(cm)	2.89	3.05	<u>2.78</u>
	Eğim(m/m)	0.81±0.01	0.80±0.03	0.86±0.01
	R^2	%89	%88	%90
SNOP GPS L2	Korelasyon	0.88	<u>0.92</u>	0.91
	KOH(cm)	4.56	<u>3.64</u>	3.66
	Eğim(m/m)	0.92±0.02	1.01±0.01	1.04±0.02
	R^2	%77	%85	%83
MERS GPS L1	Korelasyon	0.82	0.90	<u>0.92</u>
	KOH(cm)	6.37	4.93	<u>4.24</u>
	Eğim(m/m)	0.65±0.02	0.80±0.01	0.91±0.02
	R^2	%67	%80	%85
MERS GPS L5	Korelasyon	0.87	0.79	<u>0.89</u>
	KOH(cm)	5.5	6.9	<u>4.89</u>
	Eğim(m/m)	0.72±0.02	0.69±0.02	0.82±0.02
	R^2	%76	%62	%79

Tablo 35'in devamı

MERS	Korelasyon	0.71	0.85	<u>0.94</u>
Galileo	KOH(cm)	7.09	5.95	<u>3.82</u>
L1	Eğim(m/m)	0.47±0.02	0.71±0.02	0.87±0.02
	R ²	%50	%72	%88
MERS	Korelasyon	0.77	0.77	<u>0.94</u>
Galileo	KOH(cm)	7.09	7.35	<u>3.54</u>
L5	Eğim(m/m)	0.60±0.02	0.62±0.02	0.92±0.02
	R ²	%60	%57	%89
TEKR	Korelasyon	0.79	0.77	<u>0.84</u>
GPS	KOH(cm)	6.62	6.46	<u>5.43</u>
L1	Eğim(m/m)	0.69±0.02	0.79±0.02	0.89±0.03
	R ²	%57	%60	%70
TEKR	Korelasyon	0.68	<u>0.75</u>	0.71
GPS	KOH(cm)	7.35	6.58	<u>6.57</u>
L2	Eğim(m/m)	0.65±0.03	0.76±0.03	0.76±0.03
	R ²	%46	%57	%50
SC02	Korelasyon	0.86	<u>0.95</u>	0.88
GPS	KOH(cm)	6.95	<u>4.19</u>	6.6
L1	Eğim(m/m)	0.77±0.02	0.91±0.02	0.93±0.02
	R ²	%74	%91	%77
SC02	Korelasyon	0.92	<u>0.93</u>	0.89
GPS	KOH(cm)	5.35	<u>5.19</u>	6.14
L2C	Eğim(m/m)	0.82±0.02	0.84±0.02	0.87±0.02
	R ²	%85	%86	%80

Tablo 35'te her bir istasyon tüm kalite değerlendirmesi yöntemlerinden hesaplanan korelasyon, KOH, doğrusal regresyon eğimi ve R² katsayısı verilmiştir. Buradan hareketle her bir istasyon için kullanılan yöntemlerin sonuçlarının karşılaştırılması sonucunda GNSS-IR tekniği ile elde edilen deniz seviyesi değişimi kestirimindeki iyileşme aşağıda maddeler

halinde açıklanmıştır. GNSS-IR ve mareograf deniz seviyesi değişimi arasındaki korelasyon ve KOH değerlerine bakıldığında,

- TRBZ istasyonunda en yüksek korelasyon ve en düşük KOH değeri LSP-MA yönteminde,
- SNOP istasyonunda en yüksek korelasyon ve en düşük KOH değeri K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında,
- MERS istasyonu GPS L1 ve L5 sinyallerinde ve Galileo L1 ve L5 sinyallerinde en yüksek korelasyon ve en düşük KOH değeri LSP-MA yönteminde,
- TEKR istasyonu GPS L1 sinyalinde en yüksek korelasyon ve en düşük KOH değeri LSP-MA yöntemi ile, GPS L2 sinyalinde ise en yüksek korelasyon K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında, en düşük KOH değeri ise LSP-MA yönteminde,
- SC02 istasyonunda GPS L1 ve L2C sinyallerinde en yüksek korelasyon ve en düşük KOH değeri K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında

bulunmuştur. Çalışmada kullanılan GNSS sistemleri ve çoklu-sinyallerin yöntemlerle ilişkisine bakıldığında,

- MERS istasyonuna uygulanan Pik-Gürültü Oranı testinde GPS ve Galileo sistemlerinin ikisinde de L5 sinyali daha iyi sonuç vermiştir. Diğer yandan K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında L1 sinyali her iki sistemde daha iyi sonuç vermiştir. LSP-MA yönteminde GPS sisteminde L1 sinyalinden, Galileo sisteminde L5 sinyalinden daha iyi sonuç alınmıştır.
- TEKR istasyonunda uygulanan üç kalite değerlendirmesi yönteminde de GPS L1 sinyalinden iyi sonuç alınmıştır.
- SC02 istasyonunda Pik-Gürültü Oranı testi ve LSP-MA yönteminde GPS L2C sinyalinden, K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında GPS L1 sinyalinden daha iyi sonuç alınmıştır.
- TRBZ ve SNOP istasyonlarından tek bir sinyalle analiz yapıldığından bu karşılaştırma yapılmamıştır.
- Bu sonuçlardan hareketle, tez çalışmasında kullanılan istasyonlar ve analiz yöntemlerinde temel sinyallerin yanında yeni nesil L2C ve L5 sinyallerinin de GNSS-IR ile deniz seviyesi değişimi belirlenmesinde iyi performans sergilediği görülmüştür.

Diğer yandan uluslararası literatüre bakıldığında SC02 istasyonunun GNSS-IR ile deniz seviyesi değişimi belirleme performansı geliştirilmek istenen bir istasyon olduğu

görülmektedir. Tablo 36’da SC02 istasyonunda GNSS-IR tekniğinin deniz seviyesi değişimi belirleme performansını iyileştirmeye yönelik literatürde uygulanan farklı yöntemler ve elde edilen sonuçların bir kısmı sunulmuştur.

Tablo 36. SC02 istasyonunda uygulanan yöntemler ve sonuçları

Referans	Yöntem	Sinyal	Periyot	Korelasyon	KOH (cm)
Larson vd. (2013)	Pik-Gürültü Oranı testi	GPS L1	5 Temmuz-23 Ekim 2011	0.98	~10
Löfgren vd. (2014)	EAM (Geliştirilmiş Analiz Metodu)	GPS L1	1 Ocak- 31 Aralık 2012	0.99	12
Larson vd. (2017)	Gelgit etkisi ve troposferik gecikme düzeltmesi	GPS L1	10 yıllık deniz seviyesi	-	12
			10 yıllık (2006-2016) günlük ortalama deniz seviyesi		<u>2.1</u>
Wang vd. (2018)	Dalgacık ayrışımı sonrası LSP ve Pik-Gürültü Oranı testi	GPS L1	22 Temmuz-6 Ağustos 2011	0.98	10.05
S. Zhang vd., (2019)	SNR serilerine Deneyisel Mod Ayrıştırma uygulanması	GPS L1	1 Ocak-7 Ocak 2013	-	12.59
Wang vd., (2019)	Dalgacık Dönüşümü	GPS L1	22 Temmuz-6 Ağustos 2011	0.96	15.21
Purnell vd. (2020)	Ters modelleme	GPS L1	1 Ocak- 31 Aralık 2015	-	<u>4.2</u>

Tablo 36'nın devamı

Bu çalışma	Pik-Gürültü Oranı testi	GPS L1	1 Ocak- 31 Aralık 2021	0.86	6.95
	K-Ortalamalar Kümeleme Algoritması			0.95	4.19
	LSP-MA			0.88	6.6
Bu Çalışma	Pik-Gürültü Oranı testi	GPS L2C	1 Ocak- 31 Aralık 2021	0.92	5.35
	K-Ortalamalar Kümeleme Algoritması			0.93	5.19
	LSP-MA			0.89	6.14

Larson vd. (2013), SC02 istasyonu GPS L1 verilerinden deniz seviyesi değişimi elde edilmesinde uygulamış olduğu Pik-Gürültü Oranı testi ile KOH büyüklüğünü yaklaşık 10 cm olarak elde etmiştir. Aynı istasyonda Löfgren vd., (2014), 2012 yılı SNR verilerini kullanarak, her bir uydu yayında statik bir deniz seviyesi varsayımı ile standart analiz yöntemi ve her uydu yayında zamana bağlı deniz seviyesi varsayımına dayanan genişletilmiş analiz yöntemi adında iki yöntem uygulamıştır. Standart analiz yöntemi ile KOH değerini 12 cm, genişletilmiş analiz yöntemi ile ise 9.7 cm olarak bulmuştur. Wang vd., (2018), dalgacık ayrışımı ile SNR verilerindeki gürültünün azaltılması sonrasında LSP yönteminin uygulanması ile SC02 istasyonunda deniz seviyesi değişimi belirleyerek hem LSP hem de önerilen yöntemin performansını karşılaştırarak değerlendirmede bulunmuştur. Çalışmada 2011 yılı DoY 203-218 periyodunda LSP analizi ile hesaplanan KOH büyüklüğü 10.42 cm iken dalgacık ayrışımından sonra yapılan LSP analizi ile 10.05 cm olmuştur. S. Zhang vd., (2019), SNR verilerine uygulamış olduğu Deneysel Mod Ayrıştırma yöntemi ile SC02 istasyonunda 5°- 12° uydu yükseklik açısı aralığında KOH büyüklüğünü 12.59 cm olarak bulmuştur. Wang vd., (2019), SNR salınımlarına LSP analizi yerine Dalgacık Dönüşümü yöntemini uygulayarak KOH büyüklüğünü 15.21 cm olarak hesaplamıştır. Diğer yandan aynı çalışmada karşılaştırma amaçlı LSP analizinin kullanılması ile KOH büyüklüğü 10.03 cm olarak bulunmuştur. Purnell vd., (2020), SC02 istasyonunda 2015 yılının tamamında,

sentetik SNR verileri kullanarak, düşük yükseklik açılarında, spektral analiz yöntemi ile KOH değerinin 6.8 cm olduğunu ters modelleme ile bu değer 4.2 cm'ye düştüğünü belirlemiştir. Buradan da görüldüğü üzere seçilen uydu yükseklik açısı ve azimut aralıklarındaki farklılıklar, kullanılan analiz yöntemleri, veri periyodu gibi farklı etkenlerle elde edilen sonuçlar farklılık göstermektedir. Bu tez çalışmasında ise 1 Ocak-31 Aralık 2021 periyodunda SC02 istasyonunda kaydedilen GPS L1 SNR ve GPS L2C SNR verileri kullanılarak deniz seviyesi değişimi belirlenmiş olup üç farklı yöntemle kalite değerlendirmesi yapılmıştır. Tablo 36'da görüldüğü üzere, GPS L1 sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testinde Pearson korelasyonu 0.86, KOH büyüklüğü 6.95 cm'dir. Uygulanan K-Ortalamlar Kümeleme algoritması ile Pearson korelasyonu 0.95 seviyesine yükselmiş olup KOH büyüklüğü 4.19 cm'ye düşmüştür. LSP-MA yönteminde ise Pik-Gürültü Oranı testine göre korelasyonda ve KOH büyüklüğünde iyileşme olsa da en iyi sonuç K-Ortalamlar Kümeleme algoritması ile alınmıştır. GPS L2C sinyaline gelindiğinde, Pik-Gürültü Oranı testinde Pearson korelasyonu 0.86, KOH büyüklüğü 6.95 olarak hesaplanmıştır. K-Ortalamlar Kümeleme algoritması ile Pearson korelasyonu 0.93 seviyesine yükselerek KOH büyüklüğü 5.19 cm şeklinde bulunmuştur. LSP-MA yönteminde ise iyileştirme olmamış olup diğer iki yöntemle göre daha kötü sonuç elde edilmiştir. Özellikle Tablo 36'da gösterilen diğer çalışmalarda kullanılan GPS L1 sinyali açısından bu çalışmada elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, uygulanan yöntemlerle iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Özellikle K-Ortalamlar Kümeleme algoritması ile elde edilen 4.19 cm KOH büyüklüğü ile performansta büyük oranda iyileşme olduğu tespit edilmiştir. Bu sayede uygulanan analiz stratejisi ve zaman aralığı farklı olmakla birlikte literatürdeki Larson vd. (2017) ve Purnell vd. (2020) sonuçları ile benzer şekilde performansta kayda değer bir ilerleme kaydedilmiştir.

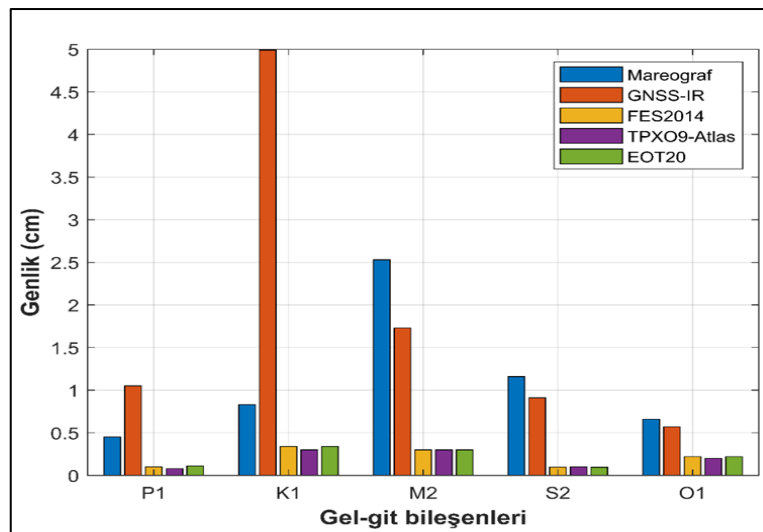
3.4. Meteorolojik Parametrelerin GNSS Yansıma Sinyali Üzerindeki Etkisinin Belirlenmesi Bulguları

Çalışmada sıcaklık, hava basıncı ve rüzgar hızı parametresinin deniz seviyesi belirleme çalışması için GNSS yansıma sinyali üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bunun için, Basit Doğrusal Regresyon ve Mann-Kendall trend analizi yöntemleri uygulanarak meteorolojik parametreler ve δ SNR genliğinin zaman içerisinde gösterdiği eğilime bakılmıştır. Tüm parametrelerden elde edilen bulgulara bakıldığında, sıcaklık arttıkça δ SNR genliğinin arttığı görülmüştür. Bu durum artan sıcaklıkla beraber saçınım arttığı ve antene

doğru olan yansımaların azaldığı şeklinde yorumlanabilir. Diğer yandan hava basıncındaki azalma ile de δ SNR genliğinin arttığı görülmüştür.

3.5. GNSS-IR Tekniği ile Gelgit Analizi Bulguları

Çalışmada GNSS-IR deniz seviyesi değişimi ile yapılan gelgit harmonik analizinde yarı-günlük (M2, S2) gelgit bileşenlerinde daha küçük sonuçlar bulunmuştur. Mareograf kayıtları ve GNSS-IR dayalı deniz seviyesi değişimlerinden hesaplanan gelgit genliklerinin farklarının ortalaması 0.72 cm ve standart sapması 1.98 cm olarak bulunmuştur. Diğer yandan, GNSS-IR ile hesaplanan genlik bileşenlerinin mareograf kayıtlarından hesaplanan genlik bileşenlerine kıyasla daha düşük hassasiyete sahip olarak elde edilmiştir. Mareograf deniz seviyesi değişimi verilerinden hesaplanan gelgit genliklerinin tümü istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. GNSS-IR dayalı deniz seviyesi değişimi ve mareograf kayıtlarından hesaplanan gelgit genliklerinin farklarının büyük bir bölümünün istatistiksel olarak anlamsız olduğu görülmüştür. Tabibi vd. (2020), mareograf kayıtlarından hesaplanan gelgit bileşenlerini daha hassas elde etmiştir. Aynı çalışmada GNSS-IR ve mareograf kayıtlarından hesaplanan gelgit bileşenlerinin farklarının birçoğunun istatistiksel olarak anlamsız bulunmuştur. Şekil 108’de gelgit genliklerinin mareograf, GNSS-IR, FES2014, TPX09-Atlas ve EOT20 modellerine göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 108. GNSS-IR, mareograf ve küresel okyanus gelgit modelleri gelgit genlikleri değişimi

Şekil 108'e bakıldığında; GNSS-IR, mareograf ve küresel okyanus gelgit modellerinden hesaplanan gelgit genlikleri arasında maksimum farkın K1 bileşeninde olduğu görülmüştür. Larson vd. (2017), K1 bileşeninde en büyük gelgit genliği farkının olmasının GPS uydu geometrisi kaynaklı olabileceğini değerlendirmiştir. Uydu geometrisi sinyal yansıma etkisi ile ilişkilidir ve dolayısıyla GNSS yansıma verilerinin de geometrik hatalarla ilişkilendirilmesi mümkün olabilir. Diğer yandan, küresel okyanus gelgit modellerinden elde edilen gelgit genlikleri kendi içerisinde uyumlu bulunmuştur. Fakat aynı bileşenlerin mareograf ve GNSS-IR ile az uyumlu olduğu görülmüştür. Elde edilen bu sonucun küresel okyanus gelgit modellerindeki model hataları sebebiyle ortaya çıkabileceği düşünülebilir (Özel, 2020). Tablo 37'de ise gelgit genlikleri arasındaki farklar sunulmuştur.

Tablo 37. GNSS-IR, mareograf istasyonları gelgit genlikleri ile küresel okyanus gelgit modelleri gelgit genlikleri arasındaki farklar

İstasyon	Model	P1	K1	O1	M2	S2
TRBZ	FES2014	0.05	4.65	0.35	1.43	0.81
	TPXO9-Atlas	0.97	4.69	0.37	1.43	0.81
	EOT20	0.94	4.65	0.35	1.43	0.81
Trabzon	FES2014	0.35	0.49	0.44	2.23	1.06
	TPXO9-Atlas	0.37	0.53	0.46	2.23	1.06
	EOT20	0.34	0.49	0.44	2.23	1.06

GNSS-IR, mareograf ve küresel okyanus gelgit modelleri genlik farklarının karşılaştırılmıştır. Maksimum fark 4.69 cm değeriyle GNSS-IR ve TPXO9-Atlas modeli arasında K1 bileşeninde, minimum fark ise 0.34 cm değeriyle mareograf ve EOT20 modeli arasında P1 bileşeninde bulunmuştur. GNSS-IR tekniği ve küresel okyanus gelgit modelleri karşılaştırıldığında; O1 bileşeninde en iyi uyum görülmüş olup en kötü uyum K1 bileşeninde bulunmuştur. Mareograf ile küresel okyanus modelleri arasındaki en iyi uyum ise P1 bileşeninde, en kötü uyum M2 bileşeninde olmuştur.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Deniz seviyesi değişimi, iklim değişikliği senaryolarında önemli bir bileşendir ve hem bölgesel hem de küresel değişimin belirlenmesi ve değerlendirilmesi güncel araştırma konularından biridir. GNSS teknolojisindeki gelişmelerle birlikte yansıyan GNSS sinyalinin mevcut tekniklerin yanında, deniz seviyesi değişiminin belirlenmesinde kullanımına başlanmıştır. Bu tez çalışmasında; ülkemizin farklı özelliklere sahip kıyılarında, kıyıda ve/veya kıyıya yakın sabit GNSS istasyonlarında, GNSS-IR tekniğine dayalı olarak ilk kez deniz seviyesi değişimi belirlenmiş ve farklı kalite değerlendirmesi yöntemleri ile GNSS-IR tekniğinin deniz seviyesi değişimi performansı iyileştirilmeye çalışılmıştır. Çalışmada aynı zamanda, belirlenen test alanında meteorolojik verilerin yansıyan GNSS sinyali üzerindeki etkisi incelenmiştir. Son olarak yine bir test alanında, gelgit bileşenlerinin belirlenmesinde GNSS-IR tekniğinin uygulanabilirliği araştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında öncelikle; ülkemizde Karadeniz, Akdeniz, Ege ve Marmara'da kıyıda ve/veya kıyıya yakın sabit GNSS istasyonları belirlenerek bu istasyonların GNSS-IR tekniği ile deniz seviyesi değişimi belirlenmesine elverişli veri sağlayıp sağlamadığı araştırılmıştır. Her bir sabit GNSS istasyonu için denizel alanı kapsayacak şekilde en uygun uydu yükseklik açısı ve azimut aralığı belirlenmiştir. GNSS-IR tekniği analiz stratejileri istasyonun konumuna göre değişmektedir. Dolayısıyla belirlenen bu aralıklar sadece bu istasyonların bulunduğu bölgelere ait olmakla beraber farklı istasyonlarda bölgesel farklılıklar olacaktır. Ardından deniz alanlarını kapsayacak şekilde belirlenen aralıklardaki SNR verileri alınarak ön işleme yapılmıştır. Sonuç olarak; TRBZ ve SNOP mareograf ortak yerleşke istasyonları, MERS IGS ağı istasyonu ve TEKR TUSAGA-Aktif ağı istasyonu GNSS-IR tekniği ile deniz seviyesi değişimi belirlenmesine uygun istasyonlar olarak bulunmuştur. Diğer istasyonlarda yansıma sinyallerinin daha çok karasal alana denk gelmesi, dar yükselik açısı kullanılması sebebiyle yeterli sayıda uydudan veri alınamaması, yansıyan sinyal gücünün az olması gibi nedenlerle deniz seviyesi değişimi belirlenememiştir. Ülkemizdeki istasyonların yanında ayrıca çalışmada kullanılan yöntemlerin performansını test etmek için uluslararası bir istasyon daha kullanılması ihtiyacı duyularak ABD Friday Limanı SC02 sabit GNSS istasyonu için benzer analizler yapılmıştır.

GNSS-IR tekniğinin, deniz seviyesi değişiminde kullanımı sağladığı avantajlar dolayısıyla kıymetlidir. Bununla birlikte teknik geliştirilmeye de açıktır. GNSS-IR tekniğine dayalı olarak elde edilen deniz seviyesi değişiminin istasyona ortak yerleşkeli veya istasyon yakınında bulunan bir mareografa ait deniz seviyesine göre değişken olduğu durumlar mevcuttur. Bu değişkenliğe dair ise net bir gösterge yoktur. Doğrulama verisi olarak alınan mareografa kıyasla GNSS-IR sonuçlarındaki değişkenlik bina, dağ, kayalık ve gemiler gibi çevresel faktörler olabileceği gibi sinyal yapısındaki bozulma, veri kayıt aralığının yetersizliği olabilmektedir. Literatürde, GNSS-IR tekniğinin bu durumlara yönelik performansının geliştirilmesi için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada; GNSS-IR tekniği Türkiye kıyılarında deniz seviyesi değişimi belirleme analizleri için üç farklı kalite değerlendirmesi yöntemi uygulanarak tekniğin performansındaki iyileşme araştırılmıştır. Kalite değerlendirmesi yöntemlerinden birincisi; literatürde birçok GNSS-IR çalışmasında kullanılan Pik-Gürültü Oranı testidir. İkincisi; bu tez çalışmasındaki yaklaşıma benzer olarak literatürde farklı uygulamalarda kullanılan ancak GNSS-IR ile kullanımına rastlanılmayan K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasıdır. Üçüncüsü ise, bu tez çalışması kapsamında LSP ve MA yöntemlerinin kombinasyonu olarak geliştirilen LSP-MA yöntemidir. Üç yöntem kullanılarak GNSS-IR tekniği ile belirlenen deniz seviyesi değişimi ve mareograf kayıtlarının karşılaştırılması ile elde edilen sonuçlar irdelendiğinde,

- Mareograf entegre sabit GNSS istasyonları arasında TRBZ istasyonunda en iyi sonuç 0.95 Pearson korelasyonu ve 2.78 cm KOH ile LSP-MA yönteminde elde edilmiştir. SNOP istasyonunda ise en iyi sonuç 0.92 Pearson korelasyonu ve 3.64 cm KOH ile K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasında görülmüştür.
- MERS IGS istasyonunda GPS verileri için en iyi sonuç 0.92 Pearson korelasyonu ve 4.24 cm KOH ile GPS L1 sinyalinde LSP-MA yöntemi ile gerçekleşmiştir. Galileo verileri için ise en iyi sonuç 0.94 Pearson korelasyonu ve 3.54 cm KOH ile Galileo L1 sinyalinde LSP-MA yöntemi ile bulunmuştur. Sonuç olarak; literatürde en fazla kullanılan Pik-Gürültü oranı testine göre en iyi sonucu 0.87 Pearson korelasyonu ve 5.5 cm KOH ile GPS L5 sinyali verirken uygulanan LSP-MA yöntemi sonucunda en iyi sonuç Galileo L1 sinyali ile sağlanmıştır. Bölüm 2.5.1 başlığında, Şekil 62’de görüldüğü üzere Galileo sinyalinde Pik-Gürültü Oranı testi uygulanarak elde edilen deniz seviyesi değişimi grafiğinde GPS sonuçlarına kıyasla fazlasıyla gerçeği yansıtmayan reflektör yükseklikleri vardır. Uygulanan LSP-MA yöntemi ile gerçeği yansıtmayan reflektör yükseklikleri çıkarılarak Galileo sinyalinde daha iyi sonuç

sağlanmıştır. MERS istasyonunda kullanılan yeni nesil L5 sinyali SNR verilerinden elde edilen sonuca bakılacak olursa, GPS L5 sinyalinden LSP-MA yöntemi ile 0.89 Pearson korelasyonu ve 4.89 cm KOH değeri ile azımsanmayacak bir sonuç elde edildiği görülmüştür.

- TEKR TUSAGA-Aktif ağı istasyonunda kullanılan GPS L1 ve L2 sinyalleri için en iyi sonuç 0.84 Pearson korelasyonu ve 5.43 cm KOH ile GPS L1 sinyalinde LSP-MA yöntemi ile bulunmuştur. Diğer yandan tüm yöntemler açısından değerlendirildiğinde, GPS L1 sinyalinin GPS L2 sinyaline göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.
- Tüm istasyonlarda GNSS-IR ile belirlenen deniz seviyesi değişimi ve mareograf kayıtları arasında yüksek oranlarda korelasyon bulunmuştur.
- Ülkemizdeki istasyonların haricinde çalışmaya dahil edilen ABD Friday Limanı SC02 sabit GNSS istasyonunda GPS L1 ve GPS L2C sinyallerinden deniz seviyesi değişimi belirlenmiş olup, yukarıda belirtilen üç yöntemle kalite değerlendirmesi yapılmıştır. SC02 istasyonu ile literatürde kullanımına daha önce rastlanılmayan LSP-MA yöntemi ve K-Ortalamlar Kümeleme algoritmasının performansının uluslararası çalışmalar ile birlikte değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Buna göre, en iyi sonuca GPS L1 sinyalinde 0.95 Pearson korelasyonu ve 4.19 cm KOH ile K-Ortalamlar Kümeleme algoritması ile ulaşılmıştır. Tablo 36'da gösterildiği üzere literatürdeki çalışmalara bakıldığında SC02 istasyonunda KOH büyüklüğünün genellikle 10 cm civarında olduğu görülmüştür. Larson vd. (2017) KOH büyüklüğünü 2.1 cm bulurken, Purnell vd. (2020) 4.2 cm olarak bulmuştur. Bu tez çalışmasında uygulanan K-Ortalamlar Kümeleme algoritması ile hem Pık-Gürültü Oranı testinde hesaplanan 6.95 KOH büyüklüğüne göre iyileşme gerçekleşmiş hem de diğer çalışmalara nazaran elde edilen 4.19 cm KOH ile iyi bir sonuç sağlanmıştır. Diğer yandan, GPS L2C sinyalinden elde edilen sonuçların da azımsanmayacak ölçüde olduğunu belirtilmelidir. K-Ortalamlar Kümeleme algoritması ile GPS L2C sinyalinde 0.93 Pearson korelasyonu ve 5.19 cm KOH elde edilmiştir.
- GNSS-IR ve mareograf deniz seviyesi değişimleri saçınım grafiklerinden GNSS-IR sonuçlarının mareograf etrafında olduğu görülmüştür. Hesaplanan regresyon eğimleri %95 istatistik güvenle anlamlı bulunmuştur.

- Doğrusal regresyonla hesaplanan eğimlerin yüksek olduğu görülmesine rağmen birçoğu “1” değerine eşit bulunmamıştır. Yeterli zamansal çözünürlüğün sağlanamaması bu sonucun sebebi olarak değerlendirilebilir.

Çalışmada kullanılan sabit GNSS istasyonları farklı bölgelerde, farklı yansıtıcı çevrelerde ve farklı gelgit aralıklarındadır. Çalışmada yapılan kalite değerlendirmesi ile tüm istasyonlarda deniz seviyesi izleme analizlerinde iyileşme sağlanmıştır. Fakat hem Pik-Gürültü Oranı testi ile karşılaştırıldığında en iyi iyileşmenin hem de karşılaştırılmadığı durumda en iyi sonucun çoğunlukla LSP-MA yöntemi ile sağlandığı görülmüştür. Bu anlamda deniz seviyesi değişimi sonuçlarında kaba hatalı ölçünün fazla olduğu, yani gerçeği yansıtmayan reflektör yüksekliklerinin elde edildiği durumlarda LSP-MA yönteminin yüksek performans gösterdiği söylenebilir. K-Ortalamalar Kümeleme algoritması ile TRBZ, MERS GPS L5, TEKR GPS L1 performansında küçük düşüşler meydana gelmiştir. İstasyonlardan hesaplanan reflektör yüksekliklerine bakıldığında; birbirine çok yakın reflektör yüksekliklerinin olması durumunda küme sayısının küçük seçilmesi, reflektör yüksekliklerinin sınıflandırılmasını sınırlayıcı bir faktör olduğu görülmüştür. Diğer yandan, küme merkezlerinin birbirine çok yakın olması ile gerçeği yansıtmayan reflektör yüksekliklerinin bir kısmının analizden çıkarılamadığı tespit edilmiştir. Son olarak, birçok çalışmada kullanılan Pik-Gürültü Oranı testinin eğer deniz seviyesi değişimi grafiğinde gerçeği yansıtmayan reflektör yüksekliklerinin sayısı yok ya da çok az ise iyi sonuç verdiği görülmüştür. Aksi durumda GNSS-IR kestirim performansının artırılması için bu değerlerin çalışmadan çıkarılması gerekmektedir.

Yansıyan sinyal için yüzey pürüzlülüğü etkili bir faktördür. Bu çalışmada üçüncü olarak; belirlenen TRBZ istasyonu test alanında pürüzlülüğe neden olabilecek sıcaklık, hava basıncı ve rüzgar hızı parametreleri ile δ SNR genlikleri arasındaki ilişkiye bakılmıştır. Bunun için Basit Doğrusal Regresyon ve iklim çalışmalarında sıklıkla kullanılan Mann-Kendall testi ile trend analizi yapılmıştır. Buna göre; sıcaklık arttıkça δ SNR genliğinin de arttığı görülmüştür. Diğer yandan hava basıncı azaldıkça δ SNR genliği artmıştır. Burada yapılacak olacak ileri araştırmalarla meteorolojik parametreler ve yansıyan GNSS sinyali arasındaki ilişkinin derinlemesine araştırılması mümkündür. Bu tez çalışmasında bölgesel olarak birbirleriyle ilişkileri değerlendirilmiştir.

GNSS istasyonlarının bulunduğu bölgede gerçekleşen gelgit olayları GNSS-IR tekniği ile belirlenen reflektör yüksekliğine etki etmektedir. Bu anlamda, GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi değişimlerinde gelgit genliklerinin belirlenmesi özellikle yüksek gelgit

genliklerine sahip bölgelerde önemlidir. Ülkemiz açısından değerlendirilirse; kıyılarımız düşük gelgit genliklerine sahiptir ve bu açıdan meydana gelen gelgitlerin GNSS-IR ile hesaplanan reflektör yüksekliklerini etkilemeyeceği düşünülebilir. Bir diğer nokta, akustik sensöre sahip mareograf istasyonlarındaki termal duyarlılığın genlik bileşenleri üzerinde etkiye sahip olmasıdır (Larson vd., 2017). GNSS istasyonlarının kullanılması ile termal duyarlılığa karşı önem alınabilir. Diğer yandan ülkemizde bulunan mareograf istasyonlarında radar sensör olması da bir avantaj olarak değerlendirilebilir. Buradan hareketle çalışmada son olarak; ülkemizde gelgit bileşenlerinin belirlenmesinde GNSS-IR tekniğinin kullanılabilirliği araştırılmış ve ilk analiz sonuçları verilmiştir. Bunun için, ülkemiz Karadeniz kıyısında bulunan TRBZ sabit GNSS istasyonundan alınan SNR verileri ile GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi değişimleri belirlenerek gelgit harmonik analizi ile gelgit bileşenleri hesaplanmıştır. Ardından hesaplanan gelgit bileşenleri, sırasıyla mareograf istasyonları kayıtlarından ve FES2014, TPXO9-Atlas ve EOT20 küresel okyanus gelgit modellerinden hesaplanan günlük ve yarı-günlük gelgit bileşenleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, günlük ve yarı-günlük gelgit bileşenleri cm mertebesinde elde edilerek en tutarsız sonucun K1 günlük bileşeninde olduğu görülmüştür. Mareografa kıyasla yarı-günlük (M2, S2) bileşenlerin GNSS-IR tekniği ile daha küçük olarak hesaplanmıştır. GNSS-IR dayalı deniz seviyesi değişimi ve mareograf kayıtlarından hesaplanan gelgit bileşenleri karşılaştırıldığında, maksimum farkın 4.16 cm ve minimum farkın -0.09 cm olduğu görülmüştür. Elbette elde edilen sonuçların GNSS-IR tekniğinde devam eden performans geliştirme çalışmaları ile geliştirilmesi mümkündür. Diğer yandan, daha uzun periyotlu veriler kullanılarak GNSS-IR tekniğine dayalı belirlenen deniz seviyesi değişiminden hesaplanan gelgit bileşenleri ile tekniğin gelgit belirleme alanında kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi üzerine alternatif bir çözüm olacaktır.

GNSS istasyonlarının konum belirleme amaçlı kullanımının yanı sıra jeodinamik etkiler üzerine araştırmalar, meteorolojik tahminler, hidrolojik ve iyonosferik çalışmalar gibi farklı amaçlara yönelik veriler sağladığı ülkemizde ve dünyada yapılan çeşitli araştırmalarla görülmektedir. Son dönemlerde ulusal ve uluslararası düzeyde yapılan çeşitli çalışmalarda, sabit GNSS istasyonlarının GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi değişiminin araştırılmasına da önemli katkılar sağladığı bilinmektedir. Diğer yandan, GNSS gözlemlerinin GNSS-IR tekniği gibi yeni ve gelişmeye açık kullanımının birçok potansiyel çalışmaya zemin oluşturması bilim dünyasında oldukça ilgi görmesine neden olmaktadır. Bu anlamda, ülkemizde deniz seviyesi değişimi izleme konusunda GNSS-IR tekniğinin önemli

bir potansiyele sahip olabileceği göz önüne alınarak kıyılarda veya kıyıya yakın sabit GNSS istasyonlarımızın GNSS-IR tekniği ile deniz seviyesi değişimi belirlenmesine uygun özellikte veri alınabilmesinin sağlanmasının önemli olduğu düşünülmektedir. Özellikle ülkemizde, TUSAGA-Aktif ağı istasyonunda bedeli karşılığında sunulan 1 sn'lik veriler haricinde GNSS istasyonlarının büyük bir bölümünün veri kayıt aralığının 30 sn olması, GNSS-IR çalışmaları için arka plan gürültüsünden girişim deseninin harmoniğinin çıkarılmasını zorlaştırdığından sınırlayıcı faktör olarak görülmektedir. Ülkemiz istasyonlarında daha kısa veri kayıt aralıklarının sağlanması ile sonuçların kalitesinin yükseltilmesi mümkündür. Diğer yandan ülkemiz kıyılarında GNSS-IR ile deniz seviyesi değişimi belirlenmesine elverişli alanlara yeni sabit GNSS istasyonlarının tesis edilmesine yönelik çalışmaların teşvik edilmesi ve ulusal/uluslararası iş birliklerinin gerçekleştirilmesinin önemli olduğu düşünülmektedir.

5. KAYNAKLAR

- Akçar, N. ve Schlüchter, C., 2005. Paleoglaciations in Anatolia: a Schematic Review and First Results, Eiszeitalter Gegenwart E&G / Quaternary Science Journal, 55, 1, 102-121.
- Akengin, H. ve Dölek, İ. 2016. Türkiye'nin Fiziki Coğrafyası, Pegem Akademi, ISBN: 978-605-318-064-7, Ankara, 287-310.
- Alejandro, E., 2013. GNSS Reflectometry for Land Remote Sensing Applications, PhD Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Alkan, A., Zengin, B., Yıldırım, C. ve Serdar, S., 2004. Trabzon Açıklarında Deniz Suyunun Bazı Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin İncelenmesi. Proje Sonuç Raporları Serisi, Su Ürünleri Merkez Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Sakarya Matbaacılık, Trabzon, 102 s.
- Al-Lawati, H.M., 2014. Design and Analysis of Low Profile Circularly Polarised Antennas, Phd Thesis, The University of Sheffield, Electronic and Electrical Engineering, United Kingdom.
- Altuntaş, C. ve Tunalıoğlu, N., 2022. Deniz Seviyesi Değişimlerinin Belirlenmesinde GNSS-IR Yönteminin Kullanımı ve Doğruluk Analizi Üzerine Bir Araştırma, Geomatik, 7, 3.
- Anagnostopoulou, C., Zanis, P., Katragkou, E., Tegoulas, I. ve Tolika, K., 2014. Recent Past and Future Patterns of the Etesian Winds Based on Regional Scale Climate Model Simulations, Climate Dynamics, 42, 7–8, 1819-1836.
- Anderson, K. D., 2000. Determination of Water Level and Tides Using Interferometric Observations of GPS Signals, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 17, 8, 1118-1127.
- Ansari, K., Seok, H. W. ve Jamjareegulgarn, P., 2022. Quasi Zenith Satellite System-Reflectometry for Sea-Level Measurement and Implication of Machine Learning Methodology, Scientific Reports, 12, 1, 21445.
- Asgarimehr, M., Zavorotny, V., Wickert, J. ve Reich, S., 2018. Can GNSS Reflectometry Detect Precipitation Over Oceans?, Geophysical Research Letters, 45, 22, 585-592.
- Asgarimehr, M., Zhelavskaya, I., Foti, G., Reich, S. ve Wickert, J., 2020. A GNSS-R Geophysical Model Function: Machine Learning for Wind Speed Retrievals, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 17, 8, 1333-1337.
- Avşar, N.B., Kutoğlu, Ş.H., Jin, S. ve Erol, B., 2015. Investigation of Sea Level Change Along the Black Sea Coast from Tide Gauge and Satellite Altimetry, The

International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-1/W5, 67-71.

- Avsar, N.B., Jin, S., Kutoglu, S. H. ve Gurbuz, G., 2017. Vertical Land Motion Along The Black Sea Coast from Satellite Altimetry, tide gauges and GPS, Advances in Space Research, 60, 12, 2871-2881.
- Avşar, N.B., 2019. Sea level changes in the Black Sea and its impacts on the coastal areas, PhD Thesis, Zonguldak Bülent Ecevit University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Zonguldak.
- Beckheinrich, J., 2016. GPS Reflectometry: Innovative Flood Monitoring at the Mekong Delta, PhD Thesis, Technischen Universität Berlin, Berlin.
- Beckmann, P. ve Spizzichino, A., 1968. The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surface, Pergamon P., ISBN: 0835742119, 511 pp.
- Benveniste, J., Cazenave, A., Vignudelli, S., Fenoglio-Marc, L., Shah, R., Almar, R. Ve Wöppelmann, G., 2019. Requirements for a Coastal Hazards Observing System, Frontiers in Marine Science, 6, 1-24.
- Beşel C. ve Tanır Kayıkçı, 2022. GNSS Yansıma Sinyalleri İle Fırtına Kaynaklı Ani Su Değişiminin İzlenmesi, Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu Bilimsel Toplantısı (TUJK), Kasım, Gebze, Proceedings: 1-2.
- Beşel, C. ve Tanır Kayıkçı, E., 2020. Investigation of Black Sea Mean Sea Level Variability by Singular Spectrum Analysis, International Journal of Engineering and Geosciences, 5, 1, 33-41.
- Beşel, C. ve Tanır Kayıkçı, E., 2021. Türkiye Denizlerinde GNSS Reflektometre Tekniği ile Deniz Seviyesi Değişiminin Araştırılması, Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi, 8, 1, 1-17.
- Beşel, C. ve Tanır Kayıkçı, E., 2022. Determination of Sea Level Variations in Turkish Mediterranean Coast using GNSS Reflectometry, Survey Review, 54, 385, 310-319.
- Beşel, C. ve Tanır Kayıkçı, E., 2022. Karadeniz Kıyısında TUDES Ortak Yerleşkeli GNSS İstasyonu Deniz Seviyesi Gözlemlerinden GNSS-IR Tekniği ile Gelgit Bileşenlerinin Belirlenmesi, Harita Dergisi, 168, 1-12.
- Beşel, C., 2017. IGS İstasyonları Zenit Troposferik Gecikme Parametresi Zaman Serilerinde Trend ve Mevsimsel Etki Analizleri, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Beşiktepe, Ş., 1991. Some Aspects of the Circulation and Dynamics of the Sea of Marmara. PhD Thesis, Middle East Technical University, Institute of Marine Sciences, Ankara.
- Beşiktepe, Ş., T., Sur, H.İ., Özsoy, E., Latif, M. A., Oğuz, T., Ünlüata, Ü., 1994. The Circulation and Hydrography of the Marmara Sea, Progress in Oceanography, 34, 4.

- Bilich, A. L., Axelrad, P. ve Larson, K. M., 2007. Scientific Utility of the Signal-to-Noise Ratio (SNR) Reported by Geodetic GPS Receivers, 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GNSS 2007, FortWorth, Texas, Proceedings: 1999-2010.
- Bilich, A., Larson, K. M. ve Axelrad, P., 2008. Modeling GPS Phase Multipath with SNR: Case Study from the Salar de Uyuni, Boliva, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 113, 4, 1-12.
- Birol, F., Fuller, N., Lyard, F., Cancet, M., Niño, F., Delebecque, C. ve Léger, F., 2017. Coastal Applications from Nadir Altimetry: Example of the X-TRACK Regional Products, *Advances in Space Research*, 59, 4, 936-953.
- Bonnor, N., 2012. A Brief History of Global Navigation Satellite Systems, Journal of Navigation, 65, 1, 1-14.
- Braasch, M.S., 2017. Multipath, *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, Springer, 443-468.
- Cabezós, H.E., 2017. Sea Surface Height Retrieval Using GNSS Reflected Signals, Undergraduate Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Cai, C., 2009. Precise Point Positioning Using Dual-Frequency GPS and GLONASS Measurements, Undergraduate Thesis, University of Calgary, Calgary.
- Carrere, L., Lyard, F., Cancet, H. M. ve Guillot, A., 2015. FES2014, A New Tidal Model on the Global Ocean with Enhanced Accuracy in Shallow Seas and in the Arctic Region, EGU General Assembly Conference, April, Vienna, Proceedings: 54-81.
- Cazenave, A., Bonnefond, P., Mercier, F., Dominh, K. ve Tournazou, V., 2002. Sea Level Variations in the Mediterranean Sea and Black Sea from Satellite Altimetry and Tide Gauges, Global and Planetary Change, 34, 59-86.
- Cazenave, A., Dieng, H. B., Meyssignac, B., von Schuckmann, K., Decharme, B. ve Berthier, E., 2014. The Rate of Sea-Level Rise, Nature Climate Change, 4, 5, 358-361.
- Cazenave, A., Palanisamy, H., ve Ablain, M., 2018. Contemporary Sea Level Changes from Satellite Altimetry: What Have We Learned? What Are the New Challenges?, Advances in Space Research, 62, 7, 1639-1653.
- Chelton, D., Ries, J., Haines, B., Fu, L. ve Callahan, P., 2001. Satellite Altimetry, *Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook for Techniques and Applications*, Chapter 1: Satellite Altimetry, 69, 1-131.
- Chen, F., Liu, L. ve Guo, F., 2019. Sea Surface Height Estimation with Multi-GNSS and Wavelet De-noising. Scientific Reports, 9, 1, 1-10.

- Chew, C., 2015. Soil Moisture Remote Sensing using GPS-Interferometric Reflectometry, PhD Thesis, University of Colorado, Colorado.
- Chew, C. C. ve Small, E. E., 2018. Soil Moisture Sensing Using Spaceborne GNSS Reflections: Comparison of CYGNSS Reflectivity to SMAP Soil Moisture, Geophysical Research Letters, 45, 9, 4049-4057.
- Chew, C., Shah, R., Zuffada, C., Hajj, G., Masters, D. ve Mannucci, A. J., 2016. Demonstrating Soil Moisture Remote Sensing with Observations from the UK TechDemoSat-1 Satellite Mission, Geophysical Research Letters, 43,7, 3317-3324.
- Church, J. A., Clark, P. U., Cazenave, A., Gregory, J. M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M. A., Milne, G. A., Nerem, R. S., Nunn, P. D., Payne, A. J., Pfeffer, W. T., Stammer, D. ve Unnikrishnan, A. S., 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge; New York, 1137-1216.
- Cipollini, P., Calafat, F. M., Jevrejeva, S., Melet, A. ve Prandi, P., 2017. Monitoring Sea Level in the Coastal Zone with Satellite Altimetry and Tide Gauges, Surveys in Geophysics, 38, 1, 33-57.
- Çağan, H., Şekercioglu, S. A., Akçay, E., Bilgin, R., Can, O. E., Semiz, G., Tavşanoğlu, Ç., Yokeş, M.B., Soyumert, A., İpekdağ, K., Sağlam İ.K., Yücel, M. ve Dalfes, H.N., 2011. Turkey's Globally Important Biodiversity in Crisis, Biological Conservation, 144, 12, 2752-2769.
- De Roo, R. D. ve Ulaby, F. T., 1994. Bistatic Specular Scattering from Rough Dielectric Surfaces, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 42, 2, 220-231.
- Demircan, M., 2022. Küresel İklim Değişikliği ve Sosyo-Ekonomik Etkileri: İklim, İklim Değişikliği ve Su İlişkisi, Türk Akademisi Siyasal Sosyal Stratejik Araştırmalar Vakfı (TASAV), 978-605-73812-8-6, 47-49.
- Demircan, M., 2022. İklim Değişikliğinin Türkiye Denizlerinin Sıcaklığına ve Su Ürünlerine Etkileri, Journal of Enviromental and Natural Studies, 4, 2, 96-108.
- Douglas, B.C., Kearney, M.S., Leatherman, S.P., 2001. Sea Level Rise: History and Consequences, Chapter 1, Academic Press, USA, 276.
- Ducrocq, V., Drobinski, P., Gualdi, S. ve Raimbault, P., 2018. The Mediterranean Region Under Climate Change, The water cycle in the Mediterranean, Sub-chapter 1.2.1., 73-81.
- Durand, M., Rivera, A., Nievinski, F., Lenzano, M. G., Monico, J. F. G., Paredes, P. ve Lenzano, L., 2019. GPS Reflectometry Study Detecting Snow Height Changes in the Southern Patagonia Icefield, Cold Regions Science and Technology, 166.

- Egbert, G.D., ve Svetlana, Y.E., 2002. Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 19, 2, 183-204.
- Egido, E.A., 2013. GNSS Reflectometry for Land Remote Sensing Applications, PhD Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Elosegui, P., Davis, J. L., Jaldehag, R. T. K., Johansson, J. M., Niell, A. E. ve Shapiro, I. I., 1995. Geodesy Using the Global Positioning System: The Effects of Signal Scattering on Estimates of Site Position, Journal of Geophysical Research, 100, 6, 2156-2202.
- Estey, L. ve Meertens, C. 1999. TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data, GPS Solutions, 3, 42-49.
- Fagundes, M. A. R., Mendonça-Tinti, I., Iescheck, A. L., Akos, D. M. ve Geremia-Nievinski, F., 2021. An Open-Source Low-Cost Sensor for SNR-Based GNSS Reflectometry: Design and Long-Term Validation Towards Sea-Level Altimetry, GPS Solutions, 25, 2, 1-11.
- Farzaneh, S., Parvazi, K. ve Shali, H. H., 2021. GNSS-IR-UT: A MATLAB-Based Software for SNR-Based GNSS Interferometric Reflectometry (GNSS-IR) Analysis, Earth Science Informatics, 14, 3, 1633-1645.
- Fenoglio-Marc, L., Dietz, C. ve Groten, E., 2004. Vertical Land Motion in the Mediterranean Sea from Altimetry and Tide Gauge Stations, Marine Geodesy, 27, 3-4, 683-701.
- Foti, G., Gommenginger, C., Jales, P., Unwin, M., Shaw, A., Robertson, C. ve Roselló, J., 2015. Spaceborne GNSS Reflectometry for Ocean Winds: First Results from the UK TechDemoSat-1 Mission, Geophysical Research Letters, 42, 13, 5435-5441.
- Georgiadou, P.Y., ve Kleusberg, A., 1988. On Carrier Signal Multipath Effects in Relative GPS Positioning, Manuscripta geodætica, 13, 3, 172-179.
- Geremia-Nievinski, F., Hobiger, T., Haas, R., Liu, W., Strandberg, J., Tabibi, S., Vey, S., Wickert, J. ve Williams, S., 2020. SNR-Based GNSS Reflectometry for Coastal Sea-Level Altimetry: Results from the First IAG Inter-Comparison Campaign, Journal of Geodesy, 94, 8, 1-15.
- Ghiasi, Y., Duguay, C. R., Murfitt, J., van der Sanden, J. J., Thompson, A., Drouin, H. ve Prévost, C., 2020. Application of GNSS Interferometric Reflectometry for the Estimation of Lake Ice Thickness, Remote Sensing, 12, 17, 1-9.
- Ghiasi, Y., Duguay, C. ve Murfitt, J., 2021. Temperature Effect on Reflected GNSS Signals from Mid-Latitude Lake Ice, The first workshop of the Inter-Commission Committee on Geodesy for Climate Research (ICCC) of the International Association of Geodesy (IAG) "Geodesy for Climate Research", March, Potsdam.
- Ghiasi, Y., Farzaneh, S., Parvazi, K. ve Duguay, C. R., 2021. Amplitude Estimation of Dominant Tidal Constituents Using GNSS Interferometric Reflectometry Technique,

- International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Brussels, July, Proceedings:8546-8549.
- Ginzburg, A. I., Kostianoy, A. G. ve Sheremet, N. A., 2004. Seasonal and Interannual Variability of the Black Sea Surface Temperature as Revealed from Satellite Data (1982–2000), Journal of Marine Systems, 52, 33-50.
- Gleason, S., 2006. Remote sensing of ocean, ice and land surfaces using bistatically scattered GNSS signals from low earth orbit, PhD Thesis, University of Surrey, UK.
- Goriacikin, I.N. ve Ivanov, V.A., 2006. Black Sea Level: Past, Present, Future, EKOCI-Gidrofizika, Sevastopol, 210 pp.
- Grgić, M., Nerem, R. S. ve Bašić, T., 2017. Absolute Sea Level Surface Modeling for the Mediterranean from Satellite Altimeter and Tide Gauge Measurements, Marine Geodesy, 40, 4, 239-258.
- Gürdal, M. A., 2002. Deniz Seviyesi Değişimlerine Neden Olan Etkiler, Harita Dergisi, 27, 19-33.
- Hall, C. D. ve Cordey, R. A., 1988. Multistatic Scatterometry, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, September, Edinburgh, Proceedings: 561-562.
- Hartigan, J., 1975. Clustering Algorithms, John Wiley & Sons, Toronto, 351 pp.
- Hein, G. W., Landau, H. ve Blomenhofer, H., 1990. Determination of Instantaneous Sea Surface, Wave Heights, and Ocean Currents Using Satellite Observations of the Global Positioning System, Marine Geodesy, 14, 3, 217-224.
- Holden, L. D. ve Larson, K. M., 2021. Ten Years of Lake Taupō Surface Height Estimates Using the GNSS Interferometric Reflectometry, Journal of Geodesy, 95, 7, 1-12.
- Hu, Y., Yuan, X., Liu, W., Wickert, J., Jiang, Z. ve Haas, R., 2021. GNSS-IR Model of Sea Level Height Estimation Combining Variational Mode Decomposition, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 14, 10405-10414.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F. D., Quin, G. K., Plattner, M., Tignor, S.K., Allen, J., Boschung, A., Nauels, Y., Xia, V., Bez and P. M. Midgley (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC, 2022. Climate Change 2021: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on

- Climate Change [H. O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem B. Rama (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 3056 pp.
- Jarosz, E., Teague, W. J., Book, J. W. ve Beşiktepe, Ş., 2011. Observed volume fluxes in the Bosphorus Strait, Geophysical Research Letters, 38, 21, 1-6.
- Jia, Y., Jin, S., Savi, P., Yan, Q. ve Li, W., 2020. Modeling and Theoretical Analysis of GNSS-R Soil Moisture Retrieval Based on the Random Forest and Support Vector Machine Learning Approach, Remote Sensing, 12, 22, 1-24.
- Jia, Y., Pei, Y., Savi, P. ve Notarpietro, R., 2015. Soil Moisture Retrieval from GNSS-R Signals, International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), September, Proceedings:1481-1484.
- Jin, S., Qian, X. ve Wu, X., 2017. Sea Level Change from BeiDou Navigation Satellite System-Reflectometry (BDS-R): First Results and Evaluation, Global and Planetary Change, 149, 20-25.
- Joakim, S., 2020. New methods and applications for interferometric GNSS reflectometry, PhD Thesis, Chalmers University of Technology Department of Space, Earth and Environment, Onsala Space Observatory, Sweden.
- Joseph, A., 2010. What is the difference between SNR and C/N0. InsideGNSS, 5, 8, 20-25.
- Kahveci, M. ve Yıldız, F., 2018. GNSS Uydularla Konum Belirleme Sistemleri, Nobel, 363,10, 364 s.
- Karaca, M. ve Ünal, Y.S., 2003. Potential Implications of Accelerated Sea-Level Rise for Turkey, Journal Coastal Research, 24,288-298.
- Karegar, M. A. ve Kusche, J., 2020. Imprints of COVID-19 Lockdown on GNSS Observations: An Initial Demonstration Using GNSS Interferometric Reflectometry, Geophysical Research Letters, 47, 19, 1-9.
- Karegar, M. A., Kusche, J., Geremia-Nievinski, F. ve Larson, K. M., 2022. Raspberry Pi Reflector (RPR): a Low-cost Water-level Monitoring System based on GNSS Interferometric Reflectometry, Water Resources Research,58, 12,1-20.
- Karegar, M. A., Larson, K. M., Kusche, J. ve Dixon, T. H., 2020. Novel Quantification of Shallow Sediment Compaction by GPS Interferometric Reflectometry and Implications for Flood Susceptibility, Geophysical Research Letters, 47, 14, 1-11.
- Kato, T., Terada, Y., Tadokoro, K. ve Futamura, A., 2022. Developments of GNSS Buoy for a Synthetic Geohazard Monitoring System, Proceedings of the Japan Academy Series B: Physical and Biological Sciences, 98, 2, 49-71.

- Katzberg, S. J. ve Garrison, J. L., 1996. Utilizing GPS to Determine Ionospheric Delay Over the Ocean, NASA Langley Technical Report Server, 1-16.
- Katzberg, S. J., Garrison, J., ve Howell, C., 1999. Simple Over-Water Altimeter Using GPS Reflections, 12th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, September, Nashville, Proceedings: 1819-1827.
- Kendall, M.G., 1975. Rank Correlation Methods, Charles Griffin, London.
- Kim, S. K. ve Park, J., 2021. Monitoring a Storm Surge during Hurricane Harvey Using Multi-Constellation GNSS-Reflectometry, GPS Solutions, 25, 2, 1-13.
- Komjathy, A., Maslanik, J., Zavorotny, V., Axelrad, P. ve Katzberg, S., 2000. Sea Ice Remote Sensing Using Surface Relected GPS signals, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July Honolulu, Proceedings: 1-7.
- Komjathy, A., Zavorotny, V., Axelrad, P., Born, G. ve Garrison, J., 1998. GPS Signal Scattering From Sea Surface: Comparison Between Experimental Data and Theoretical Model, Fifth International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, October, San Diego, Proceedings: 5-7.
- Kubryakov, A.A. ve Stanichnyi, S.V., 2013. The Black Sea Level Trends from Tide Gauges and Satellite Altimetry, Russian Meteorology and Hydrology, 38,5, 329-333.
- Kucuksezgin, F., Pazi, I., Kocak, F., Gonul, T., Duman, M. ve Eronat, H., 2019. Chapter 12 The Coasts of Turkey, World Seas: an Environmental Evaluation, Second Edition, Volume I: Europe, the Americas and West Africa, 307-332.
- Kuo, C. Y., Chiu, K. W., Chiang, K. W., Cheng, K. C., Lin, L. C., Tseng, H. Z., Chu, F.Y, Lan, W.H. ve Lin, H. T., 2012. High-Frequency Sea Level Variations Observed by GPS Buoys Using Precise Point Positioning Technique, Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 23, 2, 209-218.
- Lan Vu, P., 2019. Spatial Altimetry, GNSS Reflectometry and Marine Surcotes, PhD Thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse III.
- Larson, K. M. ve Nievinski, F. G., 2013. GPS Snow Sensing: Results from the EarthScope Plate Boundary Observatory, GPS Solutions, 17, 1, 41-52.
- Larson, K. M. ve Small, E. E., 2016. Estimation of Snow Depth Using L1 GPS Signal-to-Noise Ratio Data, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 9, 10, 4802-4808.
- Larson, K. M., 2013. A New Way to Detect Volcanic Plumes, Geophysical Research Letters, 40, 11, 2657-2660.
- Larson, K. M., 2019. Unanticipated Uses of the Global Positioning System, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 47, 19-40.

- Larson, K. M., Gutmann, E. D., Zavorotny, V. U., Braun, J. J., Williams, M. W. Ve Nievinski, F. G., 2009. Can We Measure Snow Depth with GPS Receivers?, Geophysical Research Letters, 36, 17, 1-5.
- Larson, K. M., Lay, T., Yamazaki, Y., Cheung, K. F., Ye, L., Williams, S. D. P. ve Davis, J. L., 2021. Dynamic Sea Level Variation From GNSS: 2020 Shumagin Earthquake Tsunami Resonance and Hurricane Laura, Geophysical Research Letters, 48, 1-8.
- Larson, K. M., Löfgren, J. S. ve Haas, R., 2013. Coastal Sea Level Measurements Using a Single Geodetic GPS Receiver, Advances in Space Research, 51, 8, 1301-1310.
- Larson, K. M., Ray, R. D. ve Williams, S. D. P., 2017. A 10-Year Comparison of Water Levels Measured with a Geodetic GPS Receiver Versus a Conventional Tide Gauge, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 34, 2, 295-307.
- Larson, K. M., Ray, R. D., Nievinski, F. G. ve Freymueller, J. T., 2013. The Accidental Tide Gauge: A GPS Reflection Case Study From Kachemak Bay, Alaska, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 10, 5, 1200-1204.
- Larson, K. M., Small, E. E., Gutmann, E. D., Bilich, A. L., Braun, J. J. ve Zavorotny, V. U., 2008. Use of GPS Receivers as a Soil Moisture Network for Water Cycle Studies, Geophysical Research Letters, 35, 24, 1-5.
- Larson, K. M., Small, E. E., Gutmann, E., Bilich, A., Axelrad, P. ve Braun, J., 2008. Using GPS Multipath to Measure Soil Moisture Fluctuations: Initial Results, GPS Solutions, 12, 3, 173-177.
- Lee, C. M., Kuo, C. Y., Sun, J., Tseng, T. P., Chen, K. H., Lan, W. H., Shum, C.K., Ali, T., Ching, K.E, Chu, P. ve Jia, Y., 2019. Evaluation and Improvement of Coastal GNSS Reflectometry Sea Level Variations from Existing GNSS Stations in Taiwan, Advances in Space Research, 63, 3, 1280-1288.
- Li, X., Yang, D., Yang, J., Zheng, G., Han, G., Nan, Y. ve Li, W., 2021. Analysis of Coastal Wind Speed Retrieval from CYGNSS Mission Using Artificial Neural Network, Remote Sensing of Environment, 260.
- Li, Z., Chen, P., Zheng, N. ve Liu, H., 2021. Accuracy Analysis of GNSS-IR Snow Depth Inversion Algorithms, Advances in Space Research, 67, 4, 1317-1332.
- Liu, Z., Du, L., Zhou, P., Liu, Z., Zhang, Z. ve Xu, Z., 2022. Performance Assessment of GNSS-IR Altimetry Using Signal-To-Noise Ratio Data from a Huawei P30 Smartphone, GPS Solutions, 26, 2, 1-10.
- Lomb, N.R., 1976. Least-Squares Frequency Analysis of Unequally Spaced Data, Astrophysics and Space Science, 39, 447-462.
- Lowe, S. T., Zuffada, C., Chao, Y., Kroger, P., Young, L. E., LaBrecque, J.L., 2002. 5-cm-Precision Aircraft Ocean Altimetry Using GPS Reflections, Geophysical Research Letters, 29, 10, 1-4.

- Löfgren, J.S., 2014. Local Sea Level Observations Using Reflected GNSS Signals, PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg.
- Löfgren, J. S. ve Haas, R., 2014. Sea Level Measurements Using Multi-Frequency GPS and GLONASS Observations, Eurasip Journal on Advances in Signal Processing, 1, 1-13.
- Löfgren, J. S., 2011. Sea-Level Analysis Using 100 Days of Reflected GNSS Signals, 3rd International Colloquium on Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme, September, Denmark, Proceedings: 1-5.
- Löfgren, J. S., Haas, R. ve Johansson, J. M., 2009. Sea Level Monitoring Using a GNSS-Based Tide Gauge, 2nd International Colloquium on Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme, October, Italy, Proceedings:1-4.
- Löfgren, J. S., Haas, R. ve Johansson, J. M., 2011. Monitoring Coastal Sea Level Using Reflected GNSS Signals, Advances in Space Research, 47, 2, 213-220.
- Löfgren, J. S., Haas, R. ve Scherneck, H. G., 2014. Sea Level Time Series and Ocean Tide Analysis from Multipath Signals at Five GPS Sites in Different Parts of the World, Journal of Geodynamics, 80, 66-80.
- Lu, R., Chen, W., Dong, D., Wang, Z., Zhang, C., Peng, Y. ve Yu, C., 2021. Multipath Mitigation in GNSS Precise Point Positioning Based on Trend-Surface Analysis And Multipath Hemispherical Map, GPS Solutions, 25, 3, 1-14.
- Makris, C., Galiatsatou, P., Tolika, K., Anagnostopoulou, C., Kombiadou, K., Prinos, P., Velikkou, K., Kapelonis, Z., Tragou, E., Androuridakis, Y., Athanassoulis, G., Vagenas, C., Tegoulis, I., Baltikas, V., Krestenitis, Y., Gerostathis, T., Belibassakis, K. ve Rusu, E., 2016. Climate change effects on the marine characteristics of the Aegean and Ionian Seas, Ocean Dynamics, 66, 12, 1603-1635.
- Mann, H.B, 1945. Non-Parametric Tests Against Trend, The Econometric Society, 3, 245-259.
- Martin-Neira, M., 1993. A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS): Application to Ocean Altimetry, ESA Journal, 17, 4, 331-355.
- Mashburn, J. R., 2018. Analysis of GNSS-R Observations for Altimetry and Characterization of Earth Surfaces, PhD Thesis, Faculty of the Graduate School of the University of Colorado, Colorado.
- Masters, D.S., 2004. Surface Remote Sensing Applications of GNSS Bistatic Radar: Soil Moisture and Aircraft Altimetry, PhD Thesis, University of Colorado, Department of Aerospace Engineering Sciences, Colorado.
- Melgar, D., Allen, R.M., Riquelme, S., Geng, J., Bravo, F., Baez, J.C., Parra, H., Barrientos, S., Fang, P., Bock, Y., Bevis, M., Caccamise II, D.J., Vigny, C., Moreno, M., Smalley

- Jr, R., 2016. Local Tsunami Warnings: Perspectives from Recent Large Events, Geophysical Research Letters, 43,1109-1117.
- Mercier, F., Rosmorduc, V., Carrere, L. ve Thibaut, P., Coastal and Hydrology Altimetry Product (PISTACH) Handbook. https://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/data/tools/hdbk_Pistach.pdf. 4 October 2010.
- MGM, 2015. Yeni Senaryolar ile Türkiye İklim Projeksiyonları ve İklim Değişikliği, Araştırma Dairesi Başkanlığı, Klimatoloji Şube Müdürlüğü, Meteoroloji Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara, 164 s.
- Moradi, R., Schuster, W., Feng, S., Jokinen, A. ve Ochieng, W., 2015. The Carrier-Multipath Observable: A New Carrier-Phase Multipath Mitigation Technique, GPS Solutions, 19, 1, 73-82.
- Müller, J., ve Pail, R., Geodesy 2013. <https://ggos.org/news/geodesy-2030/> 9 Ağustos 2022.
- Oguz, T., Tugrul, S., Kideys, A.E., Ediger, V. ve Kubilay. N., 2006. Physical and Biogeochemical Characteristics of the Black Sea. The Sea, Harward University Press Cambridge, MA, No. 14, 1333-1371.
- Oğuz, T. ve Tuğrul, S., 1998. Denizlerimizin Genel Oşinografik Özelliklerine Toplu Bir Bakış, Türkiye Denizlerinin ve Çevre Alanlarının Jeolojisi, İstanbul.
- Okay, A., Mater, B., Artüz, B., Gürseler, G., Artüz, L. ve Okay, N., 2007. Bilimsel Açından Marmara Denizi, Türkiye Barolar Birliği Yayınları, İstanbul.
- Özel, Ö., 2020. Okyanus Gelgit Yükleme Konum Değişimlerinin VLBI Ölçülerinden Kestirimi ve Global Okyanus Gelgit Modelleri ile Doğrulanması, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Özsoy, E. ve Ünlüata, Ü., 1997. Oceanography of the Black Sea: A Review of Some Recent Results, Earth-Science Reviews, 42, 4, 231-272.
- Öztürk, E. ve Şerbetçi, M., 1992. Dengeleme Hesabı III, Karadeniz Teknik Üniversitesi, No. 144, Trabzon, 539 s.
- Passaro, M., Cipollini, P., Vignudelli, S., Quartly, G. D. ve Snaith, H. M., 2014. ALES: A Multi-Mission Adaptive Subwaveform Retracker for Coastal and Open Ocean Altimetry, Remote Sensing of Environment, 145, 173-189.
- Pawlowicz, R., Beardsley, R. C. ve Lentz, S., 2002. Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB Using T_TIDE, Computers & Geosciences, 28, 8, 929-937.
- Peng, D., Hill, E. M., Li, L., Switzer, A. D. ve Larson, K. M., 2019. Application of GNSS Interferometric Reflectometry for Detecting Storm Surges, GPS Solutions, 23, 47, 1-11.

- Phuong, Lan Vu., 2019. Spatial Altimetry, GNSS Reflectometry and Marine Surcotes, PhD Thesis, Université Paul Sabatier, Oceanography, Toulouse III.
- Polat, S.Ç. ve Tugrul, S., 1995. Nutrient and Organic Carbon Exchanges Between the Black and Marmara Seas through the Bosphorus Strait, Continental Shelf Research, 15,9,1115-1132.
- Poulos, S. E., Drakopoulos, P. G. ve Collins, M. B., 1997. Seasonal Variability in sea Surface Oceanographic Conditions in the Aegean Sea (Eastern Mediterranean): an Overview, Journal of Marine Systems, 13, 1-4, 225-244.
- Press, W.H. ve Rybicki, G.B., 1989. Fast Algorithm for Spectral Analysis of Unevenly Sampled Data, Astrophysical Journal, 338, 277-281.
- Puente, V. ve Valdés, M., 2019. Sea Level Determination in the Spanish Coast Using GNSS-R, Proceedings, 19, 1, 11.
- Purnell, D., Gomez, N., Chan, N. H., Strandberg, J., Holland, D. M. ve Hobiger, T., 2020. Quantifying the Uncertainty in Ground-Based GNSS-Reflectometry Sea Level Measurements, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 13, 4419-4428.
- Rees, W. G., 2003. Physical Principles of Remote Sensing, University Press, Second Edition, Cambridge, United Kingdom, 343 pp.
- Roblou, L., Lyard, F., Le Henaff, M. ve Maraldi, C., 2007. X-Track, A New Processing Tool for Altimetry in Coastal Oceans, International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), July, Spain, Proceedings: 5129-5133.
- Roesler, C. ve Larson, K. M., 2018. Software Tools for GNSS Interferometric Reflectometry (GNSS-IR), GPS Solutions, 22, 3, 1-10.
- Roussel, N., Ramillien, G., Frappart, F., Darrozes, J., Gay, A., Biancale, R., Striebig, N., Hanquiz, V., Bertin, X. ve Allain, D., 2015. Sea Level Monitoring and Sea State Estimate Using a Single Geodetic Receiver, Remote Sensing of Environment, 171, 261-277.
- Ruf, C., Unwin, M., Dickinson, J., Rose, R., Rose, D., Vincent, M. ve Lyons, A., 2013. CYGNSS: Enabling the Future of Hurricane Prediction [Remote Sensing Satellites], IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 1, 2, 52-67.
- Santamaría-Gómez, A. ve Watson, C., 2017. Remote Leveling of Tide Gauges Using GNSS Reflectometry: Case Study at Spring Bay, Australia, GPS Solutions, 21, 2, 451-459.
- Santamaría-Gómez, A., Watson, C., Gravelle, M., King, M. ve Wöppelmann, G., 2015. Levelling Co-Located GNSS and Tide Gauge Stations Using GNSS Reflectometry, Journal of Geodesy, 89, 3, 241-258.

- Scargle, J.D., 1983. Studies in Astronomical Time Series Analysis. II – Statistical Aspects of Spectral Analysis of Unevenly Spaced Data, The Astrophysical Journal, 263, 835-853.
- Schöne, T., Schön, N. ve Thaller, D., 2009. IGS Tide Gauge Benchmark Monitoring Pilot Project (TIGA): Scientific Benefits, Journal of Geodesy, 83, 3-4, 249-261.
- Schureman, P., 2001. Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides, U.S. Department of Commerce Coastal and Geodetic Survey, Washington, 1-314.
- Selbesoğlu, M. O., Yavaşoğlu, H. H., Karabulut, M. F., Yavaşoğlu, H. A., Özcan, H. G., Oktar, Ö., Özdoğ, B., Karaman, H., Kamaşak, M.E. ve Güllal, V.E., 2021. Antarktika’da Küresel İklim Değişikliği İzleme için GNSS İstasyon Tasarımı: TUR1 ve TUR2 GNSS İstasyonlarının 4. Ulusal Antarktika Bilim Seferi’nde Antarktika Horseshoe Adası’na Kurulumu, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21, 6, 1353-1365.
- Sezen, E., 2006. Antalya-I (1935-1977) ve Antalya-II (1985-2005) Mareograf İstasyonlarında Deniz Seviyesi Değişimlerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar.
- Simav, M., 2007. Doğu Akdeniz’de Uydu Altimetre Verileri ile Deniz Seviyesi Değişimlerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Simav, M., 2012. Uydu ve Model Verilerine Dayalı Akdeniz Su Kütlesi Değişimleri, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Song, M., He, X., Jia, D., Xiao, R., Asgarimehr, M., Wickert, J., Wang, X. ve Zhang, Z., 2022. Sea Surface States Detection in Polar Regions Using Measurements of Ground-Based GNSS Interferometric Reflectometry, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 60.
- Song, M., He, X., Wang, X., Zhou, Y. ve Xu, X., 2019. Study on the Quality Control for Periodogram in the Determination of Water Level Using the GNSS-IR Technique, Sensors, 19, 20, 1-17.
- Soydemir Çiftçi, N., 2011. Türkiye Denizleri Açık Suları Fitoplankton Kompozisyonu-Ekim 2000, Eğirdir Su Ürünleri Fakültesi Dergisi, 7, 2, 23-36.
- Stammer, D. ve Cazenave, A., 2017. Satellite Altimetry Over Oceans and Land Surfaces, CRC Press, Boca Raton, 643 pp.
- Strandberg, J., 2020. New Methods and Applications for Interferometric GNSS Reflectometry, PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg.
- Strandberg, J. ve Haas, R., 2020. Can We Measure Sea Level with a Tablet Computer?, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 17, 11, 1876-1878.

- Strandberg, J., Hobiger, T. ve Haas, R., 2016. Improving GNSS-R Sea Level Determination Through Inverse Modeling of SNR Data, Radio Science, 51, 8, 1286-1296.
- Strandberg, J., Hobiger, T. ve Haas, R., 2019. Real-Time Sea-Level Monitoring Using Kalman Filtering of GNSS-R Data, GPS Solutions, 23, 3, 1-12.
- Sun J., Liu J. ve Zhao L., 2008. Clustering Algorithms Research, Journal of Software, 19,1, 48-61.
- Tabibi, S., Geremia-Nievinski, F. ve Van Dam, T., 2017. Statistical Comparison and Combination of GPS, GLONASS, and Multi-GNSS Multipath Reflectometry Applied to Snow Depth Retrieval, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 55, 7, 3773-3785.
- Tabibi, S., Geremia-Nievinski, F., Francis, O. ve Van Dam, T., 2020. Tidal Analysis of GNSS Reflectometry Applied for Coastal Sea Level Sensing in Antarctica and Greenland, Remote Sensing of Environment, 248, 1-13.
- Tabibi, S., Sauveur, R., Guerrier, K., Metayer, G. ve Francis, O., 2021. SNR-Based GNSS-R for Coastal Sea-Level Altimetry, Geosciences, 11, 391, 1-14.
- Takasu, T., 2009. RTKLIB: Open Source Program Package for RTK-GPS, FOSS4G 2009, November, Tokyo.
- Tang, F. ve Yan, S., 2022. CYGNSS Soil Moisture Estimations Based on Quality Control, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 19, 1-5.
- Teunissen, P. ve Montenbruck, O., 2017. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems, Springer, ISBN 978-3-319-42926-7.
- Tuğrul, S., Beşiktepe, Ş. T. ve Salihoğlu, I., 2002. Nutrient Exchange Fluxes Between The Aegean and Black Seas Through the Marmara Sea, Mediterranean Marine Science, 3, 1, 33-42.
- Türkeş, M., 2010. Klimatoloji ve Meteoroloji, Kriter Yayınevi, ISBN: 978-605-4613-26-7, İstanbul, 650 + XXII s.
- Türkeş, M., 2013. İklim Değişiklikleri: Kambriyen'den Pleyistosen'e, Geç Holosen'den 21. Yüzyıla, Ege Coğrafya Dergisi, 22,1, 1-25.
- Unwin, M., Jales, P., Blunt, P., Duncan, S., Brummitt, M. ve Ruf, C., 2013. The SGR-ReSI and Its Application for GNSS Reflectometry on the NASA EV-2 CYGNSS Mission, IEEE Aerospace Conference, March, Spain, Proceedings: 1-6.
- URL-1, <https://mgm.gov.tr/FILES/iklim/yillikiklim/2021-iklim-raporu.pdf> MGM 2021 Yılı İklim Değerlendirmesi. 14 Aralık 2022.
- URL-2, https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2020/03/Surdurulebilir-Kalkinma-Amaclari-Degerlendirme-Raporu_13_12_2019-WEB.pdf 14 Aralık 2022.

URL-3, <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level>. 16 Aralık 2022.

URL-4, <https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/lisa/SeaLevelRise>. 31 Ağustos 2020.

URL-5, <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000246981>. 14 Aralık 2022.

URL-6, <https://celebrating200years.noaa.gov/foundations/tides/image4.html>. 11 Nisan 2022.

URL-7, <https://tudes.harita.gov.tr/Portal/Index/32?lang=tr/Deniz%20Seviyesi>. 11 Nisan 2022.

URL-8, https://podaac.jpl.nasa.gov/Altimetric_Data_Information/Missions#JASON-CS, 13 Nisan 2022.

URL-9, https://datastore.copernicus-climate.eu/documents/satellite-sea-level/vDT2018/D3.SL.1v1.2_PUGS_of_v1DT2018_SeaLevel_products_v2.4.pdf, 14 Nisan 2022.

URL-10, <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/deniz-suyu-sicakligi-i-85730>. 20 Ağustos 2022.

URL-11, <https://www.gps.gov/systems/gps/space/> GPS 2022. 9 Ağustos 2022.

URL-12, <https://www.navcen.uscg.gov/gps-constellation>. 9 Ağustos 2022.

URL-13, https://www.glonass-iac.ru/en/about_glonass/ GLONASS 2022. 10 Ağustos 2022.

URL-14, https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space-policy/galileo_en Galileo 2022. 11 Ağustos 2022.

URL-15, https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/Galileo_navigation_signals. 11 Ağustos 2022.

URL-16, <http://www.csno-tarc.cn/en/system/introduction> BDS 2022. 4 Ağustos 2022.

URL-17, <https://igs.org/network/#station-map-list>. 9 Ağustos 2022.

URL-18, <https://www.unavco.org/>. 9 Ağustos 2022.

URL-19, <https://tudes.harita.gov.tr/Portal/VeriSorgula>. 9 Ağustos 2022.

URL-20, <https://www.tusaga-aktif.gov.tr/>. 9 Ağustos 2022.

- URL-21, <https://www.unavco.org/data/gps-gnss/data-access-methods/dai2/app/dai2.html>. 14 Şubat 2020.
- URL-22, <https://www.unavco.org/software/dataprocessing/teqc/teqc.html#overview>. 16 Aralık 2022.
- URL-23, <https://www.unavco.org/instrumentation/networks/status/nota/overview/SC02>. 9 Aralık 2022.
- URL-24, <https://tidesandcurrents.noaa.gov/>. 9 Aralık 2022.
- URL-25, <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>. 1 Haziran 2021.
- URL-26, <http://holt.oso.chalmers.se/loading/>. 19 Ekim 2021.
- Ünlüata, Ü., Oğuz, T., Latif, M.A. ve Özsoy, E., 1990. On the Physical Oceanography of the Turkish Straits, The Physical Oceanography of Sea Straits, NATO/ASI Ser. 318, Netherlands.
- Vagenas, C., Anagnostopoulou, C. ve Tolika, K., 2017. Climatic Study of the Marine Surface Wind Field Over the Greek Seas with the Use of a High Resolution RCM Focusing on Extreme Winds, Climate, 5, 2, 1-19.
- Valladeau, G., Thibaut, P., Picard, B., Poisson, J. C., Tran, N., Picot, N. ve Guillot, A., 2015. Using SARAL/AltiKa to Improve Ka-band Altimeter Measurements for Coastal Zones, Hydrology and Ice: The PEACHI Prototype, Marine Geodesy, 38, 124-142.
- Vey, S., Güntner, A., Wickert, J., Blume, T. ve Ramatschi, M., 2016. Long-Term Soil Moisture Dynamics Derived From GNSS Interferometric Reflectometry: A Case Study for Sutherland, South Africa, GPS Solutions, 20, 4, 641-654.
- Vigo, I., Garcia, D. ve Chao, B.F., 2005. Change of Sea Level Trend in the Mediterranean and Black Seas, Journal of Marine Research, 63, 1085-1100.
- Wan, W., Larson, K. M., Small, E. E., Chew, C. C. ve Braun, J. J., 2015. Using Geodetic GPS Receivers to Measure Vegetation Water Content, GPS Solutions, 19, 2, 237-248.
- Wang, X., He, X. ve Zhang, Q., 2019. Evaluation and Combination of Quad-Constellation Multi-GNSS Multipath Reflectometry Applied to Sea Level Retrieval, Remote Sensing of Environment, 231, 1-10.
- Wang, X., He, X., Shi, J., Chen, S. ve Niu, Z., 2022. Estimating Sea Level, Wind Direction, Significant Wave Height, and Wave Peak Period Using A Geodetic GNSS Receiver, Remote Sensing of Environment, 279, 113135.

- Wang, X., Zhang, Q. ve Zhang, S., 2018. Water Levels Measured with SNR Using Wavelet Decomposition and Lomb–Scargle Periodogram, GPS Solutions, 22, 1, 1-10.
- Wang, X., Zhang, Q. ve Zhang, S., 2019. Sea Level Estimation from SNR Data of Geodetic Receivers Using Wavelet Analysis, GPS Solutions, 23, 1, 1-14.
- Wigley, T. M. L. ve Farmer, G., 1982. Climate of the Eastern Mediterranean and Near East in Palaeoclimates, Palaeoenvironments and Human Communities in the Eastern Mediterranean Region of Later Prehistory, B.A.R. International Series, 540 pp.
- Williams, S. D. P. ve Nievinski, F. G., 2017. Tropospheric Delays in Ground-Based GNSS Multipath Reflectometry—Experimental Evidence from Coastal Sites, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122, 3, 2310-2327.
- Wöppelmann, G. M. M. 2016. "Reviews of Geophysics". Eos, Transactions American Geophysical Union, 54, 64–92, Online ISSN: 1944-9208.
- Yang, T., Wan, W., Chen, X., Chu, T., Qiao, Z., Liang, H., Wei, J., Wang, G. ve Hong, Y., 2019. Land Surface Characterization Using BeiDou Signal-To-Noise Ratio Observations, GPS Solutions, 23, 2, 1-12.
- Yavuzdoğan, A., 2019. Ege Denizi'nde Bağlı Deniz Seviyesi Değişimlerinin Kapula Fonksiyonları ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Yu, K., 2021. Theory and Practice of GNSS Reflectometry, Springer Singapore, No. 9, China, 35-37.
- Yueh, S. H., Xu, X., Shah, R., Kim, Y., Garrison, J. L., Komanduru, A. ve Elder, K., 2017. Remote Sensing of Snow Water Equivalent Using Coherent Reflection from Satellite Signals of Opportunity: Theoretical Modeling, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 10, 12, 5529-5540.
- Zervakis, V. ve Georgopoulos, D., 2002. Hydrology and Circulation in the North Aegean (Eastern Mediterranean) throughout 1997-1998, Mediterranean Marine Sciences, 3, 1, 7-21.
- Zhang, S., Liu, K., Liu, Q., Zhang, C., Zhang, Q. ve Nan, Y., 2019. Tide Variation Monitoring Based Improved GNSS-MR by Empirical Mode Decomposition, Advances in Space Research, 63, 10, 3333-3345.
- Zhang, S., Wang, T., Wang, L., Zhang, J., Peng, J. ve Liu, Q., 2021. Evaluation of GNSS-IR for Retrieving Soil Moisture and Vegetation Growth Characteristics in Wheat Farmland, Journal of Surveying Engineering, 147, 3, 1-14.
- Zhang, S., Zhang, C., Zhao, Y., Li, H., Liu, Q. ve Pang, X., 2021. Snow Depth Estimation Based On GNSS-IR Cluster Analysis, Measurement Science and Technology, 32, 9, 1-11.

- Zhang, Y., Huang, S., Han, Y., Yang, S., Hong, Z., Ma, D. ve Meng, W., 2022. Machine Learning Methods for Spaceborne GNSS-R Sea Surface Height Measurement from TDS-1, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 15, 1079-1088.
- Zhao, Q., Guo, J., Wang, C., Lyu, Y., Xu, X., Yang, C. ve Li, J., 2022. Precise Orbit Determination for BDS Satellites, Satellite Navigation, 3, 2, 1-24.
- Zheng, N., Chai, H., Ma, Y., Chen, L. ve Chen, P., 2022. Hourly Sea Level Height Forecast Based On GNSS-IR by Using ARIMA Model, International Journal of Remote Sensing, 43, 9, 3387-3411.
- Zheng, N., Chen, P. ve Li, Z., 2021. Accuracy analysis of ground-based GNSS-R sea level monitoring based on multi GNSS and multi SNR, Advances in Space Research, 68, 4, 1789-1801.
- Zhou, B., Watson, C., Legresy, B., King, M. A., Beardsley, J. ve Deane, A., 2020. GNSS/INS-Equipped Buoys for Altimetry Validation: Lessons Learnt and New Directions from the Bass Strait Validation Facility, Remote Sensing, 12, 18, 1-21.
- Zhu, Y., Tao, T., Zou, J., Yu, K., Wickert, J. ve Semmling, M., 2021. Spaceborne GNSS Reflectometry for Retrieving Sea Ice Concentration Using TDS-1 Data, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 18, 4, 612-616.
- Zimmermann, F., Schmitz, B., Klingbeil, L. ve Kuhlmann, H., 2019. GPS Multipath Analysis Using Fresnel Zones, Sensors, 19, 1, 1-25.

ÖZGEÇMİŞ

Cansu BEŞEL, 2010 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği bölümüne başladı ve 2014 yılında birincilikle mezun oldu. 2015 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2016 yılında Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı (ÖYP) ile Sinop Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Harita Mühendisliği bölümüne Araştırma Görevlisi olarak atandı. Aynı yıl ÖYP-35. Madde ile Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde göreve başladı. 2017 yılında "İGS İstasyonları Zenit Troposferik Gecikme Parametresi Zaman Serilerinde Trend ve Mevsimsel Etki Analizleri" başlıklı tez çalışması ile yüksek lisans eğitimini bitirdikten sonra aynı üniversitede doktora eğitimine devam etti. 2017-2018 yılları arasında 116Y186 numaralı "Bölgesel GNSS ağı ile Ekstrem Hava Olayları Tahmininin Güçlendirilmesi" başlıklı TÜBİTAK 1001 projesine bursiyer olarak dahil oldu. 2020 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği bölümü ve Harita Genel Müdürlüğü arasında iş birliği protokolü kapsamında yürütülen "Karadeniz Kıyılarındaki Deniz Seviyesi Değişiminin GNSS-IR Tekniği ile Araştırılması" başlıklı araştırma projesinde araştırmacı olarak yer almaya başladı. Yabancı dili İngilizcedir. Aşağıda seçili bazı yayımları verilmiştir.

Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler:

- Beşel C., Tanır Kayıkçı E., Determination of Sea Level Variations in Turkish Mediterranean Coast Using GNSS Reflectometry, Survey Review, cilt.54, sa.385, ss.310-319, 2022. <https://doi.org/10.1080/00396265.2021.1939589> (*SCI-Exp.*)
- Beşel C., Tanır Kayıkçı E., Karadeniz Kıyısında TUDES Ortak Yerleşkeli GNSS İstasyonu Deniz Seviyesi Gözlemlerinden GNSS-IR Tekniği ile Gelgit Bileşenlerinin Belirlenmesi, Harita Dergisi, sa. 168, ss. 1-12, 2022. (*ULAKBİM-TR Dizin*)
- Beşel C., Tanır Kayıkçı E., Türkiye denizlerinde GNSS reflektometre tekniği ile deniz seviyesi değişiminin araştırılması, Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi, cilt.8, sa.1, ss.1-17, 2021. Doi: 10.9733/jgg.2021r0001.t. (*ULAKBİM-TR Dizin*)
- Beşel C., Tanır Kayıkçı E., Investigation of Black Sea Mean Sea Level Variability by Singular Spectrum Analysis, International Journal of Engineering and Geosciences, cilt.5, sa.1, ss.33-41, 2020. Doi: 10.26833/ijeg.580510. (*ESCI İndeks*)

Ulusal/Uluslararası Hakemli Kongre/Sempozyum Bildiri Kitaplarında Yer Alan Yayınlar:

Beşel C., Tanır Kayıkçı E., GNSS Yansıma Sinyalleri İle Fırtına Kaynaklı Ani Su Seviyesi Değişiminin İzlenmesi, Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu (TUJK) 2022 Yılı Bilimsel Toplantısı, Kocaeli, 2 - 04 Kasım 2022.

Beşel C., Tanır Kayıkçı E., GNSS-IR Tekniği İle Karadeniz Kıyılarında Deniz Seviyesi İzleme ve Gelgit Genlik Tahmini, 5. Ulusal Deniz Bilimleri Konferansı, Trabzon, 1 - 02 Haziran 2022.

Beşel C., Tanır Kayıkçı E., GNSS-IR Tekniği İle Meteorolojik Parametreler ve Gelgit Bileşenleri Arasındaki İlişkinin Araştırılması, Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu (TUJK) 2021 Yılı Bilimsel Toplantısı, Ankara, 25 - 27 Kasım 2021.

Beşel C., Tanır Kayıkçı E., Meteorological and Tidal Effects on GNSS Reflected Signal in Mediterranean Coasts of Turkey, Scientific Assembly of the International Association of Geodesy (IAG), Beijing, Çin, 28 Haziran - 02 Temmuz 2021.

Beşel C., Tanır Kayıkçı E., Larson K. M., Sezen E., Keskin İ. H., Türkiye Kıyılarında TUDES Ortak Yerleşkeli GNSS İstasyonlarında GNSS-IR Tekniği İle Deniz Seviyesi Değişiminin Belirlenmesi, 18. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara, 26 - 29 Mayıs 2021.

Beşel C., Tanır Kayıkçı E., Retrieving Sea Level Heights around Turkish Coasts using GPS Interferometric Reflectometry, The first workshop of the Inter-Commission Committee on Geodesy for Climate Research (ICCC) of the International Association of Geodesy (IAG), "Geodesy for Climate Research", Potsdam, Almanya, 29 - 31 Mart 2021.

Beşel C., Tanır Kayıkçı E., Karadeniz Kıyılarındaki Ortalama Deniz Seviyesi Değişiminin Tekil Spektrum Analizi İle Araştırılması, 17. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara, 25 - 27 Nisan 2019.

Kitap Bölümü:

Tanır Kayıkçı E., Yalçinkaya M., Beşel C., Yavuzdoğan A., Değişen İklimle Yükselen Deniz Seviyesi, Zamanın İzleri 2022: İklim Değişikliği, KTÜ Matbaası, Trabzon, ss.137-153, 2022.