KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DENİZ DOLGU SAHALARINDAKİ YÜZEY DEĞİŞİMLERİNİN PSI VE HASSAS NİVELMAN YÖNTEMLERİ İLE BELİRLENMESİ: ŞENOL GÜNEŞ SPOR KOMPLEKSİ ÖRNEĞİ

DOKTORA TEZİ

Harita Yüksek Müh. Fırat ALTINTAŞ

EYLÜL 2022
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DENİZ DOLGU SAHALARINDAKİ YÜZEY DEĞİŞİMLERİNİN PSI VE HASSAS NİVELMAN YÖNTEMLERİ İLE BELİRLENMESİ: ŞENOL GÜNEŞ SPOR KOMPLEKSİ ÖRNEĞİ

Harita Yüksek Müh. Fırat ALTINTAŞ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

"DOKTOR (HARİTA MÜHENDİSLİĞİ)"

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 / 08 /2022

Tezin Savunma Tarihi : 20 / 09 /2022

Tez Danışmanı :Prof. Dr. Ertan GÖKALP

Trabzon 2022

ÖNSÖZ

“Deniz Dolgu Sahalarındaki Yüzey Değişimlerinin PSI ve Hassas Nivelman Yöntemleri İle Belirlenmesi: Şenol Güneş Spor Kompleksi Örneği” başlıklı bu tez çalışması Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Programında hazırlanmıştır.

Tez çalışmam süresince danışmanlığımı üstlenerek yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer hocam Prof. Dr. Ertan GÖKALP’e teşekkürlerimi sunarım. Tez izleme komitesinde yer alarak, doktora tez çalışmam süresince bilgi ve tecrübeleri ile destek sağlayan değerli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Osman ÜÇÜNCÜ‘ye ve Dr. Öğr. Üyesi Leyla ÇAKIR’a teşekkür ederim. Ayrıca Doktora Tez jürimde yer alan değerli hocalarım Prof. Dr. Kemal Özgür HASTAOĞLU’na ve Prof. Dr. Rahmi Nurhan ÇELİK’e yapmış oldukları bilimsel değerlendirmelerinden ve katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Tez çalışmam kapsamında arazide gerçekleştirilen ölçme çalışmalarında yardımcı olan Arş. Gör. Ahmet YAVUZDOĞAN’a, Harita Mühendisi Teğmen Erdem GÖKTÜRK’e ve Harita Teknikeri Hakan HAMİTOĞLU’na çok teşekkür ederim. Arazi çalışmalarının yapılmasına izin veren Trabzon Gençlik ve Spor İl Müdürlüğüne ve Trabzonspor kulübüne teşekkür ederim. Tez çalışmam süresince yazılıma dayalı uygulamalarda sıkça faydalandığım SNAP STEP ve MAINSAR forumlarındaki kullanıcılara teşekkür ederim. Son olarak ve en önemlisi, en zor zamanlarımda maddi ve manevi olarak yanımda durarak desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme çok teşekkür ederim.

Fırat ALTINTAŞ

Trabzon 2022

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum "Denız Dolgu Sahalarındaki Yüzey Değişimlerinin PSI ve Hassas Nivelman Yöntemleri İle Belirlenmesi: Şenol Güneş Spor Kompleksi Örneği" başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Ertan GÖKALP'in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 20/09/2022.

Fırat ALTINTAŞ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ……. III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ……... IV
İÇİNDEKİLER……. V
ÖZET…… VII
SUMMARY……. VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ…….. IX
TABLOLAR DİZİNİ…… XI
SEMBOLLER DİZİNİ……. XII
1. GENEL BİLGİLER…….. 1
1.1. Giriş…… 1
1.2. Problemin Tanımı……... 1
1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı…….. 3
1.4. Metodoloji…….. 4
1.5. Literatür Taraması…….. 6
1.6. SAR Tekniğinin Temel Prensipleri…… 16
1.7. InSAR Tekniği Temel Prensipleri ve Matematiksel Esasları……. 22
1.7.1. Uyumluluk (Coherence)……. 25
1.8. DInSAR Tekniği ile Deformasyonların Belirlenmesi…… 27
1.9. StaMPS PSI Tekniği……... 34
1.10. Sentinel-1 Uydu Misyonu…….. 46
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR …….. 52
2.1. Çalışma Alanı……. 52
2.2. Hassas Nivelman Ölçüleri ile Düşey Yüzey Değişimlerinin Belirlenmesi… 54
2.2.1. Ölçülerin Planlanması…… 54
2.2.2. Ölçülerin Gerçekleştirilmesi……... 57
2.2.3. Ölçülerin İrdelenmesi ve Dengelenmesi…… 59
2.2.3.1. Nivelman Ağının Serbest Dengelenmesi……... 59

2.2.3.2. Model Hipotezinin Testi……. 61
2.2.3.3. Uyuşumsuz Ölçüler Testi……... 63
2.2.3.4. Dengeleme ve Ölçülerin İrdeleme Sonuçları……. 64
2.2.4. Dengeli Yükseklik Farkları ile Düşey Yüzey Değişimlerinin Belirlenmesi.. 72
2.3. StaMPS PSI Yöntemiyle Yüzey Değişimlerinin Belirlenmesi…….. 73
2.3.1. Ön İşleme (Pre-Processing) Adımları…… 74
2.3.1.1. Slave ve Master Görüntülerin Seçimi…… 75
2.3.1.2. Görüntülerin Kırpılması ve Hassas Yörünge Bilgilerinin Eklenmesi…… 79
2.3.1.3. Çakıştırılmış ve İnterferogramı Hesaplanmış Master-Slave Dizinlerinin Oluşturulması……. 79
2.3.1.4. Çk ve İfg Master-Slave Dizinlerinin StaMPS Yazılımına Aktarılması……. 80
2.3.2. StaMPS PSI Tekniği İşleme Adımları…… 81
2.3.3. Artan ve Azalan LOS Hız Verilerinin Kombinasyonu……... 85
2.3.4. Artan, Azalan ve Nivelman Verilerinin Kombinasyonu…… 89
3. BULGULAR VE İRDELEMELER ……. 91
3.1. Hassas Nivelman Ölçüleri ile Düşey Hızların Belirlenmesi ve İrdelenmesi. 91
3.2. StaMPS PSI Yöntemiyle Elde Edilen Bulgular ve İrdelemeleri…… 94
3.2.1. 14.01.2018-28.01.2020 (İki Yıllık) Sonuçlar ve İrdelemeler……. 94
3.2.1.1. Artan Yörünge Sonuçları ve İrdelemeleri…….. 94
3.2.1.2. Azalan Yörünge Sonuçları ve İrdelemeleri…… 97
3.2.1.3. Artan+Azalan Kombinasyonu ve Nivelman Hızları ile Karşılaştırılması….. 99
3.2.1.4. Artan+Azalan+Nivelman Kombinasyonu ile V_K Hızlarının Belirlenmesi… 105
3.2.2. 20.12.2016-28.01.2020 (Üç Yıllık) Sonuçlar ve İrdelemeler …… 107
3.2.2.1. Artan Yörünge Sonuçları ve İrdelemeleri…….. 108
3.2.2.2. Azalan Yörünge Sonuçları ve İrdelemeleri…… 110
3.2.2.3. Artan ve Azalan Yörünge Verilerinin Karşılaştırılması……. 112
3.2.2.4. Artan ve Azalan Verilerin Kombinasyonu ile Yatay (V_D) ve Düşey (V_Y) Hız Değerlerinin Belirlenmesi……... 116
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER…….. 123
5. KAYNAKLAR…….. 130
ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

DENİZ DOLGU SAHALARINDAKİ YÜZEY DEĞİŞİMLERİNİN PSI VE HASSAS NİVELMAN YÖNTEMLERİ İLE BELİRLENMESİ: ŞENOL GÜNEŞ SPOR KOMPLEKSİ ÖRNEĞİ

Fırat ALTINTAŞ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ertan GÖKALP
2022, 129 Sayfa

Şenol Güneş Spor Kompleksi ve Stadyumu Türkiye'de deniz dolgusu üzerine inşa edilen ender yapılardan birisidir. Bu yapı üzerindeki yüzey değişimlerinin izlenmesi, bölgede meydana gelebilecek can ve mal kayıplarının önlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla, bu tez çalışmasında, bölgede meydana gelen yatay ve düşey yüzey değişimleri hassas nivelman ve StaMPS PSI yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Uygulamalar iki farklı tarih aralığında gerçekleştirilmiştir. 14.01.2018-28.01.2020 tarih aralığında, 39 obje ve 2 sabit olmak üzere toplam 41 nivelman noktasında 5 periyot olarak gerçekleştirilen hassas nivelman ölçüleri sonucunda -11.1 mm/y değerine varan çökme oranları tespit edilmiştir. Aynı zaman aralığında artan ve azalan yörüngelerdeki SAR görüntülerinin StaMPS yöntemiyle değerlendirilmesiyle LOS doğrultularında sırasıyla -12.5 mm/y ile 7 mm/y ve -12.4 mm/y ile 8.4 mm/y arasında hız değerleri elde edilmiştir. Bu PS LOS hız verilerinin enterpolasyonu ve kombinasyonu ile nivelman nokta konumlarındaki yatay (Doğu-Batı) ve düşey hız değerleri sırasıyla -3.2 mm/y ile 3.7 mm/y ve -9.1 mm/y ile 0.3 mm/y arasında elde edilmiştir. Nivelman ve StaMPS yöntemlerinden elde edilen düşey hız değerleri karşılaştırıldığında 0.3 mm/y ortalama fark ve 1.2 mm/y standart sapma değerlerine ulaşılmıştır. Artan+azalan LOS ve nivelman düşey hız verilerinin kombinasyonu ile ise Kuzey-Güney doğrultusundaki yatay hızlar -28.2 mm/y ile 14.6 mm/y arasında elde edilmiştir. 20.12.2016 –28.01.2020 tarih aralığında artan ve azalan toplam 191 SAR görüntüsünün StaMPS yöntemi ile değerlendirilmesi sonucunda ise, LOS doğrultularında -7.6 mm/y ile 4.6 mm/y ve -9.7 mm/y ile 3.9 mm/y arasında, düşey ve yatay (Doğu-Batı) doğrultularda -9.5 mm/y ile 3.9 mm/y ve -7.6 mm/y ile 7.7 mm/y arasında hız değerleri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deniz Dolgu Sahası, Yatay ve Düşey Yüzey değişimleri, StaMPS PSI Yöntemi, Hassas Nivelman Ölçüleri, Karşılaştırma, Kombinasyon.

PhD. Thesis

SUMMARY

DETERMINATION OF SURFACE CHANGES ON SEA-FILLED SITES BY PSI AND PRECISION LEVELING METHODS: THE EXAMPLE OF ŞENOL GÜNEŞ SPORTS COMPLEX

Fırat ALTINTAŞ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Geomatics Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Ertan GÖKALP
2022, 129 Pages

Şenol Güneş Sports Complex and Stadium is one of the rare structures built on the sea fill in Turkey. Monitoring the surface changes on this structure is of great importance in terms of preventing the loss of life and property that may occur in the region. For this purpose, in this thesis, horizontal and vertical surface changes in the region were determined using precision leveling and StaMPS PSI methods. The applications were carried out in two different date intervals. Between 14.01.2018 and 28.01.2020, subsidence rates of up to -11.1 mm/y were determined as a result of precision leveling measurements carried out in 5 periods at totally 41 leveling points, which are 39 objects and 2 fixed points. By evaluating the SAR images in ascending and descending orbits in the same time interval by StaMPS method, velocity values between -12.5 mm/y - 7 mm/y and -12.4 mm/y - 8.4 mm/y were obtained respectively in the LOS directions. By interpolation and combination of these PS LOS velocity data, the horizontal (East-West) and vertical velocity values at the leveling point positions were obtained between -3.2 mm/y - 3.7 mm/y and -9.1 mm/y - 0.3 mm/y, respectively. When the vertical velocity values obtained from the leveling and StaMPS methods were compared, the average difference of 0.3 mm/y and the standard deviation of 1.2 mm/y were obtained. With the combination of ascending+descending LOS and leveling vertical velocity data, horizontal velocities in the North-South direction were obtained between -28.2 mm/y and 14.6 mm/y. As a result of the evaluation totally 191 ascending and descending SAR images between 20.12.2016 – 28.01.2020 by StaMPS method, the velocities were obtained between -7.6 mm/y - 4.6 mm/y and -9.7 mm/y - 3.9 mm/y in LOS directions and between -9.5 mm/y - 3.9 mm/y and -7.6 mm/y - 7.7 mm/y in the vertical and horizontal (East-West) directions, respectively.

Key Words: Sea-Filled Site, Horizontal and Vertical Surface Changes, StaMPS PSI Method, Precision Leveling Measures, Comparison, Combination.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. SAR görüntüleme geometrisi (Bamler ve Hartl 1998; Hooper 2006'dan değiştirilerek)……..... 18

Şekil 2. SAR faz değişim ölçüsü (Ferretti vd., 2007'den değiştirilerek)……..…. 20

Şekil 3. SAR görüntülerindeki geometrik hatalar (Pinel vd., 2014'den değiştirilerek).. 21

Şekil 4. Tekrar geçişli SAR interferometrisi (Hanssen, 2001; Lauknes, 2004; Hooper vd., 2007; Höser, 2018; Yazici, 2019'dan değiştirilerek)…….. 23

Şekil 5. Sarılmış ve çözülmüş faz görüntüleri (Köksal, 2011; Quarzeddine, 2002'den değiştirilerek)……..... 33

Şekil 6. Dağınık (a) ve daimi (b) yansıtıcı piksellerin faz simülasyonu (Hooper vd., 2007'den değiştirilerek)……..... 35

Şekil 7. 18.06.2017 tarihli S-1A artan ve S-1B azalan geçiş üzerindeki uydu hareket ve bakış yönleri……..…….. 47

Şekil 8. Sentinel-1 Görüntüleme Modları (ESA Sentinel-1 Team, 2013'den değiştirilerek……..…… 49

Şekil 9. IW SLC görüntüsü alt-şeritleri ve radar patlamaları URL-2, 2021'den değiştirilerek)……..... 51

Şekil 10. Deniz dolgusu üzerinde yer alan çalışma alanının referans (sabit) noktası (TRBN TUSAGA-Aktif istasyonu) (şekil-A) ile dolgu inşaatından önceki 2010 mayıs tarihli (şekil-B) ve dolgu inşaatı tamamlandıktan sonraki 2020 aralık tarihli (şekil-C) görüntüleri……...….... 53

Şekil 11. Nivelman noktaları ve güzergahları……...……..... 55

Şekil 12. StaMPS PSI tekniği uygulamaları……...…….. 74

Şekil 13. Ön işleme adımları……...…….. 75

Şekil 14. 14.01.2018-28.01.2020 Aralığında artan yörünge yıldız grafiği……...….... 77

Şekil 15. 14.01.2018-28.01.2020 Aralığında azalan yörünge yıldız grafiği……...….. 78

Şekil 16. 20.12.2016-28.01.2020 Aralığında artan yörünge yıldız grafiği……..... 78

Şekil 17. 20.12.2016-28.01.2020 Aralığında azalan yörünge yıldız grafiği……..... 78

Şekil 18. StaMPS PSI tekniği işleme adımları şeması……...……... 81

Şekil 19. Artan ve azalan geçiş yörüngelerine göre algılanan hareketler……...….. 85

Şekil 20. Artan ve azalan görüntüleme geometrileri (Fuhrmann ve Garthwaite, 2019'dan değiştirilerek)……..….. 88

Şekil 21. Dolgu sahasında DK (deniz kenarı) yönüne göre gözlemlenen çatlak ve çöküntüler……..... 93

Şekil 22. 14.01.2018-28.01.2020 Artan PS LOS hızları (mm/y)……..... 95

Şekil 23. 14.01.2018-28.01.2020 Artan PS LOS hızlarının standart sapmaları (mm/y)... 95

Şekil 24. 14.01.2018-28.01.2020 Azalan PS LOS hızları (mm/y)……..... 97

Şekil 25. 14.01.2018-28.01.2020 Azalan PS LOS hızlarının standart sapmaları (mm/y) 98

Şekil 26. 14.01.2018-28.01.2020 Enterpolasyonda kullanılan artan yörünge PS noktalarının LOS hız değerleri ve nivelman noktaları konumları ile gösterimi……...……. 100

Şekil 27. 14.01.2018-28.01.2020 Enterpolasyonda kullanılan azalan yörünge PS noktalarının LOS hız değerleri ve nivelman noktaları konumları ile gösterimi……...……. 100

Şekil 28. Artan yörünge LOS hızları enterpolasyon haritası (mm/y)……...… 100

Şekil 29. Azalan yörünge LOS Hızları enterpolasyon haritası (mm/y)……...……. 101

Şekil 30. Nivelman noktalarındaki V_K hız değerleri (mm/y)……. 105

Şekil 31. 20.12.2016–28.01.2020 Artan PS LOS hızları (mm/y)……..... 108

Şekil 32. 20.12.2016–28.01.2020 Artan PS LOS hızlarının standart sapmaları (mm/y).. 109

Şekil 33. 20.12.2016–28.01.2020 Azalan PS LOS hızları (mm/y)……...… 110

Şekil 34. 20.12.2016–28.01.2020 Azalan PS LOS hızlarının standart sapmaları (mm/y) 111

Şekil 35. 20.12.2016–28.01.2020 Artan ve azalan karşılaştırma PS noktaları……..….. 112

Şekil 36. Artan ve azalan A, B, C, D noktalarının zaman serileri ve hızları (mm/y)…… 113

Şekil 37. Artan ve azalan E, F, G noktalarının zaman serileri ve hızları (mm/y)……. 114

Şekil 38. Artan ve azalan H, I, J noktalarının zaman serileri ve hızları (mm/y)……...… 114

Şekil 39. Artan ve azalan verilerin kombinasyonunda eşleştirme yöntemleri……..…... 117

Şekil 40. 20.12.2016–28.01.2020 Artan yörünge LOS enterpolasyon haritası (mm/y)… 119

Şekil 41. 20.12.2016–28.01.2020 Azalan yörünge LOS enterpolasyon haritası (mm/y). 119

Şekil 42. 20.12.2016–28.01.2020 Yıllık düşey (V_Y) hız değerleri (mm/y)……...… 120

Şekil 43. 20.12.2016–28.01.2020 Yıllık yatay (V_D) hız değerleri (mm/y)…… 120

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Sentinel-1 görüntüleme modlarının uydu geliş açıları, konumsal çözünürlükleri ve polarizasyon özellikleri…… 49

Tablo 2. Nivelman noktaları coğrafi koordinatları……. 56

Tablo 3. Nivelman gidiş-dönüş ölçüleri ve ağırlıkları…… 58

Tablo 4. Birinci güzergah dengeli ölçüleri ve ortalama hataları……. 65

Tablo 5. İkinci güzergah dengeli ölçüleri ve ortalama hataları…….. 66

Tablo 6. Üçüncü güzergah dengeli ölçüleri ve ortalama hataları……... 67

Tablo 7. Dördüncü güzergah dengeli ölçüleri ve ortalama hataları……..... 67

Tablo 8. Birinci güzergah uyuşumsuz ölçüler test büyüklükleri ve sınır değerleri…… 68

Tablo 9. İkinci güzergah uyuşumsuz ölçüler test büyüklükleri ve sınır değerleri…….. 69

Tablo 10. Üçüncü güzergah uyuşumsuz ölçüler test büyüklükleri ve sınır değerleri….. 70

Tablo 11. Dördüncü güzergah uyuşumsuz ölçüler test büyüklükleri ve sınır değerleri... 70

Tablo 12. Dengeli nokta yükseklikleri (m) ve ortalama hataları (mm)…… 71

Tablo 13. Nivelman noktalarındaki periyodik düşey yüzey değişimleri (mm)…… 72

Tablo 14. Artan ve azalan Sentinel-1 görüntüleri tarih, sensör ve YYN bilgileri…… 76

Tablo 15. Nivelman ölçülerinden elde edilen periyodik düşey yıllık hızlar (mm/y)…… 92

Tablo 16. StaMPS V_D V_Y hızları ve nivelman (V_y) hızları ile karşılaştırılması……. 102

Tablo 17. V_K hız değerlerinin V_D ve V_y ile gösterimi (mm/y)……... 107

SEMBOLLER DİZİNİ

AOE	: Master Görüntüye ait Atmosfer ve Yörünge Hatası
CPT	: Coherent Pixels Technique (Uyumlu Pikseller Tekniği)
Çk	: Çakıştırılmış Master-Slave Görüntü Dizinleri
DInSAR	: Diferansiyel İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar
D-B	: Doğu-Batı
DePSI	: Delft Persistent Scatterer Interferometry (Delf Daimi Yansıtıcı İnterferometri)
ESA	: European Space Agency (Avrupa Uzay Ajansı)
EW	: Extra Wide Swath (Ekstra Geniş Tarama Alanı)
GNSS	: Global Navigation Satellite System
InSAR	: Interferometric SAR (İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar)
IPTA	: Interferometric Point Target Analysis (İnterferometrik Nokta Hedef Analizi)
IW	: Interferometric Wide Swath (İnterferometrik Geniş Tarama Alanı)
İfg	: İnterferogramı Hesaplanmış Master-Slave Görüntü Dizinleri
K-G	: Kuzey-Güney
LOS	: Line of Sight (Uydu Bakış Doğrultusu)
m	: Master (Birincil) Görüntü
PS	: Persistent/Permanent Scatterers (Daimi Yansıtıcılar)
PSI	: Persistent Scatterer Interferometry (Daimi Yansıtıcı İnterferometre)
PSInSAR^{TM}	: Permanent Scatterer InSAR (Daimi Yansıtıcı InSAR)
PSP	: Persistent Scatterer Pairs (Daimi Yansıtıcı Çiftler)
QPS	: Quasi Persistent Scatterers (Yarı Kalıcı Yansıtıcılar)
RADAR	: RAdio Detecting And Ranging (Radyo Algılama ve Ölçme)
RAR	: Real Aperture Radar (Gerçek Açıklıklı Radar)
s	: Slave (İkincil) Görüntü
SAR	: Synthetic Aperture Radar (Yapay Açıklıklı Radar)
SBAS	: Small Baseline Subset (Küçük Baz Uzunluğu Kümesi)
SCLA	: Spatially Correlated Look Angle (Konumsal Korelasyonlu Bakış Açısı)
ScanSAR	: Taramalı SAR
SM	: Stripmap

SNAP : SeNtinel Application Platform (Sentinel Uygulama Platformu)

SNR : Signal to Noise Ratio (Sinyal Gürültü Oranı)

SPN : Stable Points Network (Sabit Noktalar Ağı)

SRTM : Shuttle Radar Topography Mission

StaMPS : Stanford Method for Persistent Scatterers (Daimi Yansıtıcılar için Stanford Yöntemi)

SULA : Spatially Uncorrelated Look Angle (Konumsal Olarak Korelasyonsuz Bakış Açısı)

SYM : Sayısal Yükseklik Modeli

S-1A : Sentinel-1A

S-1B : Sentinel-1B

TOPSAR : Terrain Observation with Progressive Scan SAR (Kademeli Taramalı SAR ile Arazi Gözlemi)

WV : Wave (Dalga)

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Ülkemizde son zamanlarda deniz dolgusu üzerine inşa edilen yapılar dikkat çekmektedir. Bu yapılara Ordu-Giresun havalimanı, Rize-Artvin havalimanı ve Türkiye'de deniz üzerine inşa edilmiş ilk spor kompleksi ve stadyumu olma özelliği taşıyan Şenol Güneş Spor Kompleksi ya da Stadyumu örnek olarak gösterilebilir. Yapımı çok maliyetli olan bu tür yapılar üzerinde meydana gelen yüzey değişimlerinin belirlenmesi ve izlenmesi, hem meydana gelebilecek can ve mal kayıplarının önlenebilmesi, hem de bu bölge gibi dolgu şeklinde deniz üzerine inşa edilen yapıların güvenilirlikleri ve deformasyon davranışları hakkında bilgi sahibi olunması açısından oldukça önemlidir.

Günümüze kadarki süreçte, yeryüzünün farklı özelliklerdeki farklı türden yapılarında meydana gelen yüzey değişimlerinin ya da deformasyonların izlenmesi, jeodezi ve yer bilimlerinin en önemli konularından birisi olmuştur. Bu amaçla yersel, uydu tabanlı ve uzaktan algılamaya yönelik birçok farklı jeodezik teknik geliştirilmiştir. Bu tekniklerden uzaktan algılama yöntemleri içerisinde yer alan ve kısaca SAR (Synthetic Aperture Radar (Yapay Açıklıklı Radar)) görüntülerinin faz farkları kullanılarak gerçekleştirilen InSAR (Interferometric SAR (İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar)) teknikleri, sağladıkları yüksek noktasal çözünürlükleri, herhangi bir arazi çalışması gerektirmeyen pratik kullanımları ve daha ekonomik olmaları gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadırlar.

Bu tez çalışmasında, ileri InSAR tekniklerinden biri olan StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers (Daimi Yansıtıcılar için Stanford Yöntemi)) PSI (Persistent Scatterer Interferometry (Daimi Yansıtıcı İnterferometre)) yöntemi ve hassas nivelman ölçüleri kullanılarak Şenol Güneş Spor Kompleksi'nin yer aldığı deniz dolgu sahası üzerinde meydana gelen yüzey değişimleri araştırılmıştır.

1.2. Problemin Tanımı

Bu tez çalışmasının ortaya çıkmasına neden olan iki temel problem bulunmaktadır. Bunlardan birincisi deniz dolgusu üzerine inşa edilen ve bu yönüyle hem ülkemizde hem

de dünya üzerindeki ender yapılardan birisi olma özelliğini taşıyan Şenol Güneş Spor Kompleksi ve Stadyumu üzerindeki deformasyonların izlenmesinin gerekliliğidir. Bu tez çalışmasında elde edilen çıktılar sayesinde yapının can ve mal güvenliği açısından herhangi bir tehlike oluşturup oluşturmadığı gözlemlenebilecek ve ileriye yönelik gerekli tedbirler alınabilecektir. Ayrıca bu çalışma, bu türden diğer yapıların deformasyon davranışları hakkında bir ön bilgi edinilmesine de katkı sağlayacaktır.

Dünyada deniz dolgu sahası üzerine inşa edilen bu türden yapıların deformasyonlarının araştırıldığı ve literatür taramasında değinilen diğer çalışmalara bakıldığında, bu çalışmaların ortak yanının, hem dolgu malzemesine hem de üzerinde yer alan farklı türden yapılara bağlı olan, çok kısa mesafelerde bile büyük ölçüde değişebilen heterojen ve dengesiz deformasyonlar olduğu görülebilmektedir. Heterojen ve dengesiz bir biçimde değişim gösteren bir bölgedeki deformasyon olgusunu ortaya çıkarabilmek için noktasal çözünürlüğü yüksek ya da başka bir deyişle yüksek yoğunlukta ölçüm noktası üretebilen tekniklerin kullanılması gerekmektedir. Ayrıca dengesiz yüzey değişimlerinin tespit edilebilmesi için, daha kısa zaman aralıklı verilerin temin edilebilmesi de oldukça önemlidir. Bu açılardan ileri InSAR teknikleri diğer jeodezik ölçme tekniklerine nazaran çok daha avantajlıdır. Bu teknikler sayesinde, daha kısa zaman aralıklarında çok daha fazla sayıda ölçüm noktası üreterek deformasyon olgusunu daha detaylı bir biçimde ortaya çıkarmak mümkün hale gelmiştir. Bu tekniklerden birisi olan StaMPS PSI tekniği ise hem yüksek yoğunlukta nokta üretebilme hem de değişken deformasyonları ortaya çıkarabilme yönüyle ön plana çıkmaktadır. Bu nedenle StaMPS PSI tekniği ile bölgedeki yüzey değişimlerinin belirlenmesi bu tez çalışmasının asıl konusunu oluşturmaktadır.

Dünyanın farklı bölgelerinde bulunan deniz dolgu sahalarında meydana gelen deformasyonların çeşitli ileri InSAR teknikleri ile araştırıldığı çalışmalar incelendiğinde, bu çalışmaların çıktılarının genellikle uydunun artan (ascending) veya azalan (descending) yörünge verilerinden yalnızca birisinin analizine dayanan tek boyutlu sonuçları içerdiği görülebilmektedir. Bu sonuçlar ise uydu bakış doğrultusu (Line of Sight (LOS)) yönünde ya da yatay hareketin olmadığı varsayımıyla düşey yöne dönüştürülerek elde edilen tek boyutlu yıllık ortalama hız verilerini içermektedir. Bu çalışmalar arasında yatay hareketi hesaba katarak, artan ve azalan yörünge verilerinin kombine edilmesiyle yatay (Doğu(D) – Batı (B)) ve düşey yönlerdeki hız değerlerinin elde edildiği çalışma sayısı neredeyse yok denecek kadar az sayıdadır. Aynı şekilde dolgu sahası üzerinde gerçekleştirilen ve bu çalışmanın uygulamaları içerisinde yer alan, hem kombinasyon ile üretilen yatay (D-B) ve

düşey hız bileşenlerinin yer aldığı, hem de hassas nivelman gibi daha hassas jeodezik teknikler ile karşılaştırılarak doğruluk analizinin yapıldığı türden çalışmalara literatürde rastlamak oldukça güçtür. Bunlar haricinde bu çalışmada ayrıca, yine dolgu sahaları üzerinde nadir olma özelliği taşıyan, artan, azalan ve nivelman üçlü veri kombinasyonu ile InSAR tekniklerinin temel problemi olan Kuzey-Güney (K-G) doğrultusundaki hareket bileşenleri de elde edilmiştir. Dolayısıyla bu tez çalışmasının ikinci problemini oluşturan unsur, dünyanın çeşitli bölgelerinde dolgu sahaları üzerinde gerçekleştirilen InSAR teknikleri ile ilgili deformasyon çalışmalarına, daha iyileştirilmiş sonuçlar içeren yeni ve farklı olan bir çalışma kazandırmaktır.

1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı deniz dolgusu üzerine inşa edilen Şenol Güneş Spor Kompleksi ve çevresinde meydana gelen yatay ve düşey yüzey değişimlerinin Sentinel-1 Uydu misyonuna ait SAR görüntüleri kullanılarak StaMPS PSI tekniği ve Hassas Nivelman ölçüleri ile belirlenmesi ve birbirinden bağımsız olan bu iki teknik ile elde edilen sonuçların karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda çalışmanın hedefleri şu şekilde sıralanabilir:

- Nivelman noktalarındaki düşey yüzey değişimlerinin hassas nivelman ölçüleri ile yıllık hızlar olarak belirlenmesi.
- Artan ve azalan yörüngeler üzerindeki Sentinel-1 SAR verilerinin StaMPS PSI tekniği ile değerlendirilmesiyle, yüzey değişimlerinin her iki yörünge üzerinde LOS yönünde yüksek yoğunlukta PS noktaları ile yıllık hız değerleri olarak elde edilmesi.
- Artan ve azalan LOS hızlarının kombine edilmesi ile yatay (D-B) ve düşey yüzey değişimlerinin belirlenmesi.
- StaMPS ve nivelman yöntemleri ile elde edilen düşey yüzey değişimlerinin karşılaştırılarak doğruluk ya da uyumluluk analizinin yapılması.
- Artan ve azalan LOS hız verileri ve nivelman ölçülerinin kombine edilmesi ile nivelman nokta konumlarındaki K-G doğrultusundaki yatay yüzey değişimlerinin belirlenmesi.

Bu tez çalışması dört bölümden oluşmaktadır. Birinci Genel Bilgiler bölümünde geniş bir literatür taramasına değinilerek, tez kapsamında kullanılan yöntem ve veriler hakkında teorik ön bilgiler verilmiştir. İkinci Yapılan Çalışmalar bölümünde yöntemlerin uygulanış biçimleri açıklanmıştır. Üçüncü Bulgular ve İrdelemeler bölümünde yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular ve bu bulgulara göre yapılan değerlendirmeler ifade edilmiştir. Son ve dördüncü bölümde ise Sonuçlar ve Öneriler açıklanmıştır.

1.4. Metodoloji

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen uygulama ve değerlendirmeler şu şekilde sıralanabilir;

- İlk olarak 20.12.2016 - 28.01.2020 tarih aralığındaki, dolgu sahasını çevreleyen çalışma alanını içeren artan ve azalan yörüngeler üzerinde bulunan 6 gün aralıklı tüm Sentinel-1 SAR görüntüleri temin edilmiştir.
- Çalışma alanındaki yüzey değişimlerini daha detaylı ve daha hassas ortaya çıkarabilecek daha fazla sayıda PS noktası elde edebilmek için, çalışma alanını en fazla sayıda yansıtıcı obje pikselleri ile görüntüleyen, en uygun Sentinel-1 verileri genel olarak 12 günlük aralıklar ile geniş bir veri seti içerisinden seçilmiştir. Veriler arasındaki gerekli konumsal korelasyonun sağlanabilmesi için, her iki yörünge üzerinde değerlendirmeye alınacak tüm verilerin kendi içerlerinde aynı geçiş (artan veya azalan), aynı yörünge yolu (track) ve aynı polarizasyonda olması gerekmektedir. Bu kriter dikkate alınarak, bu çalışmada artan geçişte 43 numaralı yörünge yolu üzerinde 95 adet ve azalan geçişte 123 numaralı yörünge yolu üzerinde 96 adet, toplamda da 191 adet VV tekli düşey polarizasyonlu Sentinel-1 SAR verileri kullanılmıştır.
- 17.01.2018 – 28.01.2020 tarih aralığında dolgu sahasında bulunan spor kompleksi üzerinde (39 obje) ve dolgu sahası dışındaki hareketsiz beton zemin üzerinde (2 sabit) tesis edilen toplam 41 noktadan oluşan nivelman ağında, milimetre altı hassasiyetteki hassas nivelman ölçüleri yaklaşık 6 aylık aralıklar ile 5 periyot olarak gerçekleştirilmiş ve nivelman obje noktalarında meydana gelen düşey yüzey değişimleri yıllık ortalama hız değerleri olarak milimetre (mm) / yıl (y) biriminde belirlenmiştir.

- Nivelman ölçülerininkine yakın bir tarih aralığında (14.01.2018 – 28.01.2020) artan ve azalan yörüngeler üzerinde bulunan sırasıyla 63 ve 62 şer adet Sentinel-1 verileri StaMPS PSI yöntemiyle değerlendirilmiştir. Değerlendirmede SNAP (SeNtinel Application Platform (Sentinel Uygulama Platformu)) ve StaMPS yazılımlarının entegrasyonu kullanılmıştır. Görüntülerin hassas yörünge bilgilerinin eklenmesi, master (ana) görüntünün seçilmesi, topoğrafik ve düz yeryüzü faz etkilerinden arındırılmış tekli master-slave (ikincil) görüntü faz farklarını içeren interferogramların elde edilmesi gibi ön işleme adımlarında SNAP yazılımından faydalanılırken, çoklu sayıdaki interferogramların PSI tekniği ile değerlendirilmesinde ise StaMPS yazılımı kullanılmıştır. Ayrıca StaMPS yazılımı ile entegre bir biçimde çalışabilen TRAIN yazılımına ait Lineer Troposferik Faz düzeltme modeli GACOS atmosferik gecikme verileri ile birlikte kullanılarak, verilere atmosferik düzeltmeler getirilmiştir. Böylelikle her iki yörüngede LOS yönündeki yüzey değişimlerini ifade eden yıllık ortalama hız değerleri mm/y biriminde yüksek hassasiyette elde edilmiştir.
- Nivelman ölçümlerinin yapıldığı zamanı içeren 14.01.2018 – 28.01.2020 tarih aralığındaki artan ve azalan LOS hız değerlerinin, nivelman nokta konumlarına enterpolasyonu ve kombinasyonu ile nivelman nokta konumlarındaki yatay (D-B) ve düşey yüzey değişimleri yıllık hız değerleri olarak mm/y biriminde belirlenmiştir.
- Nivelman nokta konumları üzerinde StaMPS PSI tekniği ve hassas nivelman ölçüleri ile elde edilen düşey yıllık hız değerleri karşılaştırılarak, Sentinel-1 verilerinden elde edilen sonuçların doğruluğu incelenmiştir.
- StaMPS PSI tekniği ile elde edilen düşey yıllık hız değerlerinin düşey nivelman hız değerleri ile yüksek hassasiyetteki uyumluluğu görüldükten sonra, artan ve azalan LOS hız verileri ile düşey nivelman hız verilerinin kombinasyonu yapılarak, 14.01.2018 – 28.01.2020 tarih aralığı için nivelman nokta konumlarındaki K-G doğrultusundaki yatay yüzey değişimleri yıllık hız değerleri olarak elde edilmiştir.
- Yaklaşık olarak spor kompleksinin açılış tarihi (18.12.2016) ile dolgu sahasındaki nivelman ölçümlerinin tamamlandığı tarihi içermek üzere, 20.12.2016-28.01.2020 tarihleri arasındaki artan ve azalan yörüngelerdeki sırasıyla 95 ve 96 şar adet Sentinel-1 SAR verilerinin yine aynı şekilde atmosferik düzeltmeler getirilerek StaMPS PSI yöntemiyle değerlendirilmesi ile dolgu sahasında her iki yörüngenin

LOS yönlerinde meydana gelen yüzey değişimleri yıllık ortalama hız değerleri olarak elde edilmiştir.

- Son olarak 20.12.2016 - 28.01.2020 tarih aralığındaki artan ve azalan LOS yönlerindeki yıllık hız verilerinin kombinasyonu ile tüm dolgu sahası üzerindeki yatay (D-B) ve düşey yüzey değişimleri yıllık hız değerleri olarak belirlenmiştir.

1.5. Literatür Taraması

Günümüze kadarki süreçte, yeryüzünün farklı özelliklerdeki farklı türden yapılarında meydana gelen yüzey değişimlerinin ya da deformasyonların izlenmesi, jeodezi ve yer bilimlerinin en önemli konularından birisi olmuştur. Bu amaçla yersel, uydu tabanlı ve uzaktan algılamaya yönelik birçok farklı jeodezik teknik geliştirilmiştir. Bu teknikler arasından, yatay açı, mesafe ve yükseklik farkı ölçmelerine dayanan yersel gözlemler ile uydu bazlı nokta konum belirleme yöntemi olan GNSS (Global Navigation Satellite System) tekniği ilk olarak göze çarpmaktadır. Yersel gözlemler, uygulama güçlüğü, ilk çıkan ölçme aletlerinin yeterince hassas olmaması ve maliyetli olması yüzünden teknolojinin gelişmesiyle birlikte yerini, günümüzde halen deformasyonların belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan, hassasiyet, zaman ve ekonomik açıdan daha avantajlı olan GNSS tekniğine bırakmıştır. Fakat GNSS tekniği de, yüksek milimetrik hassasiyetine rağmen birçok dezavantaja sahiptir. Bu dezavantajları genel olarak bu tekniğin hem nokta tabanlı ve çok uzun saatler süren maliyetli bir ölçme aşaması içeriyor olması, hem de ölçme aşamasından önce, sabit ve obje noktalarının yer seçimleri ve tesislerinin doğru yapılabilmesi adına bir ön çalışma gerektiriyor olması şeklinde sıralayabiliriz. Diğer yandan uzaktan algılama yöntemleri arasında yer alan ve kısaca SAR görüntülerinin faz farkları kullanılarak gerçekleştirilen InSAR teknikleri ise, herhangi bir arazi çalışması ve ön çalışma gerektirmeden (Akçın vd., 2007; Kemaldere, 2011) çok geniş alanlara uygulanabilen pratik kullanımları, aynı büyüklükteki çalışma alanlarında diğer GNSS ve yersel ölçme yöntemlerine nazaran yüzey değişimlerinin daha detaylı izlenmesine imkan veren çok daha fazla sayıdaki ölçüm noktalarını üretebilme kapasiteleri ile birlikte sağladıkları kısa zamansal periyotları ve ayrıca verilerinin ücretsiz olarak ya da diğer tekniklere nazaran çok daha düşük ücretler ile elde edilebildiği çok daha ekonomik olmaları gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadırlar.

InSAR aynı alana ait, birbirine çok yakın görüntüleme geometrileriyle farklı zamanlarda elde edilen iki SAR görüntüsü arasında oluşan faz farkının hesaplanmasına dayanan bir tekniktir (Massonnet ve Feigl, 1998; Hanssen, 2001; Madsen ve Zebker, 1998; Burgmann vd., 2000; Rosen vd., 2000; Gens ve Van Genderen, 1996). Bu teknikte faz farkının hesaplanması ile elde edilen görüntüye ise interferogram denilmektedir (Zebker ve Goldstein, 1986). İlk InSAR uygulamaları 1970'li yıllarda Venüs gezegeninin izlenmesi (Rogers ve Ingalls, 1969) ve Ay'ın yüzeyinin belirlenmesi (Zisk, 1972a, 1972b) üzerine yapılan çalışmalarda kullanılmıştır. Başlarda uzay gözlemleri için kullanılan bu yöntem, sonradan ilk kez Graham (1974) tarafından bir hava radar aracıyla dünya yüzeyinin topoğrafik haritalanması amacıyla kullanılmıştır. 26 Haziran 1978 tarihinde ilk kez NASA (National Aeronautics and Space Administration) tarafından oşinografik araştırmalar yapmak amacıyla geliştirilen, 3 günlük geçiş tekrarlılığına sahip SEASAT uydusu kullanılarak, SAR yöntemi ile uzaydan yeryuvarının görüntülenmesine başlanılmıştır (Massonnet ve Feigl, 1998). Zebker ve Goldstein (1986), havadan radar kullanarak elde ettikleri görüntülerden ürettikleri interferogram ile San Francisco Körfez Bölgesinin bir kısmının ABD jeolojik haritaları ile yüksek derecede uyumlu topoğrafik haritasını çıkarmışlardır.

InSAR tekniğinin iki interferogramın farkına dayanan bir uygulaması olan Diferansiyel İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (DInSAR) tekniği ise ilk kez, Gabriel vd. (1989) tarafından yapılan çalışmada, California Imperial Valley'de geniş tarım sahalarında meydana gelen yer kabarmalarının belirlenmesi için kullanılmıştır. Üç adet SEASAT SAR görüntüsü kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışmada, topografya ve arazi yüzey değişimleri için 2 adet interferogram kullanılarak bir fark interferogramı üretilmiştir. Massonnet vd. (1993), 1992 yılında gerçekleşen Landers depremini, 1991 yılında ESA (European Space Agency (Avrupa Uzay Ajansı)) tarafından uzaya fırlatılan ERS-1 SAR uydu verilerini kullanarak incelemiş ve topoğrafyadan kaynaklanan etkileri ortadan kaldırabilmek için Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) kullanmıştır. Aynı deprem üzerinde Zebker vd. (1994) tarafından yapılan çalışmada ise, SYM yerine üçlü geçiş yöntemi kullanılmıştır ve bu yöntemin yersel ölçüler ile tutarlı olduğu görülmüştür. Bu yöntemde birbirine yakın zamanda alınan iki SAR görüntüsü ile interferogram oluşturularak bölgenin SYM si elde edilmektedir. Daha sonra üçüncü görüntü ile diğer iki görüntüden herhangi biriyle üretilen interferogramdan SYM çıkartıldığında, topoğrafyadan kaynaklanan etkiler ortadan kaldırılmaktadır.

1980'li yılların sonlarından beri kullanılmakta olan geleneksel DInSAR tekniği günümüze kadarki süreçte sağladığı geniş kapsama alanlı ve yüksek noktasal çözünürlüklü verileri sayesinde, volkanik deformasyonlar (Dirscherl ve Rossi, 2018), sismik deformasyonlar ve depremler (Erten vd., 2010; Feng vd., 2014; Wang vd., 2014), buzul hareketleri (Shugar vd., 2012; Erten, 2013; Eriksen vd., 2017) ve heyelanlar (Calabro vd., 2010; Thomas vd., 2014) gibi farklı tipteki yüzey hareketlerinin tespit edilmesi ve belirlenmesinde, önemli ve etkili bir jeodezik araç olmuştur. Ancak, bu tekniğin doğruluğu zamansal ve konumsal korelasyonsuzluklar ve atmosferik homojensizliklerle sınırlandırılmaktadır (Zebker ve Villasenor, 1992; Rodriguez ve Martin, 1992; Ferretti vd., 2001). Burada kastedilen zamansal korelasyonsuzluklar, InSAR ölçülerini piksel içerisindeki yansıtıcı obje konumlarının zamanla değiştiği bitki örtülü alanlar üzerinde gerçekleştirilemez kılmakta, geometrik korelasyonsuzluklar ise uydunun aynı bölgeye ait görüntü alım geometrileri arasındaki baz uzunluğunun kritik değerine bağlı olarak interferometrik uygulamalar için uygun olan görüntü çiftlerinin sayısını sınırlamakta ve mevcut veri setinin tam olarak kullanmasını engellemektedir (Zebker ve Villasenor, 1992; Rodriguez ve Martin, 1992; Ferretti vd., 2001). Atmosferik homojensizlikler de her bir SAR görüntüsü üzerinde deformasyonun izlenmesine engel olan bir Atmosferik Faz Ekranı oluşturmaktadır (Ferretti vd., 2001). Tüm bu sınırlamaların üstesinden gelebilmek için, çoklu sayıdaki SAR verilerinin zaman serileri ile analizine dayanan ve yeryüzü hareketlerinin birkaç mm hassasiyet ile tespit edilebilmesine olanak tanıyan (Ferretti vd., 2001; Hooper vd., 2004; Kampes, 2005) birçok sayıda İleri InSAR tekniği geliştirilmiştir. Bu tekniklerden en önemlileri: Daimi Yansıtıcı InSAR (Permanent Scatterer InSAR (PSInSAR^{TM})) (Ferretti vd., 1999, 2000, 2001); Küçük Baz Uzunluğu Kümesi (Small Baseline Subset (SBAS)) (Berardino vd., 2002; Lanari vd., 2007a); İnterferometrik Nokta Hedef Analizi (Interferometric Point Target Analysis (IPTA)) (Werner vd., 2003); Daimi Yansıtıcılar için Stanford Metodu (Stanford Method for Persistent Scatterers (StaMPS)) (Hooper vd., 2004, 2007; Hooper, 2006, 2008); Delf Daimi Yansıtıcı İnterferometri (Delft Persistent Scatterer Interferometry (DePSI)) (Kampes, 2005, 2006); Uyumlu Pikseller Tekniği (Coherent Pixels Technique (CPT)) (Blanco-Sanchez vd., 2008); Daimi Yansıtıcı Çiftler (Persistent Scatterer Pairs (PSP)) (Costantini vd., 2008, 2012); Sabit Noktalar Ağı (Stable Points Network (SPN)) (Crosetto vd., 2008; Kuehn vd., 2010); SqueeSAR^{TM} (Ferretti vd., 2009, 2011); Yarı Kalıcı Yansıtıcılar (Quasi Persistent Scatterers (QPS)) (Perissin ve Wang, 2012) teknikleri olarak sıralanabilir.

İlk olarak 1990'lı yılların sonlarında keşfedilen İleri InSAR teknikleri son yirmi yıl içerisinde farklı özelliklere sahip, farklı nedenlerden kaynaklanan ve farklı tiplerdeki yüzey hareketlerinin izlenmesi ile ilgili yapılan çalışmalarda oldukça geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Bu çalışmalara örnek vermek gerekirse: Volkanik ve tektonik kaynaklı deformasyonlar (Hooper vd., 2004, 2012; Casu vd., 2006; Stramondo vd., 2007; Ruch vd., 2009; Sowter vd., 2016), sismik deformasyonlar (Gourmelen vd., 2010; Antonielli vd., 2016; Wang vd., 2020), buzul hareketleri (Du vd., 2020), heyelanlar (Colesanti vd., 2003; Colesanti ve Wasowski, 2006; Farina vd., 2006; Hastaoglu, 2016; Aslan vd., 2020; Yazici ve Gormus, 2022), bina deformasyonları (Yang vd., 2016; Schunert ve Soergel, 2016), baraj deformasyonları (Grenerczy ve Wegmüller, 2013), yer altı su seviyesi değişikliklerinden kaynaklanan jeotermal alanlardaki yüzey deformasyonları (Maghsoudi vd., 2018), tünel kaynaklı zemin çökmeleri (Milillo vd., 2018), yer altı suyunun çıkarılması (Aobpaet vd., 2013; Chaussard vd., 2014; Luo vd., 2014; Gao vd., 2016; Chen vd., 2016), çekilmesi (Osmanoğlu vd., 2011; Zhou vd., 2018), aşırı kullanımı (Hu vd., 2014) ve aşırı kullanımıyla birlikte yakın bölgedeki fay hareketleri (Yang vd., 2014) kaynaklı zemin üzerinde meydana gelen çökmeler, madencilik faaliyetlerinden (Liu vd., 2014), kentleşme çalışmaları ya da sürecinden (Stramondo vd., 2008; Dong vd., 2014; Solari vd., 2016) kaynaklanan zemin çökmeleri, toprak altı kazıları, yeraltı su rezervuarlarının doldurma-boşaltma döngüleri ve volkanik-tektonik fayların yeniden aktif hale gelmesi gibi birden çok nedene bağlı olarak oluşan çöküntülerin (Terranova vd., 2015), sebepleriyle birlikte ilişkilendirilerek izlenmesi ve belirlenmesi üzerine gerçekleştirilen bir çok çalışma bulunmaktadır.

İleri InSAR tekniklerinin, bu tez çalışmasının konusunu oluşturan dolgu alanları üzerindeki uygulamalarına da rastlamak mümkündür. Jiang ve Lin (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 12.48 km^2 alanıyla dünyadaki en büyük deniz dolgu alanlarından birisi olan Hong Kong Uluslararası Chek Lap Kok Havalimanı'nda 2003 ve 2008 yılları arasında meydana gelen zemin oturmaları araştırılmıştır. Toplamda artan geçiş yörüngesinde 25, azalan geçiş yörüngesinde ise 22 ENVISAT ASAR görüntüsünün IPTA yöntemi ile işlendiği bu çalışmada, her iki yörüngede de km^2 başına 230'dan fazla yansıtıcı nokta hedefi (Point Target (PT)) elde edilerek LOS yönünde -10 mm/y a varan değişimler gözlemlenmiştir. Ayrıca bölgede bulunan nivelman istasyonlarında gerçekleştirilen nivelman ölçülerinden elde edilen düşey hız değerleri, yatay hareketin olmadığı varsayımıyla, uydu verilerinin elde edildiği artan ve azalan geçişlerdeki LOS

geometrilerine dönüştürülerek, belirli bir mesafe (50-100m) içerisinde yer alan yansıtıcı noktaların LOS yönündeki hız değerleri ile farkları alınarak karşılaştırılmış ve artan yörünge üzerinde 1.3 mm/y ortalama fark ve 1.6 mm/y standart sapma, azalan yörüngede ise 1.1 mm/y ortalama fark ve 2.1 mm/y standart sapma değerleri ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Son olarak da zemin üzerinde farklı oranlarda meydana gelen oturmaların zeminin dolgu malzemelerinin ve dolgunun altında bulunan alüvyal çökellerin farklı tiplerdeki toprak özellikleri ve kalınlıklarından kaynaklandığı ileri sürülmüştür. Jiang vd. (2011) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 2006 temmuz ve 2009 mart arasında azalan geçişteki 22 adet ENVISAT görüntüsü kullanılarak Çin'in güney kısmında yer alan ve 29.2 km^2 alan kaplayan bir kıyı kenti olan Makao Özel İdari Bölgesinde, deniz üzerine dolgu yapılarak inşa edilen bölgelerdeki deformasyonlar IPTA tekniği ile incelenmiş ve bölgenin dolgu yapısı ve bu yapının üzerinde yer alan binaların oluşturduğu farklı yüklenme ve oturmalardan kaynaklanan değişimler LOS yönünde -25 mm/y ile +5 mm/y arasında değişken oranlarda gözlemlenmiştir. Bu çalışmada da Jiang ve Lin (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada olduğu gibi, bölgede bulunan nivelman istasyonlarındaki değişimler, yatay hareketin etkisi hesaba katılmadan, uydu verilerinin elde edildiği azalan geçişteki LOS geometrisine dönüştürülerek, 49-131 m uzaklıkta bulunan yansıtıcı noktaların deformasyon değerleri ile farkları alınarak karşılaştırılmış ve 1.1 mm/y ortalama fark ve 2.4 mm/y standart sapma değerleri ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca çalışma sonucunda km^2 başına ortalama 490 yansıtıcı nokta elde edilerek, çalışma alanının küçük bir bölgesini oluşturan Makao Uluslararası Havalimanında özellikle pist üzerinde yeterli sayıda yansıtıcı noktanın elde edilememesi insan yapımı köşeli yapıların azlığına bağlanılmıştır. Sun vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, deniz dolgu sahası üzerine inşa edilen Hong Kong Uluslararası Havalimanı ve Hong Kong Bilim Parkı üzerinde meydana gelen zemin oturması tipindeki deformasyonlar 2008-2009 yılları arasında azalan geometride elde edilen TerraSAR-X görüntüleri kullanılarak IPTA ve DSI (Distributed Scatterers Interferometry (Dağılmış Yansıtıcı İnterferometri)) teknikleri ile araştırılmış ve +5 mm/y ile -20 mm/y arasında LOS yönünde değerler elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan IPTA tekniğinin, çatı, deniz duvarı, binalar ve demir yolu ray hatları gibi insan yapımı yapıların bulunduğu bölgelerde yüksek sayıda yansıtıcı nokta üretmede başarılı olduğu ancak, diğer bölgelerde yeteri sayıda yansıtıcı nokta üretemediği görülmüştür. Diğer yandan DSI tekniğinin ise IPTA tekniğine nazaran bitkisel alanlarda, asfalt zeminde, kısa bitki örtüsüne sahip ekili olmayan arazilerde ve diğer gelişmekte olan

bölgelerde çok daha fazla sayıda yansıtıcı nokta üreterek, toplamda Hong Kong Havalimanında 7.8 kat ve Hong Kong Bilim Parkı üzerinde 3.7 kat daha fazla yansıtıcı nokta elde ettiği görülmüştür. Yang vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise Çin'in Şangay eyaletinde yer alan ve 133.3 km^2'lik kısmı deniz dolgusu üzerinde bulunan Lingang Yeni Şehri'nde 2007-2010 yılları arasında meydana gelen yüzey deformasyonları sırasıyla X, L ve C bantlarındaki 11 TerraSAR-X, 20 ALOS PALSAR ve 35 ENVISAT ASAR görüntüsü kullanılarak SBAS yöntemiyle incelenmiş ve kıyıya yakın olan 2002 yılında doldurulmuş dolgu sahasında -20 mm/y, 13 yılı aşkın süre önce dolgusu tamamlanmış olan iç kesimlerde ise +10 mm/y a varan değişimler LOS yönünde tespit edilmiştir. İç ve kıyı kesimlerinde yükselme ve çökme gibi farklı yönlerde elde edilen yüzey deformasyonları, bu bölgelerin dolgu tarihleri arasındaki büyük zamansal farklar, dolgunun jeolojik özellikleri ve zemin mekanikleri ile ilişkilendirilmiştir. Yapılan çalışmada ayrıca, her üç veri setinden elde edilen sonuçlar, yatay hareket ihmal edilerek ve LOS yönündeki hızlar düşeye dönüştürülerek 100 m civarında bulunan istasyonlardaki nivelman ölçüleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda nivelman-SAR veri farklarının ortalamaları (0.2 – 2.7 mm/y arasında) ve standart sapmaları (4 – 5.3 mm/y arasında) birbirine yakın değerler olarak tespit edilerek, küçük farklar ile en doğru sonuçların C bandında görüntü alımı yapan ENVISAT verileri ile elde edildiği gözlemlenmiştir. Hu vd. (2019) tarafından, Çin'in Shenzhen kenti ve Hong Kong Özel İdari Bölgesi'nde deniz dolgusu üzerine inşa edilen kentsel alanlardaki yüzey deformasyonlarının 34 Sentinel-1 görüntüsü ve 16 adet GNSS CORS istasyonu ile incelendiği çalışmada ise, Sentinel-1 görüntüleri SBAS ve PSInSAR yöntemleri ile değerlendirilmiş ve üç farklı teknikle elde edilen sonuçların yıllık düşey deformasyon oranları ve trendleri açısından yapılan karşılaştırmalarında uyumlu sonuçlar elde edilerek, çalışma alanındaki en büyük çökme oranlarının trafik altyapı tesislerinin bulunduğu ve dolgu çalışmalarının yakın zamanda tamamlandığı alanlarda görüldüğünü ifade edilmiştir. Ayrıca çalışmada yaklaşık 69-70 km^2 büyüklüğünde olan iki farklı dolgu alanında toplamda PSInSAR tekniği ile 1519, SBAS tekniği ile ise 10039 yansıtıcı ölçüm noktası elde edildiği görülmüştür. Erten ve Rossi (2019) çalışmasında ise, Rize'nin deniz dolgusu üzerine inşa edilen kıyı kesimleri üzerindeki yüzey deformasyonları 2015-2018 yılları arasında artan geçiş geometrisinde elde edilen 92 adet Sentinel-1 görüntüsü kullanılarak PSInSAR tekniği ile araştırılmış ve LOS yönünde -15.5 mm/y a varan değişimler gözlemlenmiştir. Çalışmada başlangıçta daimi yansıtıcı piksel aday sayılarının seçiminde

kullanılan ve bir piksel üzerindeki tüm interferogramlar boyunca elde edilen genlik veya yansıma değerlerinin standart sapmasının ortalamasına oranını gösteren Genlik Dağılım İndeksi değeri Ferretti vd. (2001) tarafından önerilen 0.25 yerine 0.6 seçilerek, özellikle deniz duvarı üzerinde fazla sayıda daimi yansıtıcı nokta elde edilmiştir. Böylece Sentinel-1 SAR görüntüleri ile PSInSAR tekniğinin fazla sayıda yansıtıcı ya da ölçüm noktası üreterek, dolgu sahalarındaki insan yapımı betonarme yapıların yüzey değişimlerinin izlenmesi üzerindeki etkinliği gösterilmiştir. Bayik ve Abdikan (2021) çalışmasında ise deniz dolgusu üzerine inşa edilen Ordu-Giresun havalimanı üzerinde 2015-2020 yılları arasında meydana gelen yüzey değişimleri araştırılmıştır. Bu çalışmada diğer dolgu sahası InSAR çalışmalarından farklı olarak, artan ve azalan yörüngeler üzerinde elde edilen yıllık ortalama LOS hız değerlerinin kombinasyonu ile yatay (doğu-batı) ve düşey yönlü yüzey değişimleri elde edilmiştir. Bunun için artan ve azalan yörüngeler üzerinde sırasıyla 165 ve 158 Sentinel-1 SAR verisi kullanılmıştır. Artan ve azalan yörüngelerde sırasıyla -6 mm/y ve -9 mm/y değerlerine varan değişimler ile birlikte, bunların kombinasyonları ile düşeyde -11 mm/y ve yatayda batıya doğru -5 mm/y değerlerine varan değişimler gözlemlenmiştir.

İleri InSAR teknikleri arasında ilk ve en fazla alıntı yapılan tekniğin Ferretti vd. (1999, 2000, 2001) tarafından geliştirilen PSInSAR tekniği olduğu görülmektedir (Osmanoğlu vd., 2016). Bu teknikte çoklu sayıdaki SAR görüntülerinin uzun zamansal serilerinin analizinde, yansıtma özelliğini koruyarak doğal bir reflektör özelliği gösteren daimi yansıtıcı noktalar genellikle insan yapımı betonarme yapıların üzerinde fazla sayıda elde edilebilmektedirler. Bu teknikle ilgili ilk çalışma olan Ferretti vd. (1999) tarafından İtalya'nın Camaiore kasabası üzerinde 45 adet ERS SAR görüntüsü kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada, oluşturulan interferogramlardaki sürekli olarak tekrar eden doğal yansıtıcı objelerin bulunduğu piksel noktaları Daimi Yansıtıcılar (Permanent Scatterers (PS)) olarak ilk kez tanımlanarak, bunlardan yüzey hareketlerinin izlenmesi amacıyla doğal bir GPS ağı gibi yararlanılabileceği ifade edilmiştir. Bu teknikle ilgili olarak Ferretti vd. (2001) tarafından gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise ERS SAR görüntüleri kullanılarak İtalya'nın Ankona kentinde uzun yıllar boyunca meydana gelen yüzey değişimleri incelenmiş ve elde edilen sonuçların nivelman ölçüleri ile karşılaştırması yapılarak doğruluğu onaylanmıştır. Arazideki doğal reflektörlerin veya PS objelerin tanımlanması ve kullanılmasına ilişkin olarak detaylı bilgi veren bu çalışmada, PS objelerin boyutlarının genellikle olduğu gibi piksel boyutundan küçük olması halinde, uyduların tekrar geçiş geometrilerindeki baz uzunluklarının kritik değeri aştığı konumsal

olarak korelasyonsuz interferogramlarda bile iyi bir uyumluluk elde edilebildiği ifade edilmiştir. Bu çalışmada ayrıca, bu teknik ile PS pikselleri üzerinde atmosferik homojensizliklerden kaynaklanan Atmosferik Faz Ekranı etkilerinin tahmin edilerek kaldırılabildiği ve böylelikle metre altı hassasiyette SYM ve milimetrik hassasiyette yeryüzü hareketlerinin belirlenebildiği ortaya konmuştur. Ferretti vd. (2007a) tarafından gerçekleştirilen deneysel bir çalışmada ise 2 çift yansıtıcı dihedral reflektör görüntü alım tarihleri arasında doğu-batı ve düşey yönlerde milimetrik olarak hareket ettirilerek, bu hareketlerin SAR verileri ve PSInSAR tekniği ile milimetre altı hassasiyette tespit edilebileceği ortaya konmuştur. Uygulamada RADARSAT ve ENVISAT uydu misyonlarına ait, yaklaşık 2-3 senelik zaman aralığını kapsayan artan ve azalan yörüngelerdeki SAR verileri kullanılmıştır.

Ferretti vd. (2001) tarafından geliştirilen PSInSAR tekniği özellikle kentsel alanlarda fazla sayıda PS noktası üreterek yeryüzünde meydana gelen değişimlerin yüksek doğrulukta tespit edilmesinde oldukça etkili bir yöntem olmasına rağmen, insan yapımı betonarme yapıların bulunmadığı kentsel olmayan alanlarda ise yeterli miktarda PS noktası üretememektedir (Hooper vd., 2004, 2007; Hooper, 2006). Hooper vd. (2004, 2007) tarafından geliştirilen StaMPS PSI tekniği ise kentsel olsun veya olmasın tüm arazilerde yeterli miktarda PS noktası üretebilmektedir. Bu teknik, PS piksellerini tanımlamada, PSInSAR tekniğinde kullanılan zamansal fonksiyonel model yerine, faz ölçülerinin konumsal korelasyonunu kullanmakta ve değişken bir şekilde deformasyona maruz kalan alanlarda bile hiçbir ön bilgi gerektirmeden başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir (Hooper, 2006). Bu tekniğin ilk ortaya çıktığı Hooper vd. (2004) tarafından yapılan çalışmada, StaMPS tekniğinin insan yapımı nesnelerden yoksun ve düzensiz bir biçimde deforme olan doğu Kaliforniya'daki Long Valley Volkanik Kalderası üzerinde 1992-2000 yılları arasında azalan yörüngede elde edilen 22 adet ERS-1 ve ERS-2 SAR verisi ile uygulanabilirliği denenerek, Ferretti vd. (2001) algoritması ile yeterli yoğunlukta güvenilir bir PS piksel seti bulunamayan (km^2 başına 0.1 PS noktasından daha az yoğunlukta) bu alana başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Uygulama sonucunda km^2 başına 44 PS noktası elde edilmiştir. Hooper vd. (2007) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise aynı teknik, geleneksel InSAR tekniğinin yanardağın üst kısımlarında yer alan yoğun bitki örtülü alanların pikseller üzerinde meydana getirdiği zamansal korelasyonsuzluklar nedeniyle başarısız olduğu Alkedo Volkanı'na başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Uygulama sonucunda LOS yönünde elde edilen değerler bölgenin özelliğine göre yatay ve düşey

yönlü hareketlerin bileşkesi olarak değerlendirilmiştir. Hooper (2008) tarafından İzlanda'da yer alan Eyjafjallajökull Volkanı çevresinde gerçekleştirilen çalışmada ise, StaMPS PSI ve SBAS yöntemlerinin birleştirildiği yeni bir model ortaya konmuştur. Bu model ile her iki yöntemle ayrı ayrı elde edilen sonuçlara nazaran, deformasyon sinyali daha fazla PS noktası tanımlanarak ve daha iyi bir sinyal-gürültü oranı ile elde etmiştir.

Bu tez çalışmasında ise, çalışma alanının hem düşük performanslı (Bektaş, 2019) dolgu malzemesi üzerine inşa edilmiş olması, hem de üzerinde birçok farklı türden yapıyı içeriyor olmasından dolayı, değişken ve heterojen bir biçimde deforme olacağı düşünülmüştür. Bu nedenle bu değişimleri daha fazla PS noktası tanımlayarak daha iyi bir şekilde ortaya çıkarabilecek StaMPS PSI tekniği kullanılmıştır.

Dünya genelinde gerçekleştirilen InSAR ve ileri InSAR teknikleri ile ilgili çalışmaların çoğu artan veya azalan geçiş geometrilerinden yalnızca birisi üzerinde yapılan değerlendirmeler ve LOS yönünde elde edilen tek boyutlu sonuçlardan oluşmaktadır. Bu LOS yönündeki tek boyutlu yıllık ortalama hız değerleri çalışma alanında meydana gelen yatay ve düşey yüzey değişimlerinin uydu bakış doğrultusu üzerindeki bileşkesini ifade ederler (Hanssen, 2001; Fialko vd., 2001). Bu tek boyutlu değerlerin, bölgede meydana gelen yüzey değişimlerinin yatay ve düşey yönü ve büyüklüğü açısından yorumlanması oldukça zordur (Fuhrmann ve Garthwaite, 2019). Bu nedenle yapılan çalışmaların çoğu yatay ve düşey hareketlerin olmadığı varsayımıyla elde edilen sonuçlara dayanmaktadır. Bu çalışmaların büyük bir kısmı ise çalışma alanındaki yatay hareketlerin ihmal edildiği ve LOS hız değerlerinin uydu geliş açısı kullanılarak düşey hız değerlerine dönüştürüldüğü sonuçları içermektedir. Bu yaklaşım ile özellikle yatay hareketin neredeyse hiç olmadığı ya da toplam yüzey hareketine veya düşey harekete nazaran çok küçük bir oranla meydana geldiği bölgelerde doğru sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu durumun görüldüğü en güzel örneklerden biri Jiang ve Lin (2010) tarafından dolgu sahası üzerinde gerçekleştirilen çalışmadır. Bu çalışmada, aynı çalışma alanına ait artan ve azalan geçiş geometrilerinden ayrı ayrı elde edilen LOS doğrultusundaki hız değerlerinin, pozitif yönde uyduya yaklaşma ve negatif yönde uydudan uzaklaşma hareket yönü ve hareketin büyüklüğü açısından benzer sonuçlar gösterdiği ve LOS doğrultusuna dönüştürülmüş nivelman hız verileriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Fakat bu yaklaşım, yatay hareketin ihmal edilemeyecek kadar büyük olduğu ya da toplam yüzey hareketine oran olarak etkisinin fazla olduğu durumlarda, yatay hareketin ve geliş açısının büyüklüğüne bağlı olarak büyük hatalara yol açabilmektedir (Fuhrmann ve Garthwaite, 2019). Böylelikle aynı bölgede, artan ve azalan

yörüngelerde hem LOS doğrultusunda hem de düşey doğrultuya dönüştürülerek elde edilen yıllık hız değerleri arasında yön ve büyüklük olarak büyük farklılıklar gözlemlenebilmektedir. Bu durum yatay hareketin farklı görüntüleme geometrilerindeki LOS doğrultularında, farklı yönlerde algılanmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, yatay ve düşey hareketlerin tespit edilmesinde tek bir görüntüleme geometrisine göre yapılan çözümler yerine, iki veya daha fazla sayıda görüntüleme geometrisi kullanılarak gerçekleştirilen çözümler ile çok daha doğru sonuçlar elde edilebilmektedir (Hu vd., 2014; Fuhrmann ve Garthwaite, 2019). Yatay ve düşey yıllık ortalama hız değerlerinin InSAR verilerinden türetilmesinde farklı yöntemlerin kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmaların bir kısmı sadece nivelman (Fuhrmann vd., 2015), sadece GNSS (Hu vd., 2011; Samsonov ve Tiampo, 2006; Catalao vd., 2011) ve hem GNSS hem de nivelman istasyonlarında (Caro Cuenca vd., 2011; Fuhrmann vd., 2015) yapılan farklı grup jeodezik ölçülerden faydalanırken, diğer bir kısmı ise sadece çoklu görüntüleme geometrilerindeki SAR verilerinin kullanılması ile gerçekleştirilmiştir. Bazı araştırmacılar (Hu vd., 2014; Fuhrmann ve Garthwaite, 2019) aynı veya farklı uydu misyonlarına ait üç veya daha fazla sayıdaki farklı görüntüleme geometrisinde bulunan verilerden faydalanırken, bir çok araştırmacı (Lundgren vd., 2004; Borgia vd., 2005; Manzo vd., 2006; Lanari vd., 2007b; Grenerczy and Wegmüller, 2013; Motagh vd., 2017; Foumelis, 2018; Aslan vd., 2019; Blasco vd., 2019; Fuhrmann ve Garthwaite, 2019; Awasthi vd., 2022) aynı uydu misyonuna ait artan ve azalan geometrilerden elde edilen verileri kombine etmiştir. Kombinasyon aşamasında artan ve azalan LOS hız vektörlerinin doğu-batı, kuzey-güney ve düşey eksen hız vektörleri ile uydu geliş ve azimut yönü açıları cinsinden eşitlikleri ve enterpolasyon tekniklerinden faydalanılmıştır.

Bu tez çalışmasında ise, Sentinel-1 uydu misyonuna ait artan ve azalan geçiş geometrilerinden LOS yönünde elde edilen verilerin ve nivelman verilerinin kombinasyonu ile yatay ve düşey yıllık hız değerleri elde edilmiştir.

İleri InSAR teknikleri diğer jeodezik tekniklerle kıyaslanabilen yüksek hassasiyette ölçü verileri sağlamaktadırlar. Bu verilerin kıyaslanması ile elde edilen sonuçların doğruluk analizi yapılabilmektedir. Karşılaştırmalar genel olarak GNSS tekniği (Ng vd., 2012a, 2012b; Hastaoglu, 2016; Hu vd., 2019), nivelman (Casu vd., 2006; Manzo vd., 2006; Jiang ve Lin, 2010; Jiang vd., 2011; Aobpaet vd., 2013; Gao vd., 2016; Yang vd., 2018) ve doğrultu-kenar (Yazici ve Gormus, 2022) ölçüleri ile yapılmakta ve iki farklı veri grubunun karşılaştırma ekseni olarak hem SAR LOS doğrultusu hem de yatay ve düşey

eksenler kullanılabilmektedir. Karşılaştırmalar bizzat araziye tesis edilen yansıtıcı reflektörler (Ferretti vd., 2007a) üzerinde alınan ölçüler aracılığı ile yapılabildiği gibi, çoğu zaman olduğu gibi SAR ve diğer grup ölçü verilerinin nokta konumları çakışmadığında, enterpolasyon yöntemleri (Casu vd., 2006; Gao vd., 2016; Hastaoglu, 2016; Yazici ve Gormus, 2022) ya da enterpolasyon yapılmadan nokta sayısı az olan diğer jeodezik veri grubundaki her bir noktanın belirli bir mesafedeki kapsama alanı içerisine giren tüm yansıtıcı ölçüm noktaları ile farklarının analizi (Jiang ve Lin, 2010; Jiang vd., 2011; Yang vd., 2018; Sun vd., 2018) şeklinde de yapılabilmektedir.

Bu tez çalışmasında ise artan ve azalan geçişlerdeki LOS hız değerlerinin enterpolasyonu ve kombinasyonu ile elde edilen düşey hız bileşenleri, bölgede tesis edilen noktalarda milimetre altı hassasiyette gerçekleştirilen hassas nivelman ölçülerinden elde edilen düşey hız değerleri ile karşılaştırılmıştır.

InSAR çalışmalarını önemli kılan iki özellikten biri, tüm jeodezik çalışmalarda olduğu gibi elde edilen doğruluk, diğeri ise deformasyon olgusunu daha iyi ortaya çıkarabilecek yansıtıcı ölçüm noktası yoğunluğudur. Bu tez çalışmasında ise hem artan hem de azalan yörüngeler üzerinde çalışma alanını saran oldukça yüksek yoğunlukta PS nokta kümeleri elde edilmiştir. Ayrıca deniz dolgu sahasında gerçekleştirilen çoğu InSAR çalışmasından farklı olarak, yatay hareketin ihmal edildiği ve tespit edilmediği sonuçlar yerine, daha doğru bir yaklaşımla artan ve azalan geometrilerden kombine edilmiş ve hassas nivelman ölçüleri ile karşılaştırılarak doğruluğu onaylanmış verilerden daha iyi hata oranları ile daha hassas sonuçlar elde edilmiştir.

1.6. SAR Tekniğinin Temel Prensipleri

Bu tez çalışmasında ileri InSAR tekniklerinden birisi olan StaMPS-PSI tekniği kullanılmıştır. Bu tekniği açıklamadan önce, bu tekniğin temelini oluşturan SAR, InSAR ve DInSAR tekniklerine değinmek gerekmektedir.

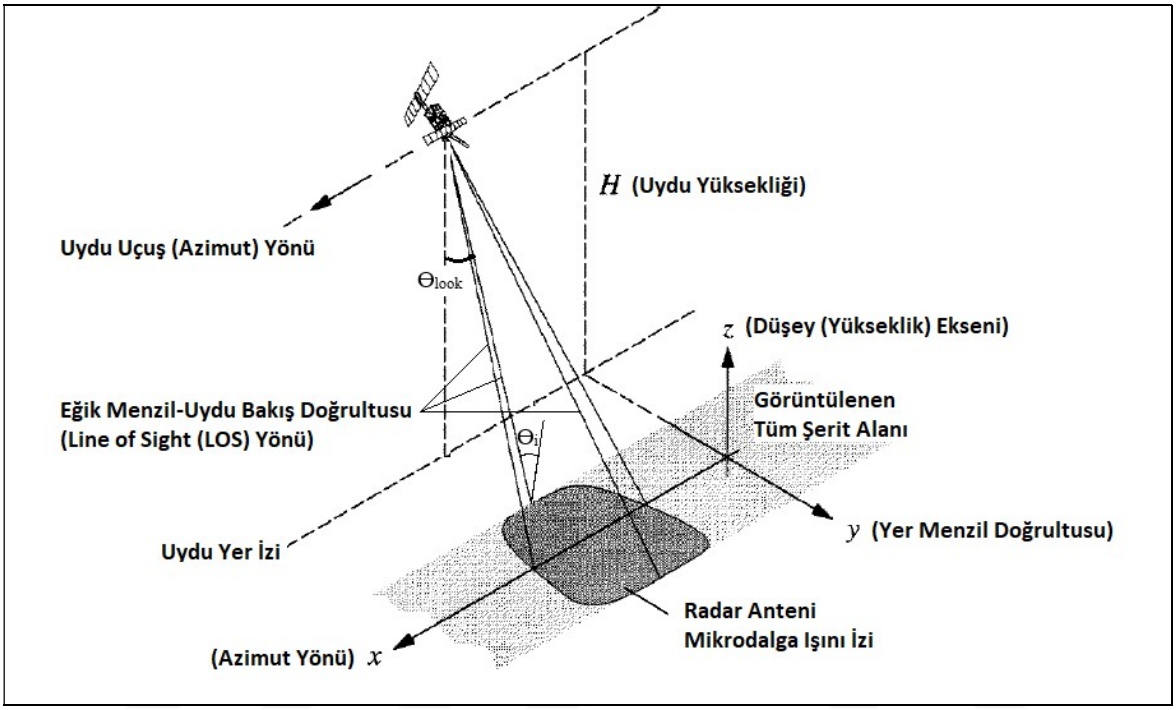
SAR genellikle uydu platformlarında kullanılan, yan bakışlı bir uzaktan algılama ve görüntüleme tekniğidir. SAR sistemlerinin temelini hem bir görüntüleme ve ölçme tekniği, hem de bir algılama cihazı olan RADAR (RAdio Detecting And Ranging (Radyo Algılama ve Ölçme)) tekniği oluşturmaktadır. RADAR tekniğinin çalışma prensibi genel olarak, bir sinyal üretici tarafından elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesinde üretilen sinyallerin radar anteninden yeryüzü üzerinde bulunan objelere gönderilmesi ve objelere

çarparak yansıyan sinyallerin geri alınmasına dayanmaktadır. Böylece sinyallerin gidiş-dönüş süreleri ve geri yansıtım şiddetlerinden faydalanılarak, anten ile objeler arasındaki mesafeler ve objenin boyutu ve yüzey durumu gibi özelliklerin algılanması sağlanmaktadır (Hanssen, 2001). Kendi sinyallerini kendisi üreterek güneş enerjisine ihtiyaç duymadan çalışabilen RADAR sistemleri, gece veya gündüz, puslu veya sisli hava şartları fark etmeksizin her türlü hava koşulunda ölçüm yapabilen aktif sistemlerdir. Radar sistemleri ilk olarak 1920'li yıllarda uçak ve gemilerin yerden izlenmesi amacıyla geliştirilmiş, 1930'lu yıllarda ise uçaklarda kullanılmaya başlanmıştır (Canaslan, 2010). Uçaklarda kullanılan Gerçek Açıklıklı Radar (RAR) görüntüleme sistemlerinin yüksek çözünürlüklü görüntüler elde etmek için çok uzun anten boyuna ihtiyaç duyuyor olması, sonraki yıllarda doppler etkisinden faydalanılarak anten boyunun yapay olarak uzatıldığı Yapay Açıklıklı Radar (SAR) sistemlerinin geliştirilmesine vesile olmuştur. Bu sistemler RAR sistemlerinden farklı olarak, tüm tarama alanının (şerit alanı (swath)) görüntüsünü tek bir seferde almak yerine, hareket doğrultusu (azimut yönü) boyunca kısa aralıklı radar mikrodalga ışın darbeleri-patlamaları (pulse) ile çoklu kez ölçerek almaktadırlar. Burada çoklu kez gerçekleştirilen radar ölçülerinin başlangıcı ve bitişi arasındaki mesafe yapay açıklık olarak ifade edilmektedir (Canaslan, 2016). Böylelikle konumsal çözünürlüğü iyileştirilmiş radar görüntüleri elde edilebilmektedir.

SAR sistemlerinin görüntüleme geometrisi Şekil 1'de gösterilmiştir. Buna göre bir SAR uydusu kendi yörüngesi üzerinde hareket ederken, kendi uçuş düzlemine dik olan ve radar sensörü ile yeryüzündeki hedef objeler arasındaki eğik menzil (slant range) ya da uydu bakış doğrultusu (Line of Sight (LOS)) olarak adlandırılan eksen boyunca mikrodalga ışın demetini kullanarak görüntü alımını gerçekleştirmektedir. Bu görüntü alımı esnasında ışının radar platformu üzerinde düşey eksen ile yaptığı açı bakış açısı (look angle (Θ_{look})), yeryüzü yüzey normali ile yaptığı açı ise geliş açısı (incidence angle (Θ_i)) olarak adlandırılmaktadır. Yeryüzünün düz olduğu varsayıldığında bu iki açı birbirine eşit olmaktadır. Fakat yapılan hesaplamaların doğruluğu açısından, yeryüzü eğriliğinin dikkate alınması gerekmektedir. Bu nedenle genellikle bu iki açı birbirinden farklı değerler almakta ve geliş açısı daha büyük olmaktadır (Zyl ve Kim, 2010).

SAR görüntüleri, her biri Dünya yüzeyinin küçük bir kısmını temsil eden ve satır-sütun dizileri olarak görülebilen piksellerden oluşmaktadırlar. Bu pikseller görüntü üzerindeki satır ve sütun konumlarının sırasıyla uydu uçuş yönüne paralel olan azimut ekseni ve eğik menzil ekseni ile ilişkilendirildiği iki boyutlu radar koordinat sistemi

üzerinde tanımlanırlar. Yer menzil doğrultusu ya da ekseni ise sensör-hedef objeler arasında eğik menzil doğrultusunda ölçülen mesafelerin yatay eksen üzerindeki karşılığını göstermektedir (Şekil 1).



Şekil 1. SAR görüntüleme geometrisi (Bamler ve Hartl 1998; Hooper 2006'dan değiştirilerek)

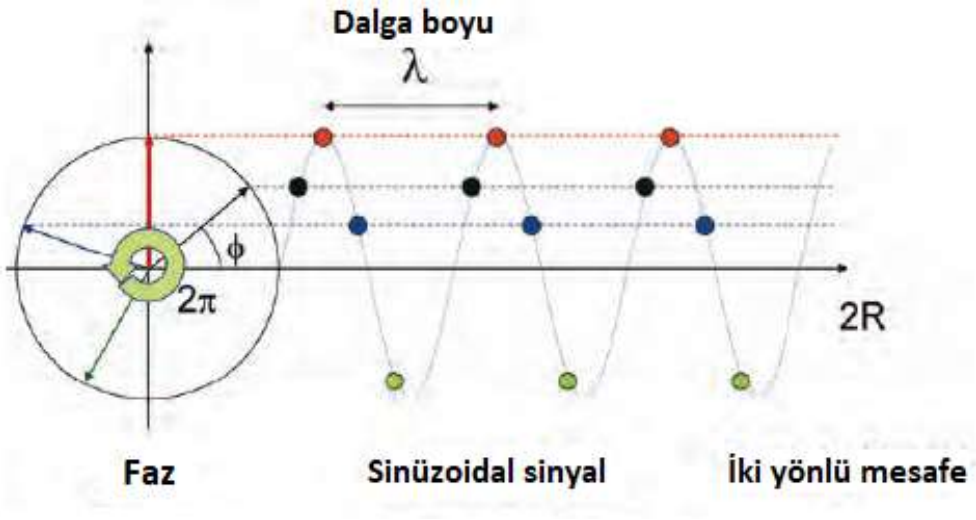
SAR görüntülerini oluşturan pikseller, kendi içerilerinde yer alan ve yer yüzeyindeki objeler tarafından radar sensörüne geri yansıtılan mikrodalga sinyali ile ilişkili genlik (amplitute) ve faz (Phase) bilgisini taşıyan karmaşık (complex) değerler içermektedirler. Genlik değerleri radar sensörüne geri yansıtılan sinyalin şiddeti ile ilgilidir. Faz değerleri ise bu sinyalin gecikme zamanının ölçülmesi ile elde edilen ve $-\pi$ ile $+\pi$ arasında değer alan tam (2π) bir sinüs dalga döngüsünün (tek bir SAR dalga boyu için) bir kesridir (Ferretti vd., 2007b; ESA Sentinel-1 Team, 2013). Başka bir deyişle, genlik değerleri mikrodalga sinyalini yansıtan yeryüzündeki objelerin yansıma özelliğini gösterirken, faz değerleri ise radar anteni ile hedef obje arasındaki uzaklık bilgisini içermektedirler (Doğru ve Özener, 2011). Genlik değerleri arazideki saçıcı ya da yansıtıcı objelerin kimyasal bileşiminden daha çok yüzey pürüzlülüğüne ve geometrisine bağlıdır (Ferretti vd., 2007b; Höser, 2018). Genel olarak taş-kayaç tipindeki yapılar ve insan yapımı yapıların bulunduğu kentsel alanlar güçlü yansıma göstererek parlak tonlarda görüntülenirken,

durgun su havzaları gibi genliği çok düşük pürüzsüz düz yatay yüzeyler ise eğik menzilde gelen radar sinyalini uzağa doğru yansıttıklarından ya da radar sensörüne geri yansıtamadıklarından karanlık olarak görüntülenmektedirler. Diğer bir tür olan bitki örtülü alanlar ise pürüzlü yüzeye sahip dağınık hacimsel (volume) yansıtıcılardır. Bu tür alanlar radar ışınımının bir ağaç gövdesindeki yapraklar gibi aynı piksel içerisinde bulunan birbirine çok yakın birden fazla objeye çarpıp geri yansıması sonucunda, benekleme (speckle) ya da tuz-karabiber (salt and pepper) etkisi olarak adlandırılan, yansıma değerleri değişken karıncalı bir görünüme sahip olurlar (Ferretti vd., 2007b; Höser, 2018). Optik görüntülerde bulunmayıp SAR görüntülerinde oluşan ve görüntünün yorumlanmasını güçleştiren bu gürültü etkisi, birbirinden biraz farklı bakış açılarıyla farklı zamanlarda elde edilen yakın görüntüleme geometrilerine sahip çoklu sayıda SAR görüntüsünün kullanılması ve genlik ortalamalarının alınması ile büyük ölçüde azaltılabilmektedir (Ferretti vd., 2007b). Faz değerleri ise mikrodalga sinyalinin radar sensörü ve hedef objeler arasındaki eğik menzil üzerindeki iki yönlü gidiş-dönüş ölçüsü ile elde edilmektedirler. Sensör ile farklı uzaklıklarda bulunan hedef objeler veya saçıcılar, sinyalin iletimi ve alımı arasında farklı gecikmelere neden olurlar. Bu gecikmeler (τ), İletilen sinyalin sinüzoidal doğası nedeniyle, iletilen ve alınan sinyaller arasındaki faz değişimine (ϕ) eşdeğerdir. Dolayısıyla faz değişimi, iletilen mikrodalga sinyalinin dalga boyu (λ) ile bölünen ışınımın iki yönlü seyahat mesafesi (2R) ile orantılı olan ve 2π radyan periyodu ile periyodik olarak gerçekleşen sinüzoidal bir fonksiyondur (Eşitlik 1.1) (Ferretti vd., 2007b). Eşitlikteki eksi işareti ölçülen faz değerinin faz gecikmesi olarak tanımlanmasından gelmektedir. Bu kavram Şekil 2'de gösterilmiştir.

$$\phi = -\frac{2\pi}{\lambda} 2R = -\frac{4\pi}{\lambda} R \tag{1.1}$$

SAR pikselleri, radar sensörü tarafından kaydedilen sinyalin (S), genlik (A), kayıt edilen faz ($j\phi$), eğik menzil mesafesindeki uzaklık (R) ve sinyalin dalga boyu (λ) değerleri cinsinden Eşitlik (1.2)'deki gibi ifade edilmektedirler (Yazıcı, 2019; Höser, 2018; Lauknes, 2004; Rosen vd., 2000).

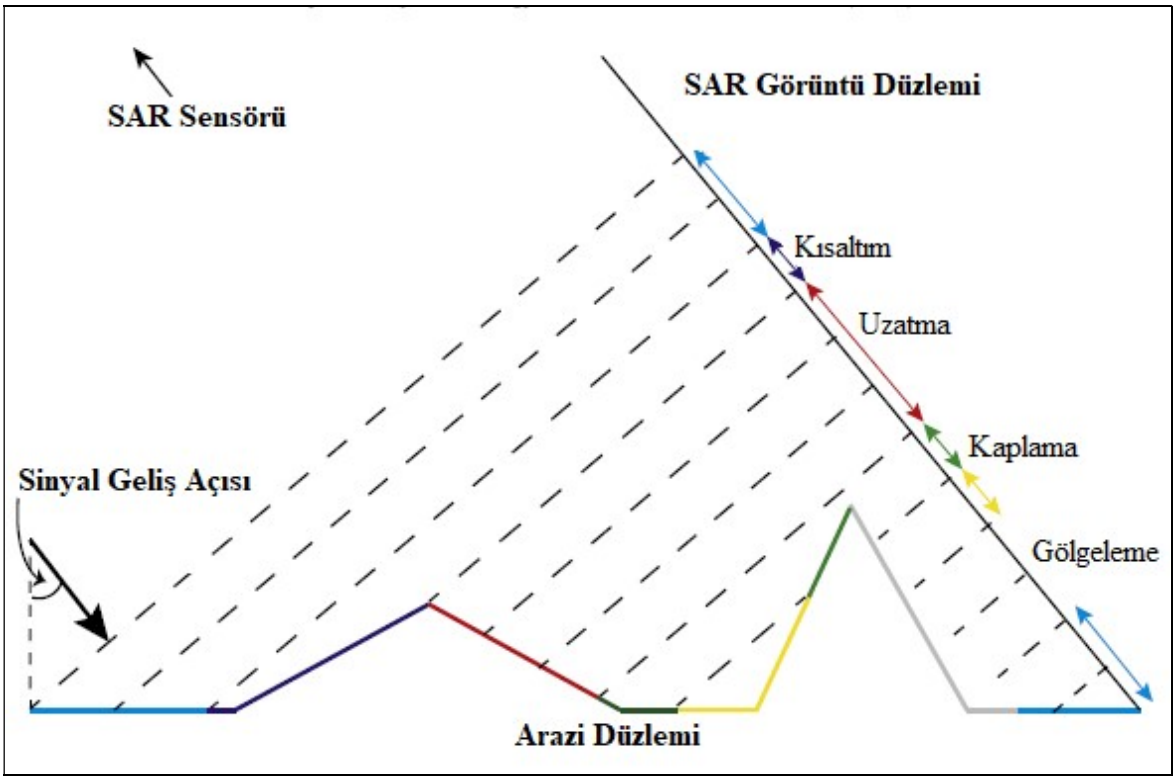
$$S = Ae^{j\phi} = Ae^{-j\frac{4\pi}{\lambda}R} \tag{1.2}$$



Şekil 2. SAR faz değişim ölçüsü (Ferretti vd., 2007b'den değiştirilerek)

SAR görüntüleri arazi eğimi ve sinyalin geliş açısına bağlı olarak bazı geometrik hataları içerebilmektedirler. Bu geometrik bozukluklar; kısaltım (foreshortening), uzatma (lengthening), kaplama ya da ters görüntüleme (layover) ve gölgeleme (shadow) etkileri olarak karşımıza çıkarlar (Şekil 3). Arazi eğiminin pozitif ya da yukarı yönde artması arazi yüzeyinin görüntü düzlemi üzerinde olduğundan daha küçük görüntülenmesine neden olur. Bu durum kısaltım olarak adlandırılır. Geliş açısından küçük olmak şartıyla, kısaltımdan sonra arazi eğiminin negatif veya aşağı yönde olması ise arazi yüzeyinin görüntüleme düzleminde git gide daha fazla piksel ile daha uzun görüntülenmesine yani uzatıma sebep olur (Pinel vd., 2014). Şekil 3'de görülebildiği üzere kırmızı ve mor alanlar birbirlerine yakın uzunluklara sahip olmalarına rağmen, kırmızı alan görüntüleme düzleminde çok daha büyük olarak görüntülenmiştir. Yukarı yönde olan arazi eğimi sinyalin geliş açısını aştığında, yeryüzündeki objeler ters sırada görüntülenmeye başlarlar. Çünkü bu durumda yüksekte bulunan objeler radar sensörüne daha yakın olduklarından daha önce görüntülenirler. Buna ters görüntüleme veya kaplama denilmektedir. Şekil 3'de yeşil ve sarı alanlar bu şekilde görüntülenmiştir. Bu durum genellikle yüksek eğimli arazilerde dağın tepe noktasının tabanından önce görüntülenmesi şeklinde ortaya çıkmaktadır. Gölgeleme ise, arazi yüzeyinin LOS doğrultusuna paralel olduğu veya daha fazla aşağı yönde eğimli olduğu durumlarda gölgede kalarak görüntülenememesi olarak ifade edilebilir. Dağın yüksek bir tepe noktasından sonra gelen yamaç kısmının görüntülenememesi bu duruma örnek olarak verilebilir. Bu hatalar arasından kısaltım geometrik ve radyometrik kalibrasyon sırasında yüksek çözünürlükte bir SYM kullanılarak

giderilebilmektedir. Ters görüntüleme ve gölgeleme hataları ise tespit edilebilmekte fakat düzeltilememektedir (URL-3, 2021).



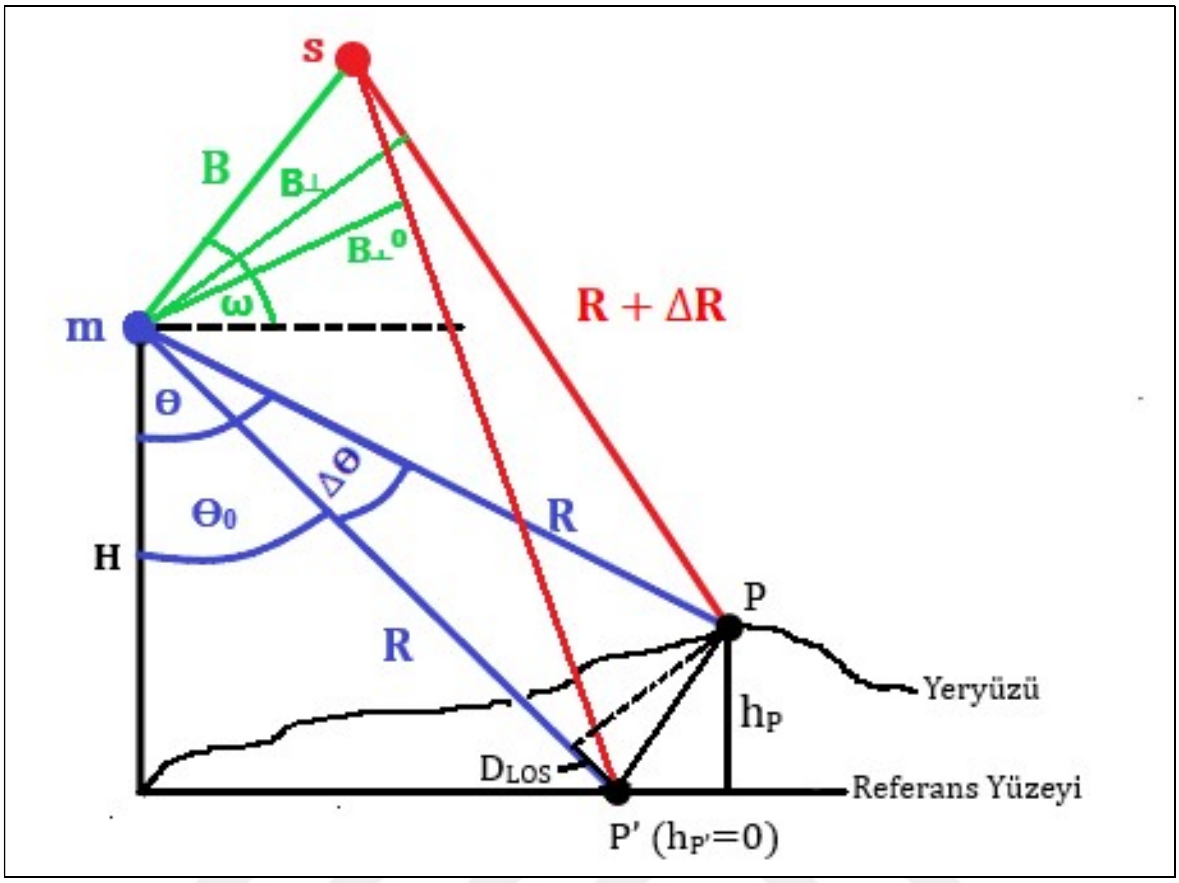
Şekil 3. SAR görüntülerindeki geometrik hatalar (Pinel vd., 2014'den değiştirilerek)

Tek bir SAR görüntüsünde elde edilen genlik bilgileri alandaki objelerin yansıma özellikleri hakkında bilgi edinilmesi açısından kullanışlı olmalarına rağmen, faz bilgileri ise eğik menzil doğrultusu üzerindeki tek bir görüntüleme geometrisine bağlı olarak topoğrafyanın olduğundan farklı algılanmasına sebep olduklarından kullanışlı değildirler. Bu nedenle arazi topoğrafik özelliklerinin elde edilebilmesi için, farklı görüntüleme geometrileri ile elde edilen en az iki SAR görüntüsüne ihtiyaç duyulan InSAR tekniği uygulamaları gerçekleştirilmektedir. Yeryüzünde meydana gelen değişimlerin tespit edilebilmesi için ise, yine farklı görüntüleme geometrilerine sahip ve farklı zamanlarda elde edilen SAR verilerine ihtiyaç duyulan DInSAR uygulamaları gerçekleştirilmektedir.

1.7. InSAR Tekniği Temel Prensipleri ve Matematiksel Esasları

InSAR veya SAR interferometrisi aynı alana ait birbirine yakın fakat farklı görüntüleme geometrileri ile elde edilen iki SAR görüntüsünün arasında oluşan faz farkını hesaplayan bir tekniktir (Hanssen, 2001). Faz farklarını içeren, oluşturulan yeni görüntüye ise interferogram denilmektedir. İnterferogram faz değerleri $-\pi$ ile $+\pi$ arasında değerler alırlar ve örge (fringe) adı verilen, renk bantlarından oluşan halkalarla (girişim deseni) gösterilirler (Balık, 2004; Köksal, 2011; Yılmaztürk, 2015). Örgeler, kullanılan dalga boyuna bağlı olarak, iki görüntü alımı arasındaki uydu radar sensörlerinden hedef noktalara olan eğik uzaklık değişimlerini temsil ederler. Buradaki görünen toplam eğik uzaklık değişimleri, radar sinyalinin uydudan-noktaya ve noktadan-uyduya olan iki yönlü hareketiyle elde edildiği için, hedef nokta ile uydu arasındaki gerçek eğik uzaklık değişiminin iki katını yansıtırlar. Bu nedenle sinyal dalga boyu biriminde gösterilen toplam değişimlerin ikiye bölünmesi ile gerçek değişimler elde edilebilmektedirler. Başka bir deyişle, interferogramdaki her bir örgenin bir halkası ya da döngüsü, dalga boyunun yarısı kadar uydu-yeryüzü uzaklığı değişimlerine karşılık gelmektedir (Aydöner ve Maktav, 2006; Köksal, 2011).

InSAR tekniğinde veri edinimi iki farklı şekilde gerçekleştirilmektedir. Bunlardan birincisi aynı uydu platformuna yerleştirilen iki radar anteni ile gerçekleştirilen tekli geçiş interferometrisi, diğeri ise uydu platformu üzerinde tek bir radar anteninin yer aldığı çoklu ya da tekrar geçiş interferometrisidir (Çakır, 2003; Şengün ve Kılıçoğlu, 2005). Tekli geçiş interferometrisinde uydunun tek bir geçişinde, iki farklı anten konumundan aynı alana ait iki farklı SAR görüntüsü elde edilirken, tekrar geçiş interferometrisinde ise uydunun aynı alan üzerinden farklı zamanlarda yaptığı tekrar geçişler ile SAR görüntüleri elde edilmektedir. Tekli geçiş interferometrisi tekniği genellikle topoğrafik modelleme (SYM üretimi) amaçlı olarak kullanılırken, bu çalışmada olduğu gibi deformasyon ya da yüzey değişimlerinin izlendiği çalışmalarda ise farklı zamanlarda elde edilen verilere ihtiyaç duyulduğundan tekrar geçiş interferometrisi kullanılmaktadır. Tekrar geçişli SAR interferometrisi ya da kısaca InSAR geometrisi Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4. Tekrar geçişli SAR interferometrisi (Hanssen, 2001; Lauknes, 2004; Hooper vd., 2007; Höser, 2018; Yazıcı, 2019'dan değiştirilerek)

Şekil 4'de uydunun farklı zamanlarda ve farklı yörünge konumlarından aynı alan üzerinde gerçekleştirdiği referans (birincil) ve tekrar (ikincil) geçişler arasındaki zaman farkı içerisinde konumsal olarak değişim gösteren P (P'-P) hedef noktasının InSAR geometrisi ile nasıl algılandığı gösterilmiştir. Buradaki P' ve P noktaları m görüntüleme geometrisine göre aynı eğik menzil mesafesinde (R) olmasına rağmen, yer menzil doğrultusu üzerinde yatay ve düşey olarak yer değiştirmiştir (Hanssen, 2001). P' ve P noktaları m sensörüne aynı mesafede olduklarından, m görüntüleme geometrisine göre elde edilen SAR görüntüsü içerisinde aynı piksel içerisinde aynı nokta olarak görüntülenirler ve tek bir SAR verisi ile bu noktalar arasındaki bakış açısındaki değişim (ΔΘ) ölçülemez. Bu nedenle, tek bir SAR görüntüsü veya tıpatıp aynı görüntüleme geometrileri ile elde edilen iki SAR görüntüsü ile P'-P arasındaki değişimi çözmek mümkün değildir (Hanssen, 2001; Lauknes, 2004) ve yine aynı sebeple, InSAR veya DInSAR uygulamaları birbirinden biraz farklı görüntüleme geometrilerine sahip SAR görüntüleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Referans ve tekrar geçiş sırasında elde edilen görüntüler işleme

aşamasında sırasıyla birincil (master (m)) ve ikincil (slave (s)) olarak adlandırıldıklarından, m ve s harfleri ile gösterilmişlerdir. P noktasının uydunun referans (m) geçişindeki konumuna (P') ait yüksekliği ($h_{P'}$=0) sıfır kabul edilerek, tekrar geçişindeki (s) zamanla değişen konumuna (P) ait yüksekliği ve dolayısı ile düz olarak kabul edilen referans yüzeyine göre yükseklik değişimi h_P olarak ifade edilmiştir. H ise uydu radar sensörünün referans yüzeyden olan yüksekliğidir. InSAR tekniği hesaplama işlemleri master verinin görüntüleme geometrisine göre yapıldığından, m görüntüleme geometrisinin P' ve P noktalarına olan bakış açıları sırasıyla Θ_0 ve Θ, bu iki açı değeri arasındaki fark ise $\Delta\Theta$ olarak gösterilmiştir. m ve s radar sensörlerinden P noktasına olan eğik menzil mesafeleri ise uydunun konumu değiştiğinden birbirinden farklıdır ve sırasıyla R ve $R + \Delta R$ olarak ifade edilmişlerdir. m ve s sensör pozisyonları arasındaki mesafe (geometrik baz) B, bu mesafenin dik bileşeni (dik baz uzunluğu) ise Θ_0 ve Θ bakış açıları ya da P' ve P nokta konumlarına göre $B_{\perp}^{0}$ ve $B_{\perp}$ olarak tanımlanmışlardır. B baz uzunluğunun yatay eksen ile yaptığı açı ω olarak ifade edilmiştir. D_{LOS} ise meydana gelen yüzey hareketinin m görüntüleme geometrisine göre LOS-eğik menzil doğrultusundaki bileşenidir.

İnterferometri uygulamalarında iki adet SAR görüntüsünden birisi m diğeri ise s görüntü olarak seçilir. Buradaki her iki görüntü de faz ve genlik değerlerini içeren, kompleks sayılardan oluşurlar. Bu iki görüntünün eşleştirilmesi ve birincil görüntüde yer alan piksellerin, ikincil görüntüde kendisine karşılık gelen kompleks eşlenikleri ile noktasal (piksel-piksel) çarpımı sonucunda faz farklarının elde edildiği interferogram görüntüleri oluşturulur (Canaslan, 2016; Abdikan, 2012; Kemaldere, 2011; Ferretti vd., 2007b; Rosen vd., 2000). Buna göre ϕm ve ϕs sırayla m ve s görüntülerindeki aynı alanı içeren piksellerden ölçülen faz değerleri olmak üzere Eşitlik (1.3) ve Eşitlik (1.4) ile tanımlanabilirler.

$$\phi m = -\frac{2\pi}{\lambda} 2R + \phi_{ym} = -\frac{4\pi}{\lambda} R + \phi_{ym} \tag{1.3}$$

$$\phi s = -\frac{2\pi}{\lambda} (2R + 2\Delta R) + \phi_{ys} = -\frac{4\pi}{\lambda} (R + \Delta R) + \phi_{ys} \tag{1.4}$$

Buradaki ϕ_{ym} ve ϕ_{ys} sırasıyla m ve s görüntülerindeki aynı bölgeyi içeren pikseller içerisindeki objelerin sinyali geri yansıtma özelliklerine bağlı bir faz kayma değerini ifade etmektedir (Bamler ve Hartl, 1998). Her iki görüntüde de objelerin yansıtma

karakterlerinin aynı olduğu ya da zaman içerisinde değişmediği düşünülürse ($\phi_{ym} = \phi_{ys}$), bu durumda m ve s görüntüleri arasındaki interferometrik faz (ϕ_{int}) veya faz farkı ($\Delta\phi$) Eşitlik (1.5) ile ifade edilebilir (Bamler ve Hartl, 1998; Hanssen, 2001; Canaslan, 2016).

$$\phi_{int} = \Delta\phi = \phi m - \phi s = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta R \tag{1.5}$$

Buradaki ΔR, iki veri edinim geometrisindeki eğik menzil mesafelerinde oluşan farkı ifade etmektedir. Bu değerin bilinmesi ile interferometrik faz elde edilebilmektedir. Fakat bu değer uydu yörüngesindeki hatalar ve 2π'ye göre çözümlenen faz değerlerindeki belirsizlikler sebebiyle (Canaslan, 2016; Abdikan, 2012; Hanssen, 2001) InSAR geometrisinden direkt olarak çözülememekte ve varsayımlara dayalı işlemler gerçekleştirilerek hesaplanılabilmektedir. Şekil 4'de gösterilen m-s-P üçgeni için cosinüs teoremi uygulanırsa ve B baz uzunluğunun m ve s menzil uzunluklarına (R, R+ΔR) göre çok küçük olması ($B \ll R$) dolayısıyla paralel ışın yaklaşımı (Zebker ve Goldstein, 1986) kullanılarak m ve s menzil uzunluklarının paralel olduğu varsayılırsa, Eşitlik (1.6) elde edilir.

$$(R + \Delta R)^2 = R^2 + B^2 - 2RB\cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta + \omega\right) \tag{1.6}$$

$$R + \Delta R \approx R - B\sin(\theta - \omega)$$

$$\Delta R \approx -B\sin(\theta - \omega)$$

Bu durumda Eşitlik (1.5) ve Eşitlik (1.6)'nın birleştirilmesi ile interferometrik faz aşağıdaki gibi (Eşitlik 1.7) elde edilir.

$$\phi_{int} \approx -\frac{4\pi}{\lambda}B\sin(\theta - \omega) \tag{1.7}$$

1.7.1. Uyumluluk (Coherence)

InSAR tekniği ile üretilen her bir piksele ait interferometrik fazın bileşenlerinin DInSAR tekniği ile daha detaylı incelenmesi ve giderilmesi aşamasına geçilmeden önce, oluşturulan interferogram görüntüsünün içerdiği gürültüler bakımından kalitesi hakkında

bilgi veren (Köksal, 2011; Abdikan, 2007) Uyumluluk (γ) analizi gerçekleştirilir. Interferogram görüntüleri iki SAR görüntüsünün birbiri ile eşleşen pikselleri arasındaki korelasyonsuzluklarından kaynaklanan gürültüler içermektedirler. Bu gürültüler genellikle çalışma alanının yapısına bağlı olduğundan, interferogram görüntüsünün farklı kısımlarına farklı yoğunluklarda heterojen bir biçimde yansımış olarak bulunurlar. Gürültülerin az olduğu ya da hiç olmadığı alana ait piksellerde interferometrik faz bilgisi yorumlanabilirken, çok yoğun olduğu piksellerde ise yorumlanamaz ve dolayısıyla faz farkı tahmin edilemez (Ferretti vd., 2007b; Plank, 2014). Bu nedenle hangi piksellere ait faz bilgisinin güvenilir ve sonraki analizlerde kullanılabilir olduğunu tespit etmek için, her bir pikselin uyumluluğu tahmin edilir. SAR görüntü çiftinin çapraz korelasyon katsayısı olarak tanımlanan (Ferretti vd., 2007b) Uyumluluk (γ), S_1 ve S_2^* sırasıyla aynı alanı gösteren kompleks birincil ve kompleks eşlenik ikincil görüntü piksellerinin değerleri ve E ortalama operatörü olmak üzere Eşitlik (1.8) ile hesaplanılır (Abdikan, 2012; Köksal, 2011; Lauknes, 2004; Bamler ve Hartl, 1998).

$$\gamma = \frac{\mathrm{E}\{S_1 S_2^*\}}{\sqrt{\mathrm{E}\{|S_1|^2\}\ \mathrm{E}\{|S_2|^2\}}}, \quad 0 \leq \gamma \leq 1 \tag{1.8}$$

Uyumluluk 0 ile 1 arasında değer alır. Burada 0 piksel fazının tamamen gürültülü olduğunu, 1 ise gürültünün hiç olmadığını ifade eder. Uyumluluk değerleri SAR verilerinin işlendiği yazılımlarda hesaplanılarak uyumluluk haritası (Coherence map) ile gösterilirler. Uyumluluk değeri düşük (0'a yakın) olan alanlar karanlık tonlarda gözükürken, yüksek olan alanlar (1'e yakın) ise parlak tonlarda gözükür. Genellikle sulak ve bitki örtülü alanlara ait pikseller düşük uyumluluk gösterirken, kentsel alanlar ve taş-kayaç tipindeki yapıların bulunduğu pikseller yüksek uyumluluk gösterirler. Genellikle uyumluluğun 0.3'den küçük olduğu çok gürültülü piksellerde interferometrik fazdan herhangi bir bilgi üretilemez. Uyumluluğun 0.3-0.5 arasında olduğu piksellerde ise çok gürültü olmasına rağmen, faz bilgisi elde edilebilmektedir (Köksal, 2011; Kemaldere, 2011). Uyumluluk değerinin daha yüksek olduğu, daha az gürültülü piksellerde ise faz tahmini daha doğru bir şekilde yapılabilmektedir.

Uyumluluk değerinin büyüklüğü aynı zamanda interferogramın Sinyal Gürültü Oranı (Signal to Noise Ratio (SNR))'nın bir fonksiyonu olarak da tanımlanabilmektedir (Eşitlik

1.9). SNR ise radar sensörü ile alınan sinyalin gücünün (P_S), gürültünün gücüne (P_N) oranı olarak ifade edilir (Eşitlik 1.10) (Hanssen, 2001; Abdikan, 2012).

$$|\gamma| = \frac{\mathrm{SNR}}{\mathrm{SNR} + 1} \tag{1.9}$$

$$\mathrm{SNR} = \frac{P_S}{P_N} \tag{1.10}$$

1.8. DInSAR Tekniği ile Deformasyonların Belirlenmesi

Diferansiyel InSAR (DInSAR), InSAR tekniğinin iki interferogramın faz farkına dayanan bir uygulamasıdır. Burada farkı alınan interferogram InSAR tekniği ile elde edilmekte ve meydana gelen yüzey değişimlerini içermektedir. Diğer çıkarılan interferogram ise genellikle bir SYM'nin simule edilmesiyle oluşturulmakta ya da birbirine yakın zaman aralıklarında edinilen SAR verilerinin faz farkını içeren interferogram görüntüsünün oluşturulması ile elde edilmektedir.

Farklı zamanlarda edinilen SAR görüntülerinden elde edilen interferometrik faz, yalnızca bu zaman aralığında meydana gelen yüzey değişimleri ya da deformasyonlara bağlı faz etkisini (ϕ_{def}) değil, aynı zamanda yeryüzü eğriliğinden kaynaklanan düz yeryüzü fazı (ϕ_{flat}), topoğrafyadan kaynaklanan topoğrafik faz (ϕ_{topo}), uydu yörünge bilgisindeki hatalardan kaynaklanan yörüngesel faz (ϕ_{orb}), atmosferik sinyal gecikmelerinden kaynaklanan atmosferik faz (ϕ_{atm}) ve interferogram görüntüsünde bulunan çeşitli gürültülerden kaynaklanan gürültü fazı (ϕ_N) etkilerini içermektedir. Buna göre Eşitlik (1.7)'de yer alan interferometrik faz, diğer faz bileşenleri açısından Eşitlik (1.11)'de ki gibi ifade edilebilir.

$$\phi_{\mathrm{int}} = \phi_{\mathrm{def}} + \phi_{\mathrm{flat}} + \phi_{\mathrm{topo}} + \phi_{\mathrm{orb}} + \phi_{\mathrm{atm}} + \phi_N \tag{1.11}$$

Eşitlik (1.11)'de yer alan tüm faz bileşenleri interferometrik faz üzerinde örgeler oluştururlar. Bu örgeler deformasyona bağlı örgenin veya fazın değerinin tahminini zorlaştırır. Bu nedenle, deformasyon faz bileşeni (ϕ_{def})'nin elde edilebilmesi için, diğer

faz bileşenlerinin etkilerinin tahmin edilerek interferometrik fazdan çıkarılması gerekmektedir.

İnterferometrik faz ile Şekil 4'de yer alan P noktasının referans yüzeyine ($h_{P'} = 0$) göre yüksekliği olan h_P arasındaki ilişkiyi elde etmek için Eşitlik (1.11)'deki sin(.) fonksiyonu $\Theta = \Theta_0$ etrafında genişletilerek Eşitlik (1.12) elde edilir (Lauknes, 2004; Höser, 2018; Yazıcı, 2019).

$$\phi_{int} \approx -\frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\Theta_0 + \Delta\Theta - \omega) \tag{1.12}$$

$$\phi_{int} \approx -\frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\Theta_0 - \omega) - \frac{4\pi}{\lambda} B \cos(\Theta_0 - \omega)\,\Delta\Theta$$

Eşitlik (1.12)'de yer alan ikinci terim interferometrik faz değişimi ile bakış açısındaki değişim ($\Delta\Theta$) arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir (Hanssen, 2001). Referans yüzeyinden uydu antenine kadar olan Uydu yüksekliği (H) ise Eşitlik (1.13) ile ifade edilir.

$$H = R\cos\Theta_0 \tag{1.13}$$

Bakış açısındaki değişime ya da P noktasının bulunduğu piksele göre türev alındığında, uydunun yükseklik farkına (ΔH) bağlı olarak bakış açısındaki (Θ) değişim ($\Delta\Theta$) ile olan ilişkisi Eşitlik (1.14)'deki gibi elde edilir. (Hanssen, 2001; Lauknes, 2004).

$$\Delta H = -h_P = -R\sin\Theta_0\Delta\Theta \tag{1.14}$$

Dik baz uzunluğu ($B_\perp^0$) Eşitlik (1.15)'deki gibi elde edildikten sonra (Hanssen, 2001; Lauknes, 2004; Cagatay ve Datcu, 2015),

$$B_\perp^0 = B\cos(\Theta_0 - \omega) \tag{1.15}$$

Eşitlik (1.12)'de Eşitlik (1.14)'deki $\Delta\Theta$ eşitliği yerine konulduğunda, birinci ve ikinci terim olarak Düz Yeryüzü Fazı ($h_{P'}$=0 olan referans yüzeyine göre) ve Topoğrafik Faz (h_P yüzeyine göre) etkilerini içeren interferometrik faz elde edilir (Hanssen, 2001; Lauknes, 2004; Ferretti vd., 2007b; Cagatay ve Datcu, 2015; Veci, 2016a) (Eşitlik 1.16).

$$\phi_{int} \approx -\frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta_0 - \omega) - \frac{4\pi}{\lambda} B \cos(\theta_0 - \omega) \frac{h_P}{R \sin\theta_0} \quad (1.16)$$

$$\phi_{int} \approx -\frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta_0 - \omega) - \frac{4\pi}{\lambda} B_{\perp}^{0} \frac{h_P}{R \sin\theta_0}$$

$$\phi_{int} \approx \phi_{flat} + \phi_{topo}$$

Düz Yeryüzü Faz (ϕ_{flat}) etkisine bağlı örgelerin interferogram görüntüsünden çıkarılması için genellikle iki tip model kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi Dünya yüzeyinin elipsoid olduğunu varsayarak yapılan modellemedir. İkincisi ve daha doğru olan modelleme ise bir SYM kullanılarak gerçekleştirilen modellemedir (URL-3, 2021). Bu modellerden birisi ile üretilen ve yeryüzünün eğriliğine bağlı faz bileşenini ifade eden bu etki hassas yörünge verilerine dayalı olarak üretilen interferometrik fazdan çıkartıldığında, interferometrik düzleştirme (flattening) gerçekleştirilmiş olur (Canaslan, 2016).

Topoğrafik faz etkisi (ϕ_{topo}) ise izlenen alana ait yüksek hassasiyette bir SYM verisi kullanılarak büyük ölçüde giderilebilmektedir. Bu etki Eşitlik (1.16)'da da görülebildiği gibi, görüntü edinim geometrileri arasındaki dik baz uzunluğunun ($B_{\perp}^{0}$) artması ile artmakta ve bu durumda kullanılan SYM'nin yüksek hassasiyette olması önem kazanmaktadır (Ge vd., 2003; Köksal, 2011; Kemaldere, 2011; Canaslan, 2016). Eğer Eşitlik (1.11)'de belirlenmek istenen topoğrafik faz etkisi ise, bu faz bileşeni iki SAR veri edinimi arasında herhangi bir deformasyon olmadığı varsayımıyla oluşturulan interferogramdan elde edilebilir. Böylelikle tipik bir tekrar geçişli InSAR uygulaması ile üretilen topoğrafik fazdan bölgeye ait bir SYM haritası üretilebilir. Üretilen interferometrik topoğrafik faz haritasının neredeyse hiç deformasyon içermediğinden emin olmak için, edinim tarihleri birbirine yakın olan SAR verilerinin seçilmesi önemlidir.

İnterferometrik faz değişimi cinsinden bakış açısındaki değişim değeri Eşitlik (1.17)'deki gibi elde edilir (Hanssen, 2001; Lauknes, 2004).

$$\Delta\theta \approx -\frac{\lambda}{4\pi B \cos(\theta_0 - \omega)} \phi_{int} \quad (1.17)$$

P noktasının referans yüzeyden olan yüksekliği veya yükseklik değişimi (h_P) ile interferometrik faz arasındaki ilişki, Eşitlik (1.14) ve Eşitlik (1.17)'den Eşitlik (1.18)'deki gibi elde edilir (Hanssen, 2001; Lauknes, 2004).

$$h_P \approx -\frac{\lambda R \sin\theta_0}{4\pi B \cos(\theta_0-\omega)}\phi_{int} = -\frac{\lambda R \sin\theta_0}{4\pi B_\perp^0}\phi_{int} \quad (1.18)$$

Yukarıda yer alan eşitlikte interferometrik faz ya da faz farkı değeri ($\phi_{int} = \Delta\phi$) yerine bir tam faz döngüsü değeri olan 2π konulduğunda, Interferogramdaki yükseklik değişiminin tam bir faz döngüsü ile ilişkilendirildiği ve InSAR tekniğinin yükseklik bilgisine karşı duyarlılığını ifade eden (Canaslan, 2016) yükseklik belirsizliği ($h_{amb} = h_{2\pi}$) değeri elde edilir (Eşitlik 1.19) (Hanssen, 2001; Lauknes, 2004).

$$h_{amb} = h_{2\pi} = \left|\frac{\lambda R \sin\theta_0}{2B \cos(\theta_0-\omega)}\right| = \left|\frac{\lambda R \sin\theta_0}{2B_\perp^0}\right| \quad (1.19)$$

Uydu yörünge bilgisindeki hatalardan kaynaklanan yörüngesel faz (ϕ_{orb}) hassas yörünge bilgileri kullanılarak büyük ölçüde giderilebilmektedir. Atmosferik faz etkisi ise sıcaklık, basınç ve nem gibi atmosferik koşullardaki değişiklikler sebebiyle sinyalin atmosfer tabakasından geçerken uğradığı gecikmeden kaynaklanan faz etkisidir (Veci, 2016a, 2016b). Bu etkiyi azaltabilmek için ise, çoklu SAR verilerinin faz farklarının değerlendirilmesine dayanan ileri InSAR tekniklerinden faydalanılabildiği gibi (Burgmann vd., 2000; Canaslan, 2016), GPS ve atmosferik verilerin değerlendirilmesi ile elde edilen atmosferik gecikme verileri (Janssen, 2003; Yu vd., 2018a, 2018b, 2017) ve atmosferik modelleme yapan yazılımlar (Bekaert vd., 2015) da kullanılabilmektedir.

Gürültü faz etkisi ise görüntünün yorumlanmasını güçleştiren gürültülerdir. Bunlar; iki SAR veri edinimi arasında yansıtıcı objenin yansıtma karakterinin ya da piksel içerisindeki konumunun değişken olmasına bağlı olan ve genellikle bitki örtülü ya da tarımsal alanlarda görülen zamansal korelasyonsuzluklar, geometrik baz uzunluğunun artmasına ve kritik değerinin aşılmasına bağlı geometrik korelasyonsuzluklar, genelde bitki örtülü alanlarda görülen hacimsel-dağınık yansımalardan kaynaklanan gürültüler, termal ve diğer radar anteni kaynaklı gürültüler, eşleştirilen m ve s piksellerinin azimut doğrultusundaki doppler faz merkezi konumlarının farklılıklarından (doppler faz merkezi kayıklığı-korelasyonsuzluğu) kaynaklanan gürültüler ve görüntülerin işlenmesi ve eşleştirilmesi sürecinde ortaya çıkabilecek hatalardan kaynaklanan gürültülerdir (Hanssen, 2001; Veci, 2016a; Hooper vd., 2007; Şengün, 2010). Daha sonraki aşamada faz belirsizliğinin düzgün bir biçimde çözülerek meydana gelen yüzey değişimlerinin doğru

tespit edilebilmesi için, görüntüdeki gürültülerin mümkün olduğunca giderilmesi gerekmektedir. Bu bozucu etkiler geleneksel InSAR-DInSAR uygulamalarında Goldstein gibi faz filtreleme modelleri kullanılarak kısmen azaltılabilirken, çoklu sayıdaki SAR verilerinin değerlendirildiği ileri InSAR uygulamalarında ise çok daha etkili bir biçimde ve büyük ölçüde giderilebilmektedirler (Ferretti vd., 2001; Berardino vd., 2002; Hooper vd., 2004; Lanari vd., 2007a).

Gürültülere neden olan faktörleri matematiksel olarak ifade edersek; bunlardan birisi, aşıldığında interferometrik fazın tamamen korelasyonsuz olmasına neden olan kritik geometrik baz uzunluğu (B_K) değeridir. Bu değer, δRg, menzil doğrultusundaki SAR görüntüsünün çözünürlüğü; Θ_i, uydu geliş açısı; λ, dalga boyu; R, eğik menzil uzunluğu olmak üzere, Eşitlik (1.20) ile hesaplanılabilir (Zebker ve Villasenor, 1992; Plank, 2014; Höser, 2018).

$$B_K = \frac{\lambda R}{2\,\delta Rg\cos^2\theta_i} \tag{1.20}$$

Sentinel-1 uydusu verisi için örnek vermek gerekirse; uydu geliş açısının en küçük ve en büyük değerleri $(\theta_i = 29.16^0 - 46^0), R \approx 880$ km olduğu bir görüntüleme geometrisinde, $\lambda = 5.55$ cm ve $\delta Rg = 5m$ olduğundan, $B_K \approx 6405 - 10121$ m olarak elde edilir. Kritik baz uzunluğuna bağlı konumsal korelasyonsuzluk değeri (γ_K) ise Eşitlik (1.21)'deki gibi belirlenir (Abdikan, 2012).

$$\gamma_K = 1 - \frac{B_\perp}{B_K},\ B_\perp \le B_K \tag{1.21}$$

Termal korelasyonsuzluk (γ_T) ise radar cihazının sistematik bir etkisidir ve SNR ile tanımlanmaktadır (Eşitlik 1.22) (Zebker ve Villasenor, 1992; Abdikan, 2012).

$$\gamma_T = \frac{1}{1+SNR^{-1}} \tag{1.22}$$

Birincil (m) ve ikincil (s) görüntülerin doppler merkezi frekansları (f_{DM}^m, f_{DM}^s) arasındaki farktan ($\Delta f_{DM} = f_{DM}^m - f_{DM}^s$) ya da doppler faz merkezi kayıklığından kaynaklanan Doppler merkezi korelasyonsuzluk (γ_D) gürültüsü ise, B_A, Azimut

doğrultusundaki bant genişliği olmak üzere, Eşitlik (1.23) ile ifade edilmektedir. Buradaki faz merkezleri arasındaki farkın (Δf_{DM}) artması korelasyonsuzluğu ve gürültüyü arttırmaktadır (Hanssen, 2001; Şengün, 2010; Abdikan, 2012).

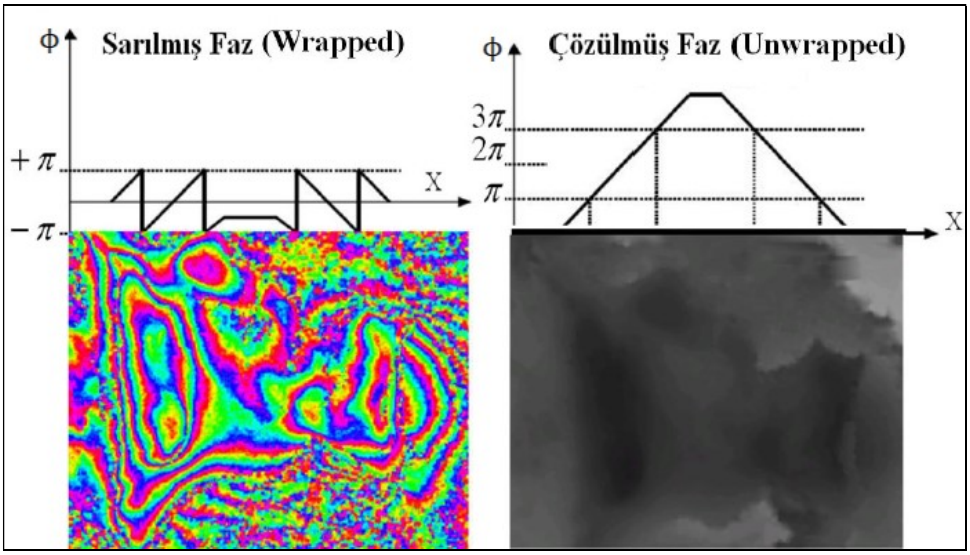
$$\gamma_D = \begin{cases} 1 - \frac{\Delta f_{DM}}{B_A} & \text{eğer } |\Delta f_{DM}| \leq B_A \\ 0 & \text{eğer } |\Delta f_{DM}| > B_A \end{cases} \quad (1.23)$$

SAR interferometrisinin en önemli kısıtlarından birisi olan zamansal korelasyonsuzluk (γ_Z) ise anlamsız faz ölçülerine sebep olur ve interferogramlardaki komşu piksel faz değerlerine bakılarak bu uyuşumsuzluğun bulunduğu piksellerin tespit edilebilmesi mümkündür (Şengün, 2010). Bu korelasyonsuzluk görüntü edinimleri arasındaki zamanın bir fonksiyonu olarak yansıtıcı yüzeyin geometrik-fiziksel veya elektriksel yansıma özelliklerinde meydana gelen değişimlerden kaynaklanmaktadır (Hanssen, 2001; Lauknes, 2004; Abdikan, 2012). Bu değişiklikler, bitki örtüsünün hareketli kısımları, arazi yüzeyindeki erozyon veya tarımsal faaliyetlerden kaynaklanabileceği gibi, bir gözlemden diğerine farklı yansıma özelliği gösterebilecek karla kaplı ve sulak alanlarda da görülebilir (Guneriussen vd., 2001; Lauknes, 2004). Ormanlık alanlar iki veri edinimi arasındaki bir gün gibi kısa zamansal aralıklarda bile genellikle düşük bir uyuma ya da yüksek korelasyonsuzluğa sahipken, kentsel ve kurak alanlar ise bir yıldan uzun zaman aralıkları için bile yüksek uyumluluk gösterirler (Strozzi vd., 2000). Zamansal korelasyonsuzluk esas olarak radar dalga boyu ölçeğinde hedef yüzeyde meydana gelen değişikliklerden kaynaklandığından, büyük ölçüde radarın çalışma frekansı ya da dalga boyuna bağlıdır (Zebker ve Villasenor, 1992). Daha uzun dalga boyları ile elde edilen SAR verileri (Örneğin: L bantlı ALOS PALSAR SAR verisi için-dalga boyu (λ): 23.6 cm), kısa dalga boylu SAR verilerine nazaran (Örneğin: C band Sentinel-1 için λ=5.55 cm veya X bantlı TerraSAR-X için λ=3.1 cm) daha düşük zamansal korelasyonsuzluk gösterirler (Strozzi vd., 2003). Aynı piksel içerisindeki birbirine çok yakın objelere çarpıp geri yansıyan sinyallerin meydana getirdiği hacimsel korelasyonsuzluk da, radar ışınının saçılma ortamındaki dielektrik-yalıtkanlık özelliklerine ve dalga boyuna bağlıdır. Dalga boyu arttıkça radar ışınının geçirgenliği de artar. Bu bakımdan özellikle yoğun bitki örtülü ormanlık alanlarda geçirgenliği en yüksek olan L bantlı SAR verileri ile daha uyumlu ve hassas sonuçlar elde edilebilmektedir.

Tüm diğer faz bileşenlerine ait örgeler belirlenerek interferogram görüntüsünden çıkartıldıktan sonra deformasyon fazı (ϕ_{def}) elde edilir. Bu faz bileşeni yeryüzünde meydana gelen yüzey hareketinin SAR görüntüleme geometrisine göre eğik menzil-LOS doğrultusu üzerinde algılanan bileşenidir (Şekil 4) ve Eşitlik (1.24)'deki gibi ifade edilebilir.

$$\phi_{def} = -\frac{4\pi}{\lambda} D_{LOS} \tag{1.24}$$

Deformasyon fazının (ϕ_{def}) değerlerinin belirlenebilmesi için faz çözümleme (phase unwrapping) aşamasının gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu aşamada interferogram görüntüsündeki belirsiz sayıda ve 2π döngüleri şeklindeki faz değerlerinin çözümlenmesi ile mutlak sayıdaki faz değeri elde edilmektedir. Bu işlem için minimum istatistiksel maliyetli ağ akışı, en küçük kareler, dal kesim (branch-cut) gibi farklı metodlar geliştirilmiştir (Köksal, 2011; Kemaldere, 2011; URL-3, 2021). Bu işlem için Sentinel-1 verilerinin işlendiği SNAP yazılımı, Curtis Chen ve Howard Zebker tarafından geliştirilmiş istatistiksel maliyetli ağ akış algoritmasını kullanan SNAPHU yazılımının kendi verileriyle uyumlu, entegre bir şekilde kullanılabilmesine imkan tanımaktadır. Şekil 5'de sarılı (çözülmemiş-wrapped) ve çözülmüş (unwrapped) faza ait örnek görüntüler bulunmaktadır.



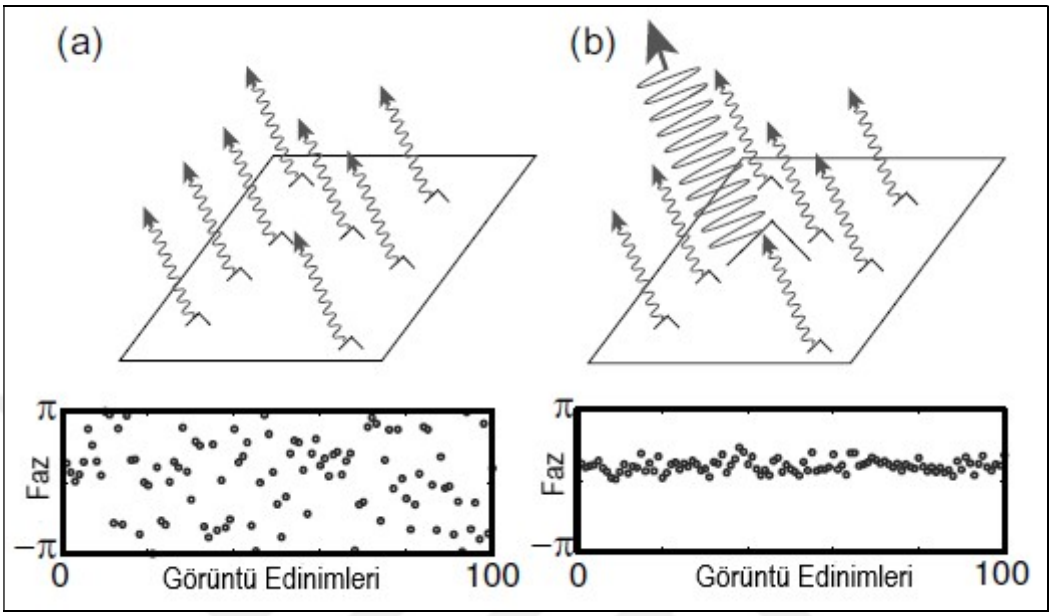
Şekil 5. Sarılmış ve çözülmüş faz görüntüleri (Köksal, 2011; Quarzeddine, 2002'den değiştirilerek)

Geleneksel DInSAR tekniğinin son adımında ise geocoding olarak adlandırılan işlem uygulanarak radar piksel koordinatlarından yer merkezli koordinat sistemine dönüşüm gerçekleştirilir. Böylelikle azimut ve eğik menzil doğrultusundaki radar piksel koordinatları, uydu yörünge bilgileri ve bir SYM veya bir elipsoid modelden faydalanılarak, enlem boylam ve yükseklik bilgilerini içeren yer merkezli coğrafi koordinatlara dönüştürülür. Burada dönüştürülmek istenen düşey koordinatlar topoğrafyaya ait yükseklik bilgisi ise SYM kullanılması gerekmektedir. Elipsoidal yükseklik bilgisine dönüşüm için SYM kullanılmasına gerek yoktur (URL-4, 2021).

1.9. StaMPS PSI Tekniği

Bir SAR görüntüsü oluşturulduğunda, görüntüde yer alan her bir pikselin faz değeri, o piksel içerisinde yer alan birçok sayıda yansıtıcı objeden geri yansıyan sinyallerin uyumlu bir toplamı olarak elde edilir. Eğer bu yansıtıcı objeler, bitki örtülü ortamlarda olduğu gibi görüntü alımları ya da uydu geçişleri arasında birbirlerine göre hareket ederlerse, bu durumda uydu radar sensörüne geri dönen sinyalin fazı rastgele bir biçimde değişir. Bu rastgele değişken faz değerleri de, interferogram oluşturulurken eşleştirilen piksel çiftleri arasında düşük uyumluluğa veya korelasyonsuzluğa sebep olur. Fakat eğer ki; bir piksel, bu piksel içerisinde yer alan diğer yansıtıcı veya saçıcı objelerden daha parlak olan stabil-kararlı bir saçıcı obje ile domine edilirse, bu durumda arka planda kalan diğer saçıcıların göreli hareketlerinden kaynaklanan yansıyan sinyal fazındaki varyansları (rastgele değişken etkileri) yeterince azaltılarak, altta kalan deformasyon sinyaline erişilebilmektedir. Bu tür pikseller Persistent Scatterers (Daimi Yansıtıcılar-Saçıcılar) olarak tanımlanmıştır (Hooper vd., 2004, 2007). Bu pikseller içerisinde yer alan kararlı saçıcılar ise fiziksel olarak, bir ağaç gövdesi, tek büyük bir kaya parçası veya bitki örtüsü arasında kalmış güçlü yansıtıcı bir taş yüzeyi olabilir. Şekil 6'da dağınık (a) ve daimi (b) yansıtıcı piksellerin 100 SAR görüntüsünden elde edilen faz simülasyonları gösterilmiştir. Bu pikseller içerisindeki dağınık ve daimi yansıtıcı objeler şeklin üst kısmında gösterilmiştir. Şeklin alt kısmında ise, bu objelerin 0 ile 100 arasındaki SAR görüntü edinimleri arasında hareket ettikleri konumların simülasyonu gösterilmektedir. Buna göre dağınık yansıtıcı pikselin konumu ve faz değerinin zamanla rastgele değiştiği gözlemlenirken (a-altta), etrafındaki dağınık saçıcılardan yaklaşık üç kat daha parlak olan

kararlı bir saçıcı obje ile domine edilen daimi yansıtıcı pikselin faz değerinin (b-altta) ise stabil olduğu görülebilmektedir.



Şekil 6. Dağınık (a) ve daimi (b) yansıtıcı piksellerin faz simülasyonu (Hooper vd., 2007'den değiştirilerek)

PS piksellerini tanımlama ve ayrıştırma yöntemleri birçok farklı araştırmacı tarafından geliştirilmiştir (Ferretti vd., 2001; Crosetto vd., 2003; Lyons ve Sandwell, 2003; Werner vd., 2003; Kampes, 2005; Hooper vd., 2004, 2007; Ferretti vd., 2009, 2011). Bu yöntemlerin çoğu (Ferretti vd., 2001; Crosetto vd., 2003; Lyons ve Sandwell, 2003; Werner vd., 2003; Kampes, 2005) deformasyonun zamana bağlı değişiminin fonksiyonel bir modelini kullanır ve genellikle zaman içerisinde stabil-düzgün deformasyona maruz kalan kentsel alanlardaki PS piksellerini tanımlamada oldukça başarılıdırlar. Zamansal fonksiyonel model kullanan yöntemlerin algoritmalarında, sinyal gürültü oranı yüksek olan bir başlangıç PS piksel seti, bir dizi interferogram içerisinde genlik varyasyonlarının piksel-piksel analiz edilmesiyle tanımlanmaktadır. Bu algoritmalardaki yaklaşımlar genel olarak, her pikselin tek başına (Ferretti vd., 2001) ve çevresindeki diğer pikseller ile karşılaştırılarak (Adam vd., 2005) analizlerini içerir. Yansıma ya da genlik değerleri değişken olmayan veya stabil olan başlangıç bir piksel kümesi tanımlandıktan sonra, PS pikseli olmaya aday olan her bir piksel, yakınında yer alan diğer aday piksellerle olan faz farklılıkları incelenerek faz kararlılığı açısından test edilir. Test sonucunda, sadece faz

geçmişi varsayılan deformasyon modeline benzer olan bir piksel kararlı-stabil olarak kabul edilerek PS pikseli olarak tanımlanır. Bu şekilde, PS olarak seçilen pikseller dışında kalan diğer piksellerin tamamını veya bir alt kümesini içeren bir PS piksel referans ağı tanımlanarak ve bu ağ içerisinde yer alan tüm diğer piksellerin faz analizleri gerçekleştirilerek görüntüdeki tüm PS pikselleri elde edilmektedir.

Zamansal fonksiyonel modeller iki sebepten ötürü başarısız olmaktadırlar. Bunlardan ilki komşu PS pikselleri arasındaki mesafe çok büyükse meydana gelmektedir. Bu durumda, birincil (m) ve tekrar (s) geçişlerdeki görüntü edinimleri sırasında radar ışınının atmosfer tabakasından geçerken uğradığı gecikmelerdeki farktan kaynaklanan, modellenmemiş faz üzerindeki faz katkısı güvenilir bir şekilde faz çözümlemesi yapılabilmesine engel olur (Hooper vd., 2007). Bu durumla karşılaşılmaması için, PS nokta yoğunluğu genel atmosferik koşullar altında km^2 başına 3-4 PS nokta sayısından fazla olmalıdır (Colesanti vd., 2003). Bu modellerde başlangıç PS seçimi, insan yapımı yapılardaki gibi en parlak PS piksellerini bularak yapı yoğunluğunun fazla olduğu kentsel alanlarda iyi çalışmakta ve gereken PS nokta yoğunluğu veya yakınlığı kolaylıkla elde edilebilmektedir. Ancak, parlak saçıcıların az olduğu doğal arazilerde ise, bu yöntemlerle yakın aralıklı bir PS piksel ağı üretebilmek için elde edilebilecek PS piksel yoğunluğu oldukça düşük kalmaktadır (Hooper vd., 2004, 2007). Zamansal fonksiyonel modellerin başarısızlığındaki ikinci temel sebep ise, deformasyon sinyalini atmosferik, topoğrafik ve diğer faz etkilerini içeren toplam faz değişiminden ayrıştırmak için deformasyondaki zamansal varyanslara göre oluşturulan yaklaşık modellerdir. Bu modellerde, deformasyonun zamana bağımlılığı veya zaman içerisinde nasıl gerçekleştiği genellikle önceden bilinmediğinden, genellikle yaklaşık sabit oranda ve periyodik olarak gerçekleştiği varsayılır. Eğer PS pikselleri tanımlanabilirlerse, başlangıç parametrik modelden olan sapmalar faz artıklarından tahmin edilebilirler (Ferretti vd., 2000; Colesanti vd., 2003; Kampes, 2005). PS pikselleri ise ancak, modelden sapmaların faz çözümünün güvenilir elde edilmesine yetecek kadar küçük olduğunda tanımlanabilmektedirler (Ferretti vd., 2004; Hilley vd., 2004). Fakat toprak kayması veya volkanik ve deniz dolgu alanlarında görülen deformasyonlar gibi yeryüzünde meydana gelen değişimlerin birçoğu zamana göre sabit oranlı ya da düzgün bir biçimde değil, dengesiz bir biçimde gerçekleşmektedir. Bu şekilde dengesiz deforme olan alanlarda, değişimleri zamana göre yaklaşık olarak modellemeye çalışan zamansal fonksiyonel modeller ile güvenilir bir PS piksel ağı elde edilemez (Hooper vd., 2007). Bu tür alanlarda, deformasyonun zamansal

oluşumu ile ilgili herhangi bir öncelikli varsayım olmaksızın, deformasyonun zaman serilerinin elde edilebileceği bir yöntemin kullanılması gerekmektedir. Bu bakımdan, PS piksellerini tanımlamada zamansal fonksiyonel model yerine faz ölçülerinin konumsal korelasyonunu kullanan StaMPS PSI tekniği, değişken deformasyona maruz kalan alanlarda bile hiçbir ön bilgi gerektirmeden ve kentsel olsun veya olmasın tüm arazilerde yeterli miktarda PS noktası üreterek başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir (Hooper, 2006; Hooper vd., 2004, 2007).

StaMPS PSI tekniği genel olarak dört adımda uygulanmaktadır. İlk adımda seçilen master ve slave görüntüler arasındaki faz farklarının DInSAR tekniği ile elde edildiği interferogram görüntüleri oluşturulur. Bu görüntülerde hassas bir SYM ve yörünge verilerinin kullanılmasıyla düz yeryüzü ve topoğrafik faz etkileri büyük ölçüde giderilir. Bu adım ön işleme adımı olarak da adlandırılmaktadır. İkinci adımda faz kararlılık tahminleri elde edilir. Bu adımda ilk önce genlik analizine dayalı olarak PS olmaya aday piksellerin ilk seçimi yapılır, sonrasında ise iteratif bir yöntemle bu piksellerin faz kararlılıklarını tahmin etmek için faz analizi kullanılır. Üçüncü adımda ise PS piksel seçimi gerçekleştirilir. Bu adımda, ikinci adımda pikseller için tahmin edilen faz kararlılıkları ve genlik değerlerinin bir kombinasyonuna bağlı olarak her bir pikselin PS pikseli olma olasılığı tahmin edilir. Sonrasında ise bu tahmin edilen olasılıklar kullanılarak PS pikselleri seçilir. Bu seçim yapılırken, tüm interferogramlarda değil de, yalnızca belirli interferogramlarda kalıcı görünen ve komşu PS piksellerindeki yansıtıcılar tarafından domine edilen pikseller reddedilir. Dördüncü adımda ise, seçilen PS pikselleri üzerindeki deformasyona bağlı sinyal ayrıştırılarak yeryüzü değişimleri tahmin edilir. Bu adımda da, çeşitli gürültü terimleri çıkarılarak faz değerlerinin çözümlemesi gerçekleştirilir. Bu dört adımdan ilki Doris, ISCE, SNAP gibi StaMPS ile entegre olabilen farklı yazılımlar aracılığı ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu tez çalışmasında ise SNAP yazılımı kullanılmıştır. Diğer üç adımdaki işlemler ise StaMPS yazılımı ile yedi adımda gerçekleştirilmektedir. Yazılım ile ilgili uygulamalara ikinci bölümde değinilecektir.

Zamansal modele dayanan PS sistemlerinde, PS piksellerinin seçimi ve güvenilir sonuçlar elde edebilmek için, genellikle en az 25 interferograma ihtiyaç duyulmaktadır (Colesanti vd., 2003). StaMPS kullanılarak ise bu sayı 12 interferograma kadar düşmektedir. Buradaki sınırlayıcı faktör, iyi bir SYM ve yüksek bir SNR ile iyileştirilen bakış açısı hatasının tahminindeki doğruluktur. Tahmin edilen bakış açısı hatası ve dolayısıyla tahmin edilen deformasyon sinyalinin doğruluğu, kullanılan interferogramların

sayısı arttıkça iyileşir. Bu nedenle mümkün olduğunca fazla sayıda görüntünün kullanılması arzu edilir (Hooper vd., 2007).

StaMPS PSI tekniğinde tek bir master (birincil) görüntüye bağlı olarak, toplam N+1 tane SAR görüntüsünden N adet interferogram görüntüsü oluşturulur. Bu interferogramlar seçilen master görüntü ile slave (ikincil) olarak adlandırılan diğer SAR görüntülerinin aralarındaki faz farklarını içermektedirler. Master görüntü, oluşturulacak tüm interferogramlardaki korelasyonsuzluğu minimum ya da korelasyonu maksimum yapacak görüntü olarak seçilir. Korelasyonun (ρ_{toplam}) maksimum olabilmesi ise, master ve slave görüntüler arasındaki geometrik dik bazların, zamansal aralıkların, doppler merkez kayıklığının ve oluşturulacak interferogramlardaki termal gürültünün ya da bu etkenlerden kaynaklanan korelasyonsuzlukların minimum olmasına bağlıdır. Master seçimindeki korelasyon denklemi (Eşitlik 1.25) kullanılarak bu durum aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Hooper vd., 2007).

$$\rho_{toplam} = \rho_Z \gamma_K \gamma_D \gamma_T \tag{1.25}$$

Eşitlik (1.25)'de verilen $\gamma_K, \gamma_D, \gamma_T$, sırasıyla daha önce Eşitlik (1.21-1.23) arasında değinilen konumsal, doppler merkezi ve termal korelasyonsuzluk (sabit olarak kabul edilebilir (Hooper vd., 2007)) ya da korelasyon değerlerini ifade etmektedir. ρ_Z ise görüntü edinimleri arasındaki zamansal aralıklara bağlı zamansal bir korelasyon değeridir. Zaman aralığı arttıkça bu değere bağlı korelasyon azalmaktadır. Bu değer, yansıtıcı yüzeyin özelliklerine bağlı olarak görüntünün farklı kısımlarında farklı gürültülere sebep olan zamansal korelasyonsuzluk (γ_Z)'dan farklı olarak, sadece en uygun master görüntü seçimi için kullanılan yaklaşık bir değerdir. ρ_Z, T görüntü edinimleri arasındaki zaman aralığı, T_C ise aşıldığında korelasyonsuzluğa neden olacağı varsayılan görüntü edinim tarihleri arasındaki kritik zaman aralığı olmak üzere, Eşitlik (1.26) ile elde edilebilir.

$$\rho_Z = 1 - \frac{T}{T_C} \tag{1.26}$$

Eşitlik (1.26)'da ki kritik zaman aralığı değeri (T_C), çalışma alanı, süresi ve veri setine bağlı olarak kullanıcı tarafından belirlenebilmektedir. ERS uyduları ile kurak alanlarda yapılacak çalışmalar için bu değer tipik olarak 5 yıl seçilebilir (Hooper vd.,

2007). SNAP yazılımı kullanılarak, bu dört terimin çarpımı ($\rho_Z, \gamma_K, \gamma_D, \gamma_T$) ile elde edilecek toplam korelasyon ya da uyumluluk (ρ_{toplam}) değerine göre en uygun master görüntü seçilebilmektedir.

StaMPS PSI tekniğinde, konumsal çözünürlüğü kabalaştıracağından dolayı, menzil ve azimut yönlerinde korelasyonu arttırıcı herhangi bir spektral filtre uygulanmaz. Çünkü genel olarak, konumsal çözünürlük ne kadar yüksek olursa, her bir piksel içerisinde o kadar az sayıda saçıcı obje bulunur ve böylelikle pikselin bir saçıcı tarafından domine edilme şansı ya da başka bir deyişle PS pikseli olma şansı o kadar artar.

İnterferogramlar master ve slave görüntü edinim geometrilerindeki farklılıktan kaynaklanan geometrik bir faz terimi içerirler. Geleneksel DInSAR tekniğinde olduğu gibi StaMPS tekniğinde de bu etki iki adımda düzeltilir. İlk adımda yansıtıcı yeryüzü yüzeyinin bir referans elipsoid yüzeyi olduğu varsayımıyla, her bir pikselin fazı düzeltilerek interferogramlar düzleştirilirler. İkinci adımda ise bir SYM radar koordinat sistemine dönüştürülerek, gerçek yüzeyin referans elipsoidden sapmasından kaynaklanan faz tahmin edilir. Bu işlem esnasında iki hata terimi ortaya çıkar. Bunlar bakış açısı hatası ve sapma açısı (squint angle) hatasıdır. Buradaki sapma açısı hatası, master ve slave görüntülerdeki azimut doğrultusundaki doppler faz merkezleri arasındaki farka ya da kayıklığa sebep olan hatadır (Kampes, 2005). Bu hata StaMPS tekniğinde bir gürültü terimi olarak ele alınarak giderilir. StaMPS tekniğinde bakış açısı hatası olarak adlandırılan hata (Hooper vd., 2007; Hooper, 2006) ise, Eşitlik (1.12) ve Eşitlik (1.16)'da ikinci terim olarak gösterilen ve geleneksel InSAR-DInSAR tekniğinde topoğrafyadan kaynaklanan faz etkisidir. Bu hata neredeyse tamamen SYM' deki hatadan kaynaklanır ve genellikle SYM hatası olarak adlandırılır. SYM hatası, yer değişimlerinin belirlenmesi sürecinde SYM' deki belirsizliklerden kaynaklanan bir hata terimidir. SYM hata terimi (ϕ_{SYM}), Eşitlik (1.16)'da ki topoğrafik faz bileşeninin h_P' ye göre türevinin alınması ile aşağıdaki gibi (Eşitlik 1.27) elde edilir (Bamler ve Hartl, 1998; Lauknes, 2004).

$$\phi_{SYM} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}^{0}}{R \sin\theta_0} \tag{1.27}$$

Bakış açısı hatasına SYM hatası haricinde etki eden küçük bir hata daha vardır. Bu hata azimut yönünde etki eden sapma açısı hatası gibi, menzil yönündeki faz merkezi kayıklığından kaynaklanan hatadır. Bu nedenle, topoğrafik fazı elimine etmek için

kullanılan SYM tamamen doğru olsa ya da hiç hata içermese dahi, faz merkezinin menzil yönündeki yanal kayması ve bu kaymanın yükseklik değişimine olan etkileri yüzünden, yine de bakış açısında bir miktar hata meydana gelmektedir (Hooper vd., 2007). Bakış açısı hatası içerisinde yer alan ve bu hatanın genelini oluşturan SYM hata terimi, aynı taşıyıcı frekansta ya da aynı radar misyonuna ait olarak elde edilen veri grubunun değerlendirilmesi sürecinde, menzil yönündeki faz merkezi kayıklığı hatasından ayırt edilemez. Ancak farklı taşıyıcı frekanstaki (Örneğin; Envisat, ERS gibi) verilerin birlikte değerlendirilmesi ile bu hataların birbirinden ayırt edilmesi mümkün olabilmektedir (Colesanti vd., 2003; Kampes, 2005; Hooper vd., 2007). PSI uygulamalarında, bakış açısı hatasının tahmin edilmesi ve giderilmesinde, interferogram sayısı fazla ise (>12), kullanılan SYM' nin çok yüksek doğrulukta olması genellikle önemli değildir. Genellikle kullanılmakta olan ve birkaç metre doğruluktaki SYM' ler çoğu deformasyon çalışması için yeterli hassasiyeti sağlamaktadır. Ancak interferogram sayısının az olduğu (<12) uygulamalarda, yüksek doğruluktaki SYM' ler bakış açısı hatası ve deformasyon sinyalinin daha doğru tahmin edilebilmesinde belirsizlikleri azaltıcı önemli bir etkiye sahiptir (Hooper vd., 2007).

Faz kararlılık tahminlerinin gerçekleştirildiği ikinci adıma geçilmeden önce, tekli master-slave interferogram görüntülerinin oluşturulduğu ilk adımın son aşamasında, uydu yörünge parametreleri ve SYM kullanılarak her bir pikselin konumunun yer merkezli referans sistemi üzerinde tahmin edildiği geocoding işlemi gerçekleştirilir. Böylelikle tüm piksellere ait enlem, boylam ve yükseklik bilgileri elde edilir.

Faz kararlılık tahminlerinin gerçekleştirildiği aşamada ise, başlangıçta piksellerin genliklerinin analizine bakılarak ve PS olma ihtimali en düşük olanlar reddedilerek, bir piksel alt kümesi seçilir. Ardından seçilen bu piksellerin her birinin faz kararlılığı, bir seri iterasyon çözümü içerisinde uygulanan faz analizi yoluyla tahmin edilir. Ayrıca, bu aşamanın sonunda kullanıcının isteğine bağlı (opsiyonel) olarak gerçekleştirilen bir adım daha bulunmaktadır. Bu adımda, başlangıçtaki genlik analizlerine bağlı olarak seçilmeyen ya da ilk olarak reddedilen piksellerin faz kararlılıkları tahmin edilebilmektedir.

Faz kararlılık tahmininin ilk adımını oluşturan genlik analizi aşaması, başlangıçtaki PS piksel adaylarının seçiminde, başlangıç piksel sayısının azaltılmasını sağlayan, genlik ve faz stabilitesi arasındaki istatistiksel bir bağlantıdır. Bu bağlantıya Genlik Dağılım İndeksi fonksiyonu adı verilir (Ferretti vd., 2001). Buna göre Genlik Dağılım İndeksi (D_A), σ_A ve μ_A, bir piksel üzerindeki tüm interferogramlar boyunca elde edilen genlik

değerlerinin standart sapması ve ortalaması olmak üzere, Eşitlik (1.28)'deki gibi elde edilir.

$$D_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A} \tag{1.28}$$

Ferretti vd. (2001) çalışmasında "$D_A \leq 0.25$" olan pikseller başlangıç adayları olarak seçilirken, StaMPS PSI tekniğinde ise, seçilen piksellerin çoğunun PS olamayacağı daha geniş bir genlik dağılım aralığındaki "$D_A \leq 0.4$" pikseller başlangıç adayları olarak seçilir (Hooper vd., 2004, 2007; Hooper, 2006). Ama buna rağmen, sulak ve bitki örtülü alanlar üzerindeki çok düşük korelasyonlu pikseller elimine edilmiş olur (Hooper, 2006; Hooper vd., 2007). İleri InSAR tekniklerinden bir başkası olan SBAS tekniğinde ise bu değer genel olarak en düşük 0.6 olarak alınmaktadır. Başlangıç seçiminde kullanılan bu eşik değeri tamamen kullanıcının seçimine bağlıdır ve istenirse arttırılabilir. Bu değerin düşük tutulması işlem sürecini ve bilgisayar bellek gereksinimlerini önemli ölçüde azaltabilirken (Sousa vd., 2011), bir miktar yüksek tutulması ise özellikle heterojen ve dengesiz deforme olan alanlarda daha fazla PS noktası üretilerek, deformasyon olgusunun daha iyi bir biçimde ortaya çıkarılabilmesini sağlamaktadır (Altintas ve Gokalp, 2021).

Genlik analizi ile başlangıç PS aday pikselleri seçildikten sonra, bu aday piksellerin her birinin faz kararlılıkları faz analizi kullanılarak tahmin edilir. Topoğrafik ve düz yeryüzü faz etkileri hassas SYM ve yörünge verileri kullanılarak çoğunlukla giderilmiş i. interferogramdaki x. pikselin sarılı (çözülmemiş) fazı ($\psi_{x,i}$), Eşitlik (1.29)'da yer alan beş terimin çözülmemiş toplamı (W{}) olarak ifade edilebilir.

$$\psi_{x,i} = W\{\phi_{D,x,i} + \phi_{A,x,i} + \Delta\phi_{S,x,i} + \Delta\phi_{\theta,x,i} + \phi_{N,x,i}\} \tag{1.29}$$

Eşitlik (1.29)'da yer alan $\phi_{D,x,i}$, piksel içerisindeki yansıtıcı objenin LOS yönündeki hareketine bağlı faz değişimini gösterirken, $\Delta\phi_{\theta,x,i}$ ise topoğrafik etkisi çoğunlukla giderilmiş fazdaki bakış açısı hatasından kaynaklanan artık fazı ifade etmektedir. $\phi_{A,x,i}$, veri edinimleri sırasında karşılaşılan atmosferik gecikmelerdeki farktan kaynaklanan faz etkisidir. $\Delta\phi_{S,x,i}$, uydu yörünge belirsizliklerine bağlı artık faz etkisidir. $\phi_{N,x,i}$, DInSAR konusunda da değindiğimiz, çeşitli sebeplerden kaynaklanan gürültü terimidir. W ise çözülmemiş-sarılı faz operatörünü ifade etmektedir. Eşitlikte yer alan ilk üç terim

konumsal olarak korelasyonludur. SYM hatası da kısmen konumsal olarak korelasyonlu olduğundan, bakış açısından kaynaklı faz etkisini içeren dördüncü terimde kısmen konumsal olarak korelesyonlu kabul edilir (Hooper vd., 2007). PS olarak aranan pikseller, buradaki gürültü teriminin sinyali tamamen belirsiz hale getirmeyecek kadar küçük olduğu piksellerdir (Hooper vd., 2004, 2007).

Eşitlik (1.29)'da yer alan ilk dört terim sarılı faz içerisindeki gürültü teriminin tahmin edilmesini ve buna bağlı olarak daimi yansıtıcıların tanımlanmasını zorlaştırır. Bu nedenle bu dört terimin değeri, gürültü terimi ($\phi_{N,x,i}$) için istatistiksel tahmini bir değer verilerek, tahmin edilir. Sonrasında tekrardan gürültü teriminin istatistikleri kullanılarak ilk dört terim tahmin edilir. Bu işlem yinelemeli bir biçimde değerler yakınsayıncaya kadar (genellikle birkaç iterasyon) gerçekleştirilerek gürültü terimi hassas bir biçimde tahmin edilir.

Gürültüyü tahmin etmek için frekans alanı içerisinde alçak geçişli filtre ile kombine edilmiş adaptif bir filtre olarak bant geçişli filtre uygulanır. Bu filtre uygulanırken, filtre içerisinde yer alan tüm interferogramlardaki tüm PS aday pikselleri ağırlıklandırılır. Bu ağırlıklandırma yazılım içerisinde isteğe bağlı olarak iki farklı şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Bunlardan birincisi filtre içerisindeki piksellerin genliklerinin tahmini bir SNR değerine ayarlanarak yapılan ağırlıklandırmadır. Diğer yöntem ise, P, kalıcı-PS olma olasılığı olmak üzere, her bir aday pikselin genlik değerlerinin 1/P 'ye ayarlanarak yapılan ağırlıklandırmadır. PS olma olasılığına göre yapılan ağırlıklandırma ile genellikle daha fazla PS noktası elde edilebilmektedir (Hooper vd., 2007; Hooper, 2006). Bu nedenle bu tez çalışmasında bu yöntem tercih edilmiştir.

Karmaşık yapıdaki piksel faz sinyalinin bileşenlerine ayrıştırılabilmesi ve anlaşılır hale dönüştürülebilmesi için iki boyutlu Hızlı Fourier Dönüşümü (2-D HFD) kullanılır. Bu dönüşümün uygulanabilmesi için ise, ağırlıklandırılmış piksellerin kompleks fazı, faz değerlerinde küçük değişikliklerin olması beklenen tipik olarak 40-100 metre aralıklı bir ızgaraya örneklenir. Bu değer yazılımda standart olarak 50 m dir. Aynı ızgara hücresine birden fazla piksel düştüğünde, bunların karmaşık değerleri toplanır. 2 boyutlu HFD, piksellerin konumsal olarak ilişkili kalması beklenen mesafeye bağlı olarak, genel olarak 32 x 32 veya 64 x 64 piksellik bir ızgara boyutuna uygulanır. Fakat bu ızgaranın boyutu çalışma alanına bağlı olarak arttırılıp düşürülebilir. Filtrenin uyarlanabilir-adaptif kısmı, piksellerin kendi fazlarında bulunan baskın frekanslara dayalı olarak geçiş bandını belirler (Hooper, 2006; Hooper vd., 2007, 2018). Z(u,v); 2 boyutlu Hızlı Fourier Dönüşümünün

7x7 boyutlu Gauss filtre penceresi ile yumuşatılmış yoğunluğu olmak üzere, Adaptif filtrenin cevabı (H(u,v)) Eşitlik (1.30) ile aşağıdaki gibi elde edilir (Goldstein ve Werner, 1998; Hooper vd., 2007; Hooper, 2006).

$$H(u,v) = |Z(u,v)| \tag{1.30}$$

Adaptif faz filtrenin cevabı (H(u,v)) dar bir alçak geçişli filtre olan beşinci dereceden Butterworth filtre cevabı (L(u,v)) ile kombine edilerek Eşitlik (1.31)'de verilen yeni filtre sonucu (G(u,v)) oluşturulur.

$$G(u,v) = L(u,v) + \beta\left(\frac{H(u,v)}{\bar{H}(u,v)} - 1\right)^{\alpha} \tag{1.31}$$

Eşitlik (1.31)'deki $\bar{H}(u,v)$, H(u,v)'nin filtre içerisine giren piksel yoğunlukları arasından ortanca değeri belirleyen medyan filtresi ile bulunan değerleridir. α, β ise tipik olarak sırasıyla 1 ve 0.3 değerlerini alan ayarlanabilir ağırlık parametreleridir.

Eşitlik (1.31)'de yer alan faz filtreleme işlemi gerçekleştirildiğinde, filtrelenmiş faz değeri ($\widetilde{\psi_{x,i}}$), Eşitlik (1.29)'da yer alan gürültü haricinde kalan ilk dört terimin konumsal olarak korelasyonlu kısımlarının sarılı (çözümlenmemiş) faz toplamı olarak elde edilir. Bu durumda filtrelenmiş faz değeri ($\widetilde{\psi_{x,i}}$), Eşitlik (1.29)'da yer alan $\psi_{x,i}$ değerinden çıkarılarak sarılı fazın konumsal olarak korelasyonsuz kısmı (ϕ^{u}) Eşitlik (1.32)'deki gibi elde edilir.

$$W\{\psi_{x,i} - \widetilde{\psi_{x,i}}\} = W\{\phi^{u}_{D,x,i} + \phi^{u}_{A,x,i} + \Delta\phi^{u}_{S,x,i} + \Delta\phi^{u}_{\theta,x,i} + \phi^{u}_{N,x,i}\} \tag{1.32}$$

Eşitlik (1.32)'de yer alan $\phi^{u}_{D,x,i}$, $\phi^{u}_{A,x,i}$ ve $\phi^{u}_{S,x,i}$ terimlerinin küçük olması beklenir. Bu terimlerin toplamı $\delta_{x,i}$ ile değiştirilerek, bakış açısı hatasının korelasyonsuz kısmının eşitliği ($\Delta\phi^{u}_{\theta,x,i} = \frac{4\pi}{\lambda} B_{\perp,x,i}\Delta^{u}_{\theta,x,i}$) yerine konduğunda Eşitlik (1.33) elde edilir.

$$W\{\psi_{x,i} - \widetilde{\psi_{x,i}}\} = W\left\{\frac{4\pi}{\lambda} B_{\perp,x,i}\Delta^{u}_{\theta,x,i} + \phi^{u}_{N,x,i} + \delta_{x,i}\right\} \tag{1.33}$$

Eşitlik (1.33)'de yer alan bakış açısı hatasının korelasyonsuz kısmı ($\phi^{u}_{\theta,x,i}$), menzil yönündeki faz merkezi kayıklığından ya da faz merkezinin piksel merkezinde

olmamasından kaynaklanan hatadır (Hooper vd., 2018). Bu hatanın içerisinde yer alan bakış açısındaki değişimin korelasyonsuz hatasının ($\Delta\theta_x^u$) tahmini ($\Delta\hat{\theta}_x^u$) en küçük kareler yaklaşımıyla elde edilir. Ayrıca master görüntüden kaynaklanan ve tüm interferogramlardaki korelasyonsuz $\phi_{N,x,i}^u + \delta_{x,i}$ hatalar toplamına etki eden korelasyonsuz sabit hata ($\phi_x^{m,u}$) da, en küçük karelerin tersi ile hesaplanır. $\Delta\hat{\theta}_x^u$'nun tahmin edilmesiyle bakış açısı hatasının korelasyonsuz kısmının tahmini ($\Delta\hat{\phi}_{\theta,x,i}^u$) türetilerek Eşitlik (1.33)'den çıkartılırsa, Eşitlik (1.34) aşağıdaki gibi elde edilir (Hooper vd., 2007; Hooper, 2006).

$$W\{\psi_{x,i} - \widetilde{\psi_{x,ı}} - \Delta\hat{\phi}_{\theta,x,i}^u\} = W\{\phi_{N,x,i}^u + \delta'_{x,i}\} \tag{1.34}$$
$$\delta'_{x,i} = \delta_{x,i} + \Delta\phi_{\theta,x,i}^u - \Delta\hat{\phi}_{\theta,x,i}^u$$

Eşitlik (1.34)'de ifade edilen x. pikselin artık fazının tüm interferogramlardaki varyasyonlarının faz gürültü seviyesi ve kararlılığının ölçüsü (γ_x), N interferogramların sayısı olmak üzere ve $\phi_{N,x,i} \approx \phi_{N,x,i}^u$, $\delta_{x,i} \approx 0$ olduğu varsayımlarıyla Eşitlik (1.35)'deki gibi elde edilir. Bu değer, önceden değindiğimiz geleneksel InSAR tekniğindeki uyumluluk ölçüsüne benzeyen, fakat ondan farklı olarak konumdan ziyade zamansal uyumluluğa bağlı bir ölçüdür ve aynı zamanda bir pikselin PS olup-olmadığının göstergesidir (Hooper vd., 2007; Hooper, 2006).

$$\gamma_x = \frac{1}{N}\left|\sum_{i=1}^{N} \exp\{\sqrt{-1}(\psi_{x,i} - \widetilde{\psi_{x,ı}} - \Delta\hat{\phi}_{\theta,x,i}^u)\}\right| \tag{1.35}$$

Her bir iterasyondan sonra faz kararlılık ölçüsündeki (γ_x) karesel ortalama (Root-Mean-Square (RMS)) değişimi hesaplanır. İterasyon azalmayı bıraktığında, çözüm yakınsar ve algoritma yinelemeyi durdurur. Sonrasında ise PS pikselleri PS olma olasılıklarına göre genlik dağılım ve faz kararlılık değerleri dikkate alınarak seçilir (Hooper vd., 2007; Hooper, 2006; Sousa vd., 2010, 2011).

En uygun PS pikselleri seçildikten sonra, diğer tüm pikseller atılır ve Eşitlik (1.29)'da verilen sarılı interferogram fazına geri dönülür. Bu eşitlikte yer alan deformasyon terimini elde edebilmek için faz çözümlemesi yapılır ve diğer gürültü terimleri tahmin edilerek çıkarılır. Faz çözümlemesinin doğru bir biçimde yapılabilmesi için komşu PS pikselleri arasındaki faz farkının genel olarak π den küçük olması gerekmektedir. Bu değerin aşılmasının en büyük sebebi konumsal korelasyonsuz bakış açısı hatasıdır. Bu

nedenle faz çözümlemesi yapılmadan önce, daha önceden tahmin edilen bu hata terimi ($\Delta\widehat{\phi}^{u}_{\theta,x,i}$) sarılı fazdan çıkarılır. Bunun haricinde, önceden tahmin edilen sinyalin fazı içerisindeki master görüntüden kaynaklanan konumsal korelasyonsuz hatası ($\widehat{\phi}^{m,u}_{x}$) da sarılı fazdan çıkartılarak Eşitlik (1.36) elde edilir.

$$W\left\{\psi_{x,i} - \Delta\widehat{\phi}^{u}_{\theta,x,i} - \widehat{\phi}^{m,u}_{x}\right\} = W\left\{\phi_{D,x,i} + \phi_{A,x,i} + \Delta\phi_{S,x,i} + \Delta\phi^{C}_{\theta,x,i} + \Delta\phi_{N,x,i}\right\} \quad (1.36)$$

Eşitlik (1.36)'da verilen $\Delta\phi^{C}_{\theta,x,i}$, bakış açısı ya da SYM hatasının konumsal korelasyonlu kısmıdır. $\Delta\phi_{N,x,i}$ ise $\phi_{N,x,i} - \widehat{\phi}^{m,u}_{x}$ ifadesine eşit, konumsal korelasyonsuz artık gürültü terimidir. Yukarıdaki eşitlik elde edildikten sonra faz çözümlemesi gerçekleştirilir. StaMPS tekniğinin ilk versiyonunda (Hooper vd., 2004) zaman alanı içerisinde iki boyutlu bir faz çözümlemesi gerçekleştirilmekteydi. Sonraki ve günümüzde kullanılan versiyonlarında ise, Hooper (2006), Hooper ve Zebker (2007) ve Hooper (2010) tarafından geliştirilen üç boyutlu faz çözümleme algoritmaları kullanılarak faz çözümlemesi gerçekleştirilmektedir. Elde edilen faz verisi, ikisi konum ve biri zamanda olmak üzere, üç boyutlu olduğundan, üç boyutlu faz çözümleme yöntemi ile daha doğru sonuçlar elde edilebilmektedir (Hooper, 2006, 2010; Hooper vd., 2007; Hooper ve Zebker, 2007). Faz çözümleme sonrasında, $k_{x,i}$, bilinmeyen tamsayı belirsizliği olmak üzere, çözümlenmiş faz ($\widehat{\phi}_{x,i}$) Eşitlik (1.37)'deki gibi ifade edilebilir.

$$\widehat{\phi}_{x,i} = \phi_{D,x,i} + \phi_{A,x,i} + \Delta\phi_{S,x,i} + \Delta\phi^{C}_{\theta,x,i} + \Delta\phi_{N,x,i} + 2k_{x,i}\pi \quad (1.37)$$

Faz çözümlemesinden sonra, master ve ikincil görüntülerden kaynaklanan konumsal korelasyonlu gürültüler zamansal ve konumsal bir filtreleme kombinasyonu kullanılarak tahmin edilebilirler. Bu gürültüler master görüntüdeki atmosferik ve yörünge hatalarından kaynaklanan faz etkileri ile ikincil görüntülerden toplam faza etki eden ve neredeyse tamamen SYM içerisindeki hatadan kaynaklanan konumsal korelasyonlu bakış açısı hatasıdır. Bu hataların tahmin edilebilmesi için, öncelikle her bir interferogramdaki komşu PS pikselleri arasındaki faz farkları hesaplanır, sonrasında ise bu faz farklarına zaman içerisinde gauss alçak geçişli yumuşatma filtresi uygulanır. İkincil görüntülerden kaynaklanan atmosferik etkilerin tahmin edilerek ortadan kaldırılması için ise, kullanıcı isteğine bağlı olarak, komşu PS pikselleri arasında elde edilen faz farklarına zaman

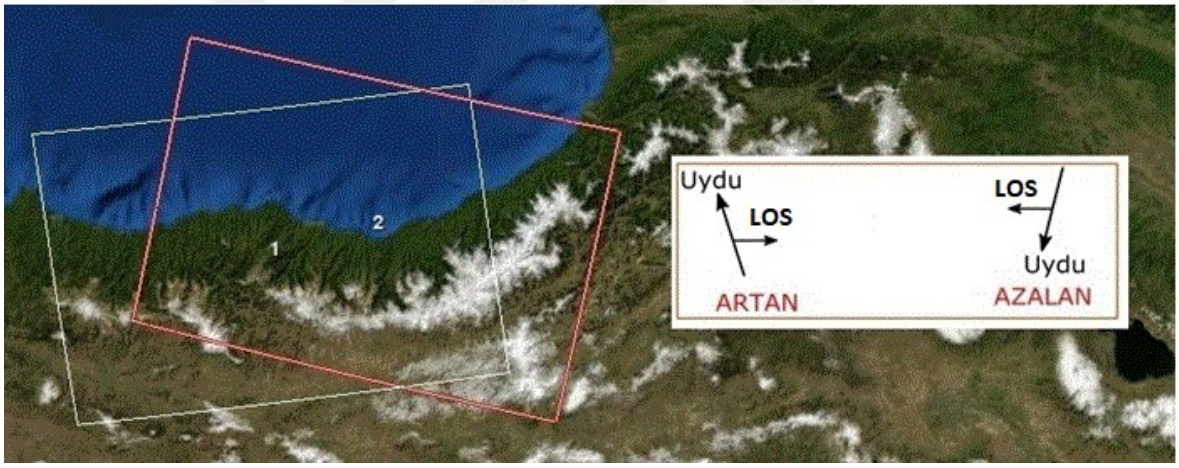
içerisinde yüksek geçişli bir filtre şeklinde uygulanan son bir adım gerçekleştirilebilir. Fakat bu tez çalışmasında bunun yerine, GACOS atmosferik verileri ve TRAIN atmosferik gecikme modellemesine dayanan daha gerçekçi bir yaklaşım tercih edilmiştir. Tüm interferogramlardaki konumsal korelasyonlu hatalar tahmin edilerek giderildikten sonra, deformasyonlar belirlenir. Bir PS noktası referans seçilerek, bu noktaya bağlı olarak tüm interferogramlardaki bağıl deformasyon oranları ve bunların yıllık ortalama hız değerleri standart sapmaları ile birlikte belirlenir. StaMPS PSI tekniği ile ilgili daha ayrıntılı bilgi için Hooper (2006), Hooper vd. (2007) ve Hooper vd. (2018) çalışmalarına bakılabilir.

1.10. Sentinel-1 Uydu Misyonu

Bu tez çalışmasında ESA tarafından Copernicus programı çerçevesinde geliştirilen Sentinel-1 uydu misyonuna ait, tüm kullanıcıların erişimine açık bir şekilde sunulan, ücretsiz ve işlenmiş birinci seviyedeki SLC (Single Look Complex) SAR verileri kullanılmıştır. Bu nedenle bu bölümde Sentinel-1 uydu misyonu ve veri tipleri anlatılacaktır.

Yeryüzünde meydana gelen yüzey değişimlerinin ya da deformasyonların izlenmesi üzerine gerçekleştirilen InSAR tekniği ile ilgili çalışmaların geliştirilmesinde SAR uydu teknolojilerinin gelişimi önemli rol oynamıştır. Yeni çıkan uydu misyonlarında uydu görüntü çözünürlüklerinin gitgide iyileştirilmesi, farklı bantlardaki farklı dalga boyu uzunluklarından kaynaklanan farklı geçirgenlik ve polarizasyon (mikro dalga sinyalinin iletim ve alım yönü) özelliklerine sahip radar sinyallerinin kullanılması ve tekrar geçişler arasındaki zamansal periyotların kısaltılması ile hem kırsal hem de kentsel alanlarda meydana gelen yüzey değişimleri ve SYM'ler daha yüksek hassasiyette tespit edilebilmeye başlamışlardır. Bu bakımdan kendinden önceki ESA'nın ERS-1, ERS-2 ve ENVISAT uyduları ile Kanada'nın RADARSAT-1 ve RADARSAT-2 uydularının devamı niteliğinde olan Sentinel-1, dalga boyu 5.55 cm uzunluğundaki C bandında, hem tek (HH veya VV, (H: Horizontal (Yatay), V: Vertical (Düşey))) hem de çift polarizasyonda (HH+HV veya VV+VH), gece veya gündüz, her türlü hava koşulunda tüm yeryüzünün görüntülemesini yapabilen bir uydu misyonudur (ESA Sentinel-1 Team, 2013). Bu misyon 98.18^0lik eğim açısına sahip, 693 km yüksekliğindeki güneş senkronlu, yakın-kutupsal daire şeklindeki yörünge üzerinde 180^0 lik açısal fark ile hareket eden Sentinel-1A (S-1A) ve Sentinel-1B (S-1B) uydularından oluşmaktadır. Sentinel-1A ve Sentinel-1B uyduları sırasıyla 3 Nisan

2014 ve 25 Nisan 2016 tarihlerinde Fransız Guyanası'nda bulunan uzay üssünden bir Soyuz roketi üzerinde fırlatılmıştır (URL-1, 2021). Her bir uydunun hem artan (ascending- uydunun güneyden kuzeye doğru hareketi) hem de azalan (descending- uydunun kuzeyden güneye doğru hareketi) geçiş yörüngeleri üzerinde tekrar geçiş süresi 12 gün olmakla beraber (Torres vd., 2012), Sentinel-1B uydusunun fırlatıldığı tarihten itibaren, birlikte kullanıldıklarında tekrar geçiş süresi 6 güne düşmektedir. Böylelikle değişim izleme çalışmalarında, işlemin doğruluğunu arttırıcı yönde önemli ölçüde fayda sağlayacak daha fazla sayıdaki görüntü dizinini elde etme çok daha kısa zaman almaktadır. Aşağıda yer alan Şekil 7'de çalışma alanını çevreleyen 18.06.2017 tarihli S-1A artan (sol taraftaki beyaz dikdörtgenle çevrili) ve S-1B azalan (sağ taraftaki kırmızı dikdörtgenle çevrili) görüntülerinin uydu geçiş hareket yönleri ile buna dik uydu bakış doğrultuları (LOS) kapsadıkları alanlarla birlikte gösterilmiştir.

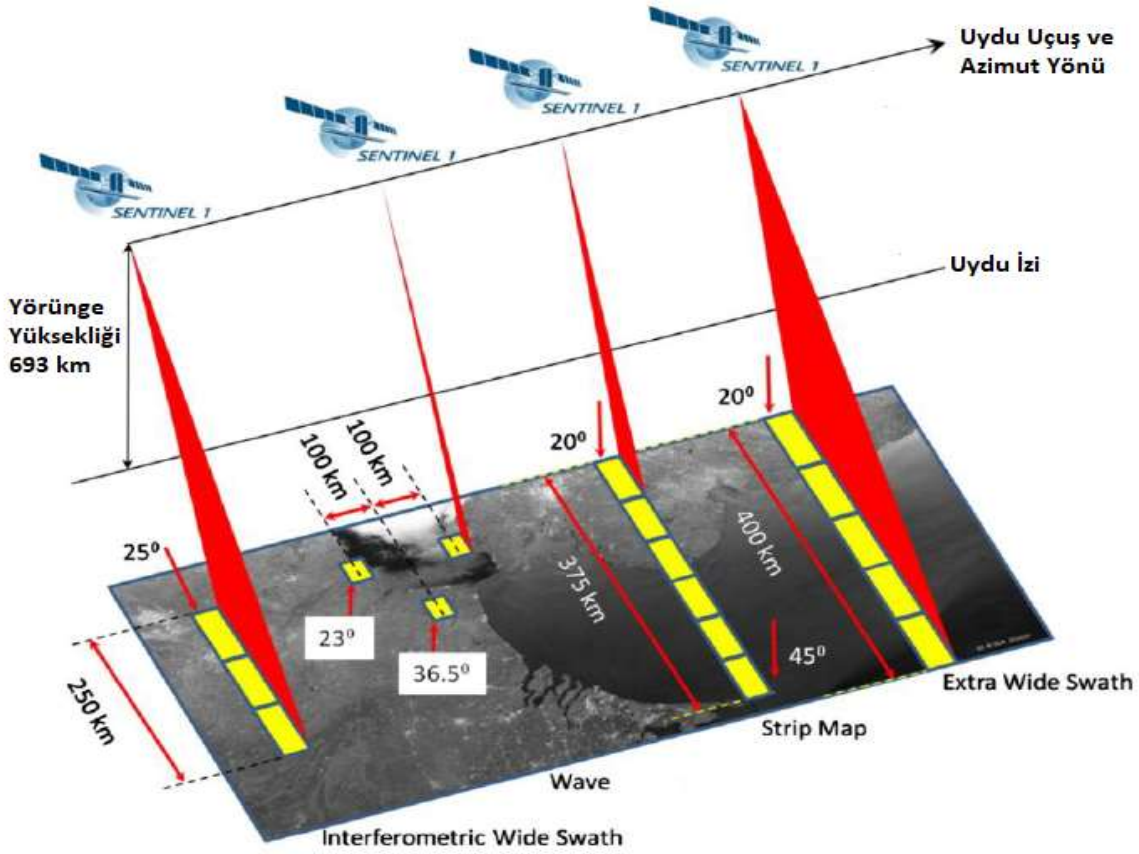


Şekil 7. 18.06.2017 tarihli S-1A artan ve S-1B azalan geçiş üzerindeki uydu hareket ve bakış yönleri

Sentinel-1 uydu misyonu birçok farklı uygulama sağlama amaçlı olarak geliştirilmiştir. Bunlar genel olarak; Orman, su, toprak ve tarım arazilerinin izlenmesi, yeryüzünde meydana gelen hareketlerin izlenmesi, doğal felaketler durumunda acil durum haritalama desteğinin oluşturulması, deniz ve çevresinin izlenmesi, deniz buzu gözleme ve buz dağı izlenmesi, yüksek çözünürlüklü buz haritalarının üretilmesi, denizdeki buz koşullarının tahmin edilmesi, petrol sızıntılarının haritalandırılması, deniz aracı algılama ve iklim değişikliklerinin izlenmesi olarak sıralanabilir (ESA Sentinel-1 Team, 2013).

Sentinel-1 uydu misyonu kullanıcılara hem tek (HH veya VV) hem de çift polarizasyonda (HH+HV veya VV+VH) 4 farklı görüntüleme modu ile veri sağlamaktadır. Bunlar; Stripmap (SM), Interferometric Wide Swath (İnterferometrik Geniş Tarama Alanı) (IW), Extra Wide Swath (Ekstra Geniş Tarama Alanı) (EW) ve Wave (Dalga) (WV) modlarıdır. Bu görüntüleme modlarından SM, IW, EW hem tek hem de çift polarizasyonda, WV ise sadece tekli polarizasyonda veri içermektedir. Başlıca görüntüleme modları; kara üzerindeki çift polarizasyonlu (VV+VH) IW ve okyanus üzerindeki tekli polarizasyonlu (VV) WV modlarıdır. WV modu küresel okyanus dalgası modelleriyle birlikte açık okyanuslardaki dalgaların yönü, boyu ve yüksekliklerinin belirlenmesine yardımcı olmak için geliştirilmiştir. EW modu özellikle geniş kıyı alanlarının, gemi trafiğinin, denize karışan petrol sızıntılarının ve deniz-buz değişimlerinin izlenmesinde kullanılmaktadır. SM modu sadece acil durum yönetimi gibi olağan dışı durumlarda talep üzerine kullanılmak için geliştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan IW modu ise kullanıcıların hizmet gereksinimlerinin çoğunu tek başına karşılayan ve WV modunun kullanıldığı bazı uygulamalar hariç, çoğu uygulamada kullanılabilen en kullanışlı görüntüleme modu olarak öne çıkmaktadır (ESA Sentinel-1 Team, 2013). Şekil 8'de görüntüleme modları tarama alan genişlikleri ile birlikte gösterilmiştir.

Her bir görüntüleme modu, farklı genişliklerde kapsama alanlarına sahip, farklı mekansal çözünürlüklerde veriler içermektedir. SM modu, ERS ve ENVISAT uydu görevleriyle devamlılık sağlayan, 20^0-45^0 arasındaki uydu geliş açısı ile 5x5 m konumsal çözünürlüğe ve 80 km lik tarama genişliğine sahip görüntüleme modudur. Bu çalışmada kullanılan IW modu ise, 29^0-46^0 lik geliş açısı ile yaklaşık 5(menzil)x20(azimut) m konumsal çözünürlüğe ve 250 km lik oldukça geniş bir tarama alanına sahiptir. 19^0-47^0lik geliş açısıyla 20x40 m çözünürlük sunan EW modu ise 400 km lik şerit genişliği ile en geniş tarama alanına sahip görüntü alım modudur. WV modu 22^0-35^0 ve 35^0-38^0olmak üzere iki farklı uydu geliş açısı ile 5x5 m konumsal çözünürlüğe ve 20 km x 20 km lik şerit genişliğine sahip görüntü alım modudur. Aşağıda yer alan Tablo 1'de tüm görüntü alım modları geliş açıları, konumsal çözünürlükleri ve polarizasyon özellikleri ile birlikte gösterilmiştir.



Şekil 8. Sentinel-1 Görüntüleme Modları (ESA Sentinel-1 Team, 2013'den değiştirilerek)

Tablo 1. Sentinel-1 görüntüleme modlarının uydu geliş açıları, konumsal çözünürlükleri ve polarizasyon özellikleri

Görüntüleme Modu	**Uydu Geliş Açısı (^{0})**	**Çözünürlük (menzilXazimut) (m)**	**Şerit Genişliği (km)**	**Polarizasyon (H:Yatay, V: Düşey)**
SM	20-45	5x5	80	HH+HV, VH+VV, HH, VV
IW	29-46	5x20	250	HH+HV, VH+VV, HH, VV
EW	19-47	20x40	400	HH+HV, VH+VV, HH, VV
WV	22-35	5x5	20x20	HH, VV
	35-38	5x5	20x20	HH, VV

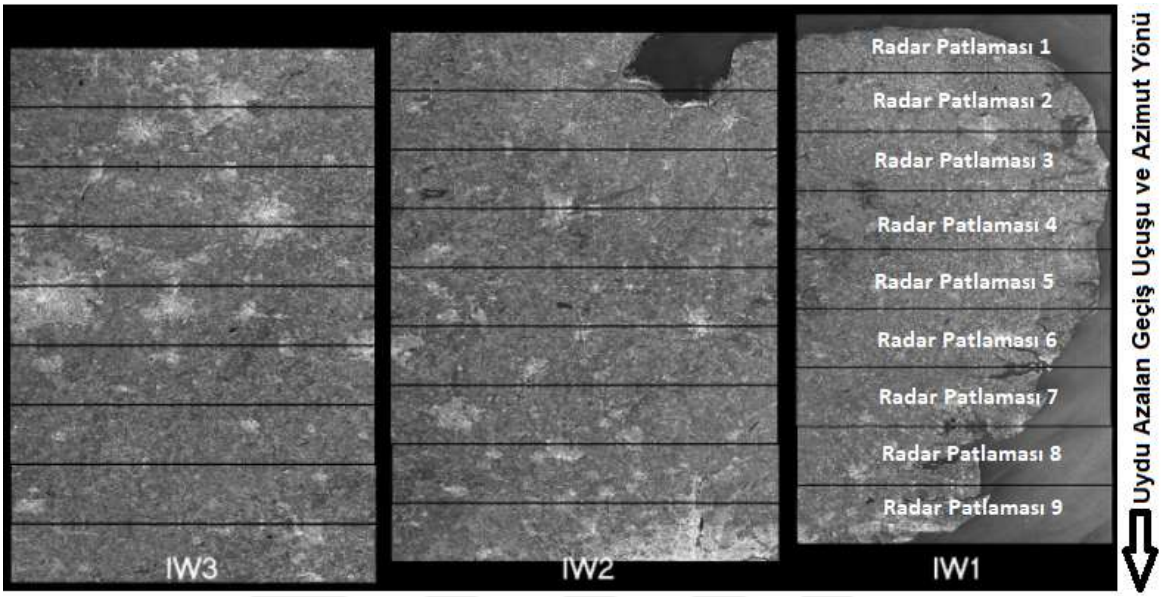
IW ve EW görüntüleme modlarının her ikisinde de De Zan ve Guarnieri (2006) tarafından geliştirilen TOPSAR (Terrain Observation with Progressive Scan SAR (Kademeli Taramalı SAR ile Arazi Gözlemi)) tekniği ile görüntü alımı yapılmaktadır. TOPSAR radar ışınının birbirine komşu olan alt şeritler arasında radar patlamaları içerisinde döngüsel olarak yönlendirilmesiyle görüntünün elde edildiği bir çeşit ScanSAR

(Taramalı SAR) görüntüleme yöntemidir. Bu tekniğin geleneksel taramalı görüntüleme yöntemi olan ScanSAR'dan farkı, bu teknikte radar ışınının sadece uydunun yeryüzüne baktığı eğik doğrultu olan menzil yönünde değil, aynı zamanda uydunun uçuş doğrultusu olan azimut yönünde de geriden ileriye doğru yönlendirilmesiyle görüntü ediniminin gerçekleştirilmesidir. Bu sayede; azimut ya da uydunun uçuş doğrultusu boyunca alt şeritler üzerinde elde edilen görüntülerin üst üste binmesiyle oluşan etki azaltılarak, tüm şerit boyunca radyometrik çözünürlüğü iyileştirilmiş homojen bir görüntü kalitesi sağlanmaktadır (De Zan ve Guarnieri, 2006). TOPSAR tekniğinin sağladığı neredeyse eş orandaki Sinyal Gürültü Oranı (Signal-to-Noise Ratio (SNR)) ve homojen görüntü kalitesi sayesinde, kendisiyle aynı tarama alanı ve konumsal çözünürlüğe sahip olan geleneksel ScanSAR tekniğinin yerini alması beklenmektedir (URL-2, 2021; ESA Sentinel-1 Team, 2013).

Sentinel-1 uydu misyonunda her bir görüntüleme moduna ait veriler; level-0 (ham veri), level-1 SLC (Single Look Complex), level-1 GRD (Ground Range Detection), level-2 OCN (Ocean) verileri olmak üzere 4 farklı ürün tipinden biri veya birkaçıyla kullanıcılara sunulmaktadır. Level-0 verileri işlenmemiş ve sıkıştırılmış formattaki verilerden oluşmakta, bu verilerin işlenmesiyle level-1 verileri ve level-1 verilerinin işlenmesiyle de level-2 verileri elde edilmektedir. Bu çalışmada ve InSAR tekniği ile ilgili yapılan çalışmalarda genel olarak IW görüntüleme modunda elde edilen işlenmiş SLC tipindeki veriler kullanılmaktadır. SLC verileri odaklanmış, uydu yörünge ve konum bilgileri kullanılarak jeo-referanslandırılmış ve uydu bakış doğrultusu olarak da ifade edilen eğik menzil geometrisi üzerinde tanımlanan SAR verilerinden oluşmaktadır (ESA Sentinel-1 Team, 2013).

IW SLC verileri 3 alt şeritte yer alan görüntülerin birleşiminden oluşur. Buradaki her bir alt şerit, her bir radar patlamasının (burst) ayrı bir görüntü olarak işlendiği bir seri patlama sonucunda oluşur. Her bir patlama, verilerin elde edildiği zaman sıralamasına göre, aralarında bulunan siyah bir sınır çizgisi ile alt şeritlere dahil edilir. Üç alt şerit içeren bir IW SLC görüntüsünü birleştirerek tek bir görüntü oluşturmak için, iki ayrı işlemin sırayla uygulanması gerekmektedir. Bunlar sırasıyla Deburst ve Merge işlemleridir. Deburst işleminde her üç alt şerit içerisindeki seri patlamalar sonucunda elde edilen görüntüler kendi şeritleri içerisinde birleştirilir. Merge işleminde ise, deburst işlemiyle kendi içerlerinde birleştirilen 3 alt şerit birleştirilir. Böylece menzil sütun ya da şerit genişliğinin sabit olduğu ve alt şeritlerin azimut yönünde sıralandığı tek bir geniş şeritli

görüntü elde edilmektedir (Sowter vd., 2016). Aşağıda yer alan Şekil 9'da bir IW SLC görüntüsü, alt şeritleri (IW1, IW2, IW3) ve radar patlamaları ile gösterilmiştir.



Şekil 9. IW SLC görüntüsü alt-şeritleri ve radar patlamaları (URL-2, 2021' den değiştirilerek)

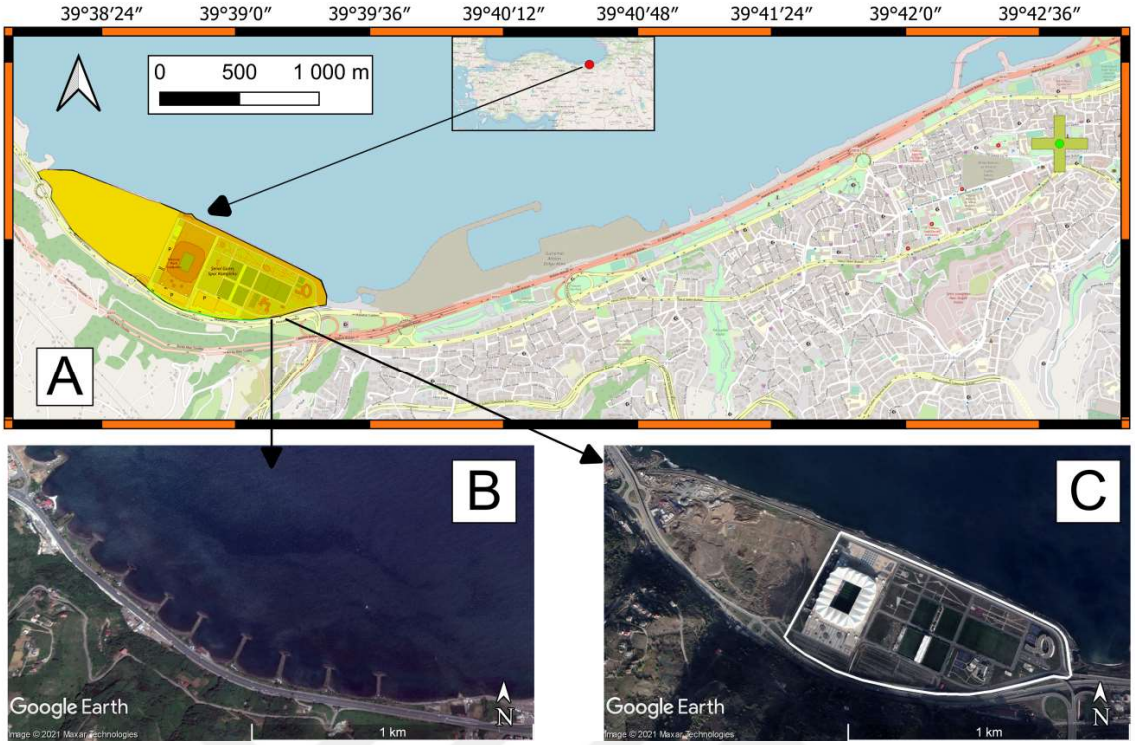
Sentinel-1 uydu görüntüleri https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home adresinden ücretsiz olarak istenilen veri formatında bir kayıt oluşturularak edinilebilmektedir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu bölümde çalışma alanının özellikleri ile tez çalışması kapsamında arazi ve büro ortamında gerçekleştirilen uygulamalar anlatılacaktır. Bu uygulamalar tesis edilen nivelman noktalarındaki düşey yüzey değişimlerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen hassas nivelman ölçümleri ve hesaplamaları ile Sentinel-1 SAR görüntüleri kullanılarak gerçekleştirilen StaMPS PSI tekniği uygulamalarını içermektedir.

2.1. Çalışma Alanı

Çalışma alanı Trabzon şehrinin Akyazı Beldesi'nde yer alan, deniz dolgusu üzerine inşa edilmiş Şenol Güneş Spor Kompleksini ve bu alanın sol tarafında bulunan boş deniz dolgusu alanını içermektedir (Şekil 10). Bu yüksek maliyetli spor kompleksinin inşaatına 24 Kasım 2013'de başlanmış ve resmi olarak 18 Aralık 2016'da açılışı yapılmıştır. Spor kompleksi deniz duvarı, asfalt karayolu ve otoparklar, çim antrenman sahaları ve parklar, tenis kortları, çeşitli tiplerde betonarme kaldırımlar, binalar, yaklaşık 40000 kişilik oturma kapasitesine sahip stadyum ve stadyumun üstünün bir bölümünü kapsayan membran gibi birçok farklı türde yapıyı içerisinde bulundurmaktadır. Şekil 10'da çalışma alanını içeren deniz dolgu alanı, inşaattan önceki ve sonraki durumlarıyla gösterilmiştir. Şekil 10-A'da deniz dolgu alanını içeren çalışma alanı sarı renkte taranmış olarak gösterilirken, gerçekleştirilen uygulamada referans noktası olarak kullanılan ve dolgu alanına yaklaşık 5 km uzaklıkta bulunan TRBN TUSAGA (Türkiye Ulusal Sabit GNSS İstasyonları Ağı) istasyonunun konumu yeşil bir artı sembolünün içerisinde yeşil bir nokta olarak gösterilmiştir. Şekil 10-B ve Şekil 10-C sırasıyla dolgu alanının doldurulmadan önceki son durumu ile Spor Kompleksinin inşaatından sonraki güncel durumunu gösteren 2010 Mayıs ve 2020 Aralık aylarına ait google earth görüntülerini içermektedir. Şekil 10-C'de gösterilen google earth görüntüsünden toplam dolgu alanının yaklaşık 760000 m^2 ve spor kompleksinin yer aldığı beyaz çizgilerle çevrili alanın ise yaklaşık olarak 430000 m^2 genişliğinde olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 10. Deniz dolgusu üzerinde yer alan çalışma alanının referans (sabit) noktası (TRBN TUSAGA-Aktif istasyonu) (şekil-A) ile dolgu inşaatından önceki 2010 mayıs tarihli (şekil-B) ve dolgu inşaatı tamamlandıktan sonraki 2020 aralık tarihli (şekil-C) görüntüleri

Dolgu sahası ve çevresi Pliyosen yaşlı Beşirli Formasyonu üzerinde yer almaktadır (Güven, 1993). Kalınlığı 50 ile 75 cm arasında değişen Beşirli Formasyonu, genellikle gevşek çimentolu, yerel kumtaşlı iri taneli aglomera, kiltaşı ve tüf ara katmanlarından oluşmaktadır (Fugro Sial, 2012; Aygar ve Gokceoglu, 2021). Dolgu sahasının dolgu malzemeleri ise 13 noktada yapılan sondaj çalışmalarından elde edilen verilere göre genel olarak 2-13 metre (m) kalınlıkta blok, çakıl, kum ve kil-silt türü malzeme içeren düzensiz dolgu, bu dolgunun altında 6.80-14.00 m kalınlıkta seyrek kavkılı, seyrek çakıllı, yeşilimsi gri renkli, ince orta taneli denizel çökel alüvyon, alüvyon altında Beşirli Formasyonuna ait kumtaşı, silt taşı, tüf, aglomera, ve onun da altında mavimsi gri renkli andezit-bazalt lav ve piroklastlardan (volkanik kayaç) oluşmaktadır (Nas, 2013). Bu malzemeler haricinde dolgu sahasında ayrıca 25-35 m uzunluğunda 4600 adet fore kazık bulunmaktadır (Bektaş, 2019).

2.2. Hassas Nivelman Ölçüleri ile Düşey Yüzey Değişimlerinin Belirlenmesi

Nivelman genel olarak insan becerisine dayalı, uzun zaman alıcı ve maliyetli bir ölçme yöntemidir. Ancak özellikle daha az kullanıcı hatasını mümkün kılan ve oldukça yüksek duyarlılığa sahip ölçme aletlerinin geliştirilmesi ve kullanımı, bu yöntemi günümüzdeki en hassas yükseklik farkı ve düşey deformasyon ölçme yöntemlerinden birisi haline getirmiştir. Bu yöntemin diğer uydu bazlı ve InSAR ölçme yöntemlerinden elde edilen verilerin kontrolü, kıyaslanması ve bu veriler ile kombinasyonuna yönelik yapılan birçok araştırma mevcuttur (Erol vd., 2005; Casu vd., 2006; Manzo vd., 2006; Jiang ve Lin, 2010; Jiang vd., 2011; Aobpaet vd., 2013; Fuhrmann vd., 2015; Gao vd., 2016; Eshagh ve Zoghi, 2016; Juan vd., 2017; Yang vd., 2018). Bu tez çalışmasında da dolgu alanı ve çevresinde tesis edilen nivelman noktaları üzerinde, 17.01.2018 ile 29.01.2020 tarihleri arasında beş periyot olarak gerçekleştirilen milimetre altı hassasiyetteki hassas nivelman ölçülerinden, düşey yüzey değişimleri yıllık ortalama hız değerleri olarak elde edilmiştir. Sonrasında ise bu değerler StaMPS PSI tekniği ve Sentinel-1 SAR verileri kullanılarak elde edilen düşey yüzey değişimlerinin kontrolü, doğruluk analizi ve SAR verileriyle kombinasyonu ile K-G ekseni üzerindeki yatay hareketin belirlenmesinde kullanılmıştır.

2.2.1. Ölçülerin Planlanması

Nivelman ölçümleri toplamda 48 noktada gerçekleştirilmiştir. Bu noktaların kırmızı renk ile gösterilen 2 adeti sabit (S_1, S_2), sarı renk ile gösterilen 41 adeti dolgu sahasında bulunan obje ya da hareketli ve mor renkle gösterilen diğer 5 adeti (F_2, F_3, F_4, F_5, F_6) ise S_2 sabit noktasının yüksekliğini belirlemek için kullanılan diğer ara noktalardır (Şekil 11). Sabit noktalar çalışma alanı ya da dolgu sahasının dışında kalan, deformasyondan etkilenmeyecek sağlam beton zemin üzerinde tesis edilmişlerdir. Obje noktalarının seçiminde ise spor kompleksi üzerinde önceden iyi bir şekilde tesis edilen bazı noktalardan faydalanılarak, bu noktalara ek olarak düzgün aralıklarla başka noktalar ilave edilmiştir. Dolgu sahası üzerinde yer alan ve bu alanın dışına en yakın obje noktası F_1 noktasıdır. Obje noktalarının 15 adeti (B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7, B_8, D_{25}, D_{26}, D_{30}, A_{023}, R_{22}, A_{20}, A_{23}) daha stabil deformasyon gösterebilecek deniz duvarı üzerinde bulunmaktadır. Diğer obje noktaları ise kaldırım zemin üzerinde tesis edilmişlerdir.

Şekil 11. Nivelman noktaları ve güzergahları

Tüm periyotlarda aynı ölçme planı uygulanmıştır. Ölçüler gidiş ve dönüş olarak yapılmak üzere, mavi, yeşil, turuncu ve mor renklerle gösterilen dört güzergaha dayandırılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 11). Sırasıyla mavi, yeşil ve turuncu çizgilerle gösterilen birinci, ikinci ve üçüncü güzergahlar kapalı nivelman ağları şeklinde oluşturulmuşlardır. Bu kapalı nivelman güzergahlarının çevre uzunlukları ise sırasıyla 1658 m, 1392 m ve 1332 m dir. Birinci güzergah S_1 sabit noktasından başlayarak yine S_1 noktasında tamamlanmakta ve 1 sabit ve 17 obje noktası içererek toplam 18 noktadan oluşmaktadır. İkinci güzergah, birinci güzergahta yer alan B_4 noktasından başlayarak yine aynı noktada tamamlanmakta ve toplam 17 obje noktası içermektedir. Üçüncü güzergah ise ikinci güzergahtaki D_{26} noktasından başlayarak yine aynı noktada tamamlanmakta ve toplamda 17 obje noktasından oluşmaktadır. Mor çizgilerle gösterilen ve A_{23} noktası ile S_2 noktası arasında yer alan dördüncü güzergah ise, S_2 sabit noktasının yüksekliğinin belirlenmesi için oluşturulmuş bir güzergahtır. Dördüncü güzergah genel olarak dolgu alanında yer almadığından, bu güzergahtaki noktaların (F_2...F_6) düşey yüzey değişim değerleri önem teşkil etmemektedir. Birinci ve ikinci güzergah ile ikinci ve üçüncü güzergahlar Şekil 11'de görüldüğü üzere ortak noktalar içermektedirler. Birinci güzergah stadyumu çevrelemekte, ikinci ve üçüncü güzergahla birlikte ise tümü tüm spor

kompleksini çevrelemektedirler. Tüm nivelman noktalarının ondalık ve derece, dakika ve saniye şeklindeki coğrafi koordinatları Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Nivelman noktaları coğrafi koordinatları

Noktalar	Enlem	Boylam	Enlem	Boylam
B1	41°00'04.84856"	39°38'45.64533"	41.00135	39.64601
B2	41°00'03.74383"	39°38'49.03500"	41.00104	39.64695
B3	41°00'02.64205"	39°38'52.30286"	41.00073	39.64786
B4	41°00'01.47838"	39°38'55.80536"	41.00041	39.64883
B5	41°00'00.37260"	39°38'58.99280"	41.00010	39.64972
B6	40°59'59.18819"	39°39'02.15267"	40.99977	39.65060
B7	40°59'58.08395"	39°39'05.43611"	40.99947	39.65151
B8	40°59'52.85772"	39°39'19.43153"	40.99802	39.65540
D25	40°59'55.42525"	39°39'12.68219"	40.99873	39.65352
D26	40°59'56.89861"	39°39'08.71586"	40.99914	39.65242
D30	40°59'58.44315"	39°39'04.44467"	40.99957	39.65123
A023	40°59'53.80284"	39°39'16.97796"	40.99828	39.65472
R22	40°59'51.78014"	39°39'21.49986"	40.99772	39.65597
A23	40°59'48.68375"	39°39'22.34811"	40.99686	39.65621
A20	40°59'50.79745"	39°39'22.22873"	40.99744	39.65617
Y1	40°59'48.41956"	39°39'21.79508"	40.99678	39.65605
Y13	41°00'02.19579"	39°38'44.05840"	41.00061	39.64557
Y14	40°59'59.55307"	39°38'42.43069"	40.99988	39.64512
Y15	40°59'56.88471"	39°38'40.89085"	40.99913	39.64469
Y16	40°59'53.95307"	39°38'39.09409"	40.99832	39.64419
Y17	40°59'51.76847"	39°38'37.79587"	40.99771	39.64383
Y18	40°59'50.46739"	39°38'41.15509"	40.99735	39.64477
Y19	40°59'49.24966"	39°38'44.57910"	40.99701	39.64572
Y20	40°59'48.25684"	39°38'47.65771"	40.99674	39.64657
Y21	40°59'50.45247"	39°38'49.26667"	40.99735	39.64702
Y22	40°59'49.47702"	39°38'52.67984"	40.99708	39.64797
Y23	40°59'48.39005"	39°38'55.77145"	40.99678	39.64883
Y24	40°59'47.32802"	39°38'58.92719"	40.99648	39.64970
Y25	40°59'46.33137"	39°39'01.82008"	40.99620	39.65051
Y26	40°59'44.99402"	39°39'05.41245"	40.99583	39.65150
Y27	40°59'44.49599"	39°39'09.32258"	40.99569	39.65259
Y28	40°59'45.24198"	39°39'13.30980"	40.99590	39.65370
Y29	40°59'45.85813"	39°39'16.35165"	40.99607	39.65454
Y30	40°59'46.37145"	39°39'19.43954"	40.99621	39.65540
Y31	40°59'53.26510"	39°38'50.93701"	40.99813	39.64748
Y32	40°59'55.79601"	39°38'53.00537"	40.99883	39.64806
Y33	40°59'58.51554"	39°38'54.60659"	40.99959	39.64850
Y34	40°59'48.87928"	39°39'03.38277"	40.99691	39.65094
Y35	40°59'51.71347"	39°39'05.05333"	40.99770	39.65140
Y36	40°59'54.26290"	39°39'07.12127"	40.99841	39.65198
F1	40°59'50.17670"	39°38'37.20969"	40.99727	39.64367
F2	40°59'46.55774"	39°39'22.51066"	40.99627	39.65625
F3	40°59'46.20757"	39°39'26.76309"	40.99617	39.65743
F4	40°59'45.84438"	39°39'31.01034"	40.99607	39.65861
F5	40°59'45.57187"	39°39'34.26692"	40.99599	39.65952
F6	40°59'45.70065"	39°39'36.67548"	40.99603	39.66019
YS1	40°59'49.21123"	39°38'34.36482"	40.99700	39.64288
YS2	40°59'44.47660"	39°39'39.76528"	40.99569	39.66105

2.2.2. Ölçülerin Gerçekleştirilmesi

Nivelman Ölçümleri 17.01.2018 ile 29.01.2020 tarihleri arasında toplam 5 periyot olarak gerçekleştirilmiştir. Birinci periyot ölçüler 17-21.01.2018, ikinci periyot ölçüler 11-14.07.2018, üçüncü periyot ölçüler 8-10.02.2019, dördüncü periyot ölçüler 10-13.07.2019, beşinci ve son periyot ölçüler ise 27-29.01.2020 tarihleri arasında gerçekleştirilmiştir. Beşinci periyodun son ölçüm gününde dolgu sahası dışında bulunan dördüncü güzergahın ölçümü yapıldığından, dolgu alanına ait ölçümler 28.01.2020 tarihinde tamamlanmıştır.

Her bir periyotta geri-ileri nokta yükseklik farklarını ifade eden 120 adet nivelman ölçüsü yapılmıştır. Gidiş ve dönüş olarak yapılan nivelman ölçümleri, Karadeniz Teknik Üniversitesi'nin Harita Mühendisliği Bölümü ölçme alet laboratuarının bünyesinde yer alan, yükseklik farkı ölçme duyarlılığı 0.01 mm olan Topcon marka DL-501 modelindeki hassas sayısal nivo ve hassas barkotlu invar mira kullanılarak gerçekleştirilmiş ve çok hassas sonuçlar elde edilmiştir. Tüm ölçümler, nivo gözlem ekseninin yatay eksene paralel olmamasından kaynaklanabilecek hataları minimuma indirebilecek önlemleri alarak gerçekleştirilmiştir. Bunun için tüm ölçümlerde nivo aleti küresel düzeç ayarının çok hassas bir biçimde ortalanarak yapılmasının yanı sıra, netcad yazılımı ve GNSS RTK ölçülerinden faydalanılarak gerçekleştirilen aplikasyonlar sayesinde, geri ve ileri ölçü okumaları yapılacak tüm nivelman noktalarına santimetre hassasiyetinde eşit mesafede bulunan nivo kurulacak noktaların arazi üzerinde işaretlenerek tesisi sağlanmıştır. Her iki nivelman noktası arasında dört kez geri ve ileri ölçü okumaları yapılmış, okunan değerlerin ortalamaları ve ortalamalarının farkları alınarak, noktalar arasındaki yükseklik farkları elde edilmiştir. Tablo 3'de ölçülen tüm geri ve ileri nivelman noktaları arasındaki tüm gidiş ve dönüş yükseklik fark ölçüleri ile bu ölçülerin daha sonra dengeleme hesabında kullanılacak ve noktalar arasındaki mesafeye göre belirlenen ağırlıkları (1/Si(km)) gösterilmiştir.

Bölgede bulunan 41 adet obje noktasından, Y_{27} ve Y_{24} olmak üzere, iki tanesi sırasıyla üçüncü ve dördüncü periyottan itibaren bölgede yapılan bazı çalışmalardan dolayı imha olmuş ve bu yüzden iptal edilmişlerdir. Bu noktaların yerine ölçüm planını aynı şekilde devam ettirebilmek için yeni noktalar tesis edilmiş ya da kullanılmış, fakat bu noktalar önceki yerlerinden farklı konum ve yüksekliklerde olduklarından, sonraki aşamalarda düşey yüzey değişimleri açısından değerlendirmeye alınmamışlardır. Bu nedenle SAR verileriyle yapılan karşılaştırmalarda, 39 obje ve 2 sabit olmak üzere toplam 41 nokta değerlendirmeye alınmıştır.

Tablo 3. Nivelman gidiş-dönüş ölçüleri ve ağırlıkları

Ölç. Nok.		1. Periyot Ölçüleri		2. Periyot Ölçüleri		3. Periyot Ölçüleri		4. Periyot Ölçüleri		5. Periyot Ölçüleri		Ağırlık
Geri	İleri	Gidiş(m)	Dönüş(m)	Gidiş(m)	Dönüş(m)	Gidiş(m)	Dönüş(m)	Gidiş(m)	Dönüş(m)	Gidiş(m)	Dönüş(m)	1/Si(km)
S1	F1	0.211820	-0.211575	0.211035	-0.210795	0.210810	-0.210785	0.208815	-0.209240	0.208540	-0.208795	13.1148
F1	Y17	0.017815	-0.017960	0.018475	-0.018460	0.019405	-0.019230	0.019165	-0.019100	0.019880	-0.019790	20.9424
Y17	Y16	-0.019930	0.020125	-0.019940	0.020035	-0.023825	0.023800	-0.024875	0.024960	-0.029195	0.029475	13.5300
Y16	Y15	-0.094510	0.094680	-0.093100	0.093185	-0.091735	0.091915	-0.089570	0.089630	-0.088435	0.088275	10.0291
Y15	Y14	-0.043470	0.043695	-0.045700	0.045740	-0.050230	0.050410	-0.053705	0.053840	-0.058430	0.058550	11.1309
Y14	Y13	-0.137800	0.138025	-0.139690	0.139720	-0.141230	0.141145	-0.140770	0.140580	-0.141500	0.141615	11.1148
Y13	B1	-2.497120	2.496895	-2.495560	2.495645	-2.490180	2.490220	-2.487585	2.487780	-2.481785	2.482025	11.1297
B1	B2	0.011490	-0.011460	0.012105	-0.012010	0.011845	-0.011715	0.012010	-0.011790	0.011545	-0.011455	11.5955
B2	B3	-0.001605	0.001635	-0.001420	0.001470	-0.001870	0.002050	-0.001850	0.002080	-0.002245	0.002305	11.9617
B3	B4	-0.016565	0.016545	-0.016490	0.016575	-0.016825	0.016735	-0.017175	0.017020	-0.016670	0.016730	11.1882
B4	Y33	1.534265	-1.534140	1.533290	-1.533305	1.534570	-1.534485	1.533795	-1.534135	1.534235	-1.534210	10.4603
Y33	Y32	0.542480	-0.542500	0.542295	-0.542300	0.543055	-0.542805	0.543410	-0.543475	0.543100	-0.542845	10.8861
Y32	Y31	0.476820	-0.476870	0.477770	-0.477745	0.478855	-0.478840	0.479475	-0.479330	0.480470	-0.480390	10.8897
Y31	Y21	0.482510	-0.482540	0.484855	-0.484910	0.483415	-0.483470	0.485500	-0.485630	0.484120	-0.483855	10.5097
Y21	Y20	0.396045	-0.396265	0.394835	-0.394415	0.396460	-0.396280	0.395345	-0.395235	0.396430	-0.396300	12.9082
Y20	Y19	-0.411880	0.412100	-0.411475	0.411425	-0.411520	0.411650	-0.411050	0.411295	-0.410915	0.411145	12.7877
Y19	Y18	-0.404445	0.404670	-0.404905	0.404885	-0.404820	0.404790	-0.405695	0.405910	-0.405485	0.405635	11.3109
Y18	Y17	0.185700	-0.185695	0.185265	-0.185200	0.185940	-0.185835	0.185475	-0.185230	0.186250	-0.186015	11.3404
Y17	F1	-0.017810	0.018110	-0.018440	0.018480	-0.019225	0.019240	-0.019105	0.019160	-0.019800	0.019895	20.9424
F1	S1	-0.211815	0.211600	-0.210815	0.211050	-0.210790	0.210805	-0.209235	0.208830	-0.208810	0.208560	13.1148
B4	Y33	1.533825	-1.533830	1.533280	-1.533295	1.534565	-1.534490	1.533800	-1.534130	1.534225	-1.534220	10.4603
Y33	Y32	0.542405	-0.542410	0.542290	-0.542305	0.543050	-0.542810	0.543415	-0.543470	0.543090	-0.542860	10.8861
Y32	Y31	0.476745	-0.476750	0.477760	-0.477765	0.478850	-0.478845	0.479470	-0.479335	0.480460	-0.480405	10.8897
Y31	Y21	0.482480	-0.482485	0.484875	-0.484890	0.483420	-0.483465	0.485505	-0.485625	0.484110	-0.483870	10.5097
Y21	Y22	-2.039440	2.039155	-2.041020	2.041130	-2.040730	2.040510	-2.042125	2.042180	-2.041350	2.041550	11.7288
Y22	Y23	-1.615710	1.615710	-1.614785	1.614895	-1.613605	1.613810	-1.613330	1.613515	-1.612345	1.612350	12.5534
Y23	Y24	0.267400	-0.267510	0.267410	-0.267495	0.267345	-0.267220	0.442225	-0.441950	0.443470	-0.443280	12.3900
Y24	Y25	0.251665	-0.251575	0.251980	-0.252000	0.250620	-0.250700	0.076715	-0.076680	0.073995	-0.073855	13.4626
Y25	Y34	0.212465	-0.212245	0.211515	-0.211440	0.212885	-0.212775	0.211730	-0.211975	0.213120	-0.212820	11.5380
Y34	Y35	-0.079740	0.079795	-0.080725	0.080695	-0.081890	0.081915	-0.082330	0.082395	-0.083305	0.083465	10.4428
Y35	Y36	-0.282925	0.283355	-0.283155	0.283430	-0.283005	0.283275	-0.282445	0.282325	-0.283435	0.283570	10.8331
Y36	D26	0.241565	-0.241630	0.242000	-0.241955	0.240900	-0.240780	0.240855	-0.241000	0.239770	-0.239585	11.1807
D26	B7	0.014900	-0.015190	0.014740	-0.014790	0.014980	-0.014985	0.014405	-0.014680	0.014815	-0.014725	11.7744
B7	D30	0.002270	-0.002280	0.002630	-0.002570	0.002395	-0.002350	0.002820	-0.002615	0.002665	-0.002585	38.9257
D30	B6	-0.011055	0.010910	-0.011265	0.011225	-0.010550	0.010760	-0.011250	0.011015	-0.010590	0.010725	17.1556
B6	B5	0.028210	-0.028195	0.028285	-0.028000	0.028000	-0.027850	0.027430	-0.027360	0.027070	-0.027030	12.1359
B5	B4	-0.026095	0.025885	-0.025580	0.025540	-0.025785	0.026010	-0.025290	0.025565	-0.025715	0.025605	12.2055
D26	D25	-0.003600	0.003445	-0.002790	0.002925	-0.002395	0.002500	-0.002025	0.001780	-0.001085	0.001430	9.6852
D25	A023	-0.028280	0.028080	-0.028105	0.028235	-0.028000	0.028240	-0.028580	0.028300	-0.027890	0.028150	8.9135
A023	B8	-0.023570	0.023585	-0.023955	0.023950	-0.023865	0.023735	-0.023805	0.023975	-0.023020	0.023065	15.5448
B8	R22	-0.090530	0.090665	-0.090345	0.090330	-0.090290	0.090455	-0.090390	0.090435	-0.089860	0.090165	17.0445
R22	A20	-0.003480	0.003490	-0.003490	0.003450	-0.002910	0.003105	-0.002565	0.002720	-0.002335	0.002395	28.7604
A20	A23	0.057800	-0.057545	0.058030	-0.057895	0.058755	-0.058600	0.059305	-0.059215	0.059560	-0.059295	15.3210
A23	Y1	-0.548655	0.548690	-0.549310	0.549340	-0.549120	0.549240	-0.549825	0.549810	-0.549625	0.549655	65.4450
Y1	Y30	1.475460	-1.475180	1.474540	-1.474405	1.473790	-1.473680	1.473290	-1.473105	1.472605	-1.472850	11.9332
Y30	Y29	-1.284290	1.284255	-1.283120	1.283215	-1.282535	1.282680	-1.282105	1.281915	-1.281500	1.281710	13.5336
Y29	Y28	0.094770	-0.094620	0.094810	-0.094805	0.095560	-0.095290	0.095530	-0.095500	0.096315	-0.095975	13.5870
Y28	Y27	0.148455	-0.148470	0.148710	-0.148720	0.195630	-0.195440	0.147045	-0.147100	0.147615	-0.147300	10.4178
Y27	Y26	0.114700	-0.114585	0.114810	-0.114940	0.069005	-0.068815	0.117770	-0.117880	0.117600	-0.117585	10.7898
Y26	Y25	-0.000470	0.000450	-0.000230	0.000160	-0.001715	0.001630	-0.002005	0.001830	-0.003295	0.003605	10.6895
Y25	Y34	0.212240	-0.212250	0.211500	-0.211450	0.212880	-0.212780	0.211735	-0.211970	0.213100	-0.212835	11.5380
Y34	Y35	-0.079790	0.079800	-0.080710	0.080705	-0.081895	0.081910	-0.082335	0.082390	-0.083325	0.083450	10.4428
Y35	Y36	-0.283350	0.283360	-0.283170	0.283415	-0.283010	0.283270	-0.282440	0.282330	-0.283445	0.283555	10.8331
Y36	D26	0.241625	-0.241635	0.241985	-0.241970	0.240895	-0.240785	0.240860	-0.240995	0.239760	-0.239600	11.1807
A23	F2	1.749530	-1.749385	1.746310	-1.746305	1.742540	-1.742530	1.741330	-1.741160	1.737020	-1.737100	15.2207
F2	F3	-0.631970	0.632350	-0.632435	0.632435	-0.630485	0.630545	-0.630535	0.630515	-0.627140	0.627265	10.0020
F3	F4	-0.525845	0.525880	-0.523430	0.523415	-0.520610	0.520865	-0.520660	0.520280	-0.518285	0.518335	10.0100
F4	F5	-0.060925	0.061100	-0.060720	0.060720	-0.060655	0.060715	-0.060505	0.060165	-0.059365	0.059475	13.0582
F5	F6	-0.067485	0.067540	-0.068895	0.068830	-0.070555	0.070690	-0.071300	0.071540	-0.072715	0.072775	17.7179
F6	S2	-0.103580	0.103615	-0.101360	0.101615	-0.099560	0.099670	-0.098440	0.098045	-0.097255	0.097465	12.2714

2.2.3. Ölçülerin İrdelenmesi ve Dengelenmesi

Tüm periyotlardaki tüm güzergahlarda gerçekleştirilen gidiş ve dönüş ölçülerinden çok hassas sonuçlar elde edilmiştir. Bu ölçülerin nivelman hesabında, nivelman ağı kapanma hataları mutlak değerleri 0.2 mm ile 2.3 mm arasında değişen değerler olarak elde edilmiş ve bu değerlerin km başına ±1.5 mm hatayı aşmadığı görülmüştür. Sonrasında ise bu kapanma hata değerleri dağıtılarak, noktalar arasındaki yükseklik farkları ve daha sonra dengeleme hesabında yaklaşık yükseklikler olarak kullanılacak noktalara ait yükseklik değerleri elde edilmiştir.

Nivelman ölçüleri, ölçülerin kendi aralarındaki tutarlılıklarını ve noktaların konum duyarlılıklarını daha iyi yansıtan (Yalçınkaya vd., 2003; Wolf ve Ghilani, 1997; Niemeier, 1992) serbest ağ dengelemesi yöntemiyle dengelenmiştir.

2.2.3.1. Nivelman Ağının Serbest Dengelenmesi

Serbest ağ dengelemesi, tüm nokta koordinatlarının bilinmeyenler olarak ele alınarak gerçekleştirildiği bir dengeleme modelidir. Bu yöntem düzeltmelerin ve koordinat bilinmeyenlerinin kareleri toplamının minimum yapıldığı en küçük kareler çözümüyle gerçekleştirilir (Yalçınkaya vd., 2003). Bu dengeleme yönteminde matematik model; ϑ, ölçülere eklenecek düzeltmeler; A, katsayılar matrisi; h, yükseklik bilinmeyenleri; l, ötelenmiş gözlemler vektörü; P, ölçülerin ağırlık matrisi ve S, noktalar arasındaki km biriminde uzaklık olmak üzere Eşitlik (2.1)'deki gibi oluşturulur (Yalçınkaya (Ünver), 1994).

$$\vartheta = Ah - l\,, \quad P = \frac{1}{S(km)} \tag{2.1}$$

En küçük karaler yöntemine göre normal denklemler

$$A^T PA\, h - A^T Pl = 0 \tag{2.2}$$

şeklinde oluşturulur. Buradan normal denklem katsayılar matrisi (N) ve normal denklemlerin sabit terimleri (n),

$$N = A^T PA \tag{2.3}$$

$$n = A^T Pl \tag{2.4}$$

şeklinde elde edilir. Serbest ağların normal denklem katsayılar matrisi (N) singülerdir (tutarsız, tekildir) ve bunun Moore-Penrose (Psoydo) tersi alınarak (N^+) yükseklik bilinmeyenlerine ait ters ağılık matrisi (Q_{hh}),

$$Q_{hh} = N^+ = \begin{pmatrix} q_{hihi} & q_{hihj} & \cdots \\ q_{hihj} & q_{hjhj} & \vdots \\ \vdots & \cdots & \ddots \end{pmatrix} \tag{2.5}$$

olarak elde edilir (Yalçınkaya (Ünver), 1994; Yalçınkaya vd., 2003). m, nokta sayısı ve e, bir vektörü olmak üzere,

$$G = \frac{1}{\sqrt{m}}\, e \tag{2.6}$$

olarak elde edilir. Buradaki G vektöründen yararlanılarak, Psoydo ters matrisi (N^+),

$$N^+ = (N + GG^T)^{-1} - GG^T \tag{2.7}$$

olarak hesaplanır. Bu matris kullanılarak yükseklik bilinmeyenleri (h) ile dengelenmiş yükseklik değerleri (H), nivelman hesabı sonrasında elde edilen yaklaşık yükseklik (H^0) değerlerinden faydalanılarak,

$$h = N^+ n \tag{2.8}$$

$$H = H^0 + h \tag{2.9}$$

olarak hesaplanır. n, ölçü sayısı olmak üzere, serbestlik derecesi (f) ve birim ölçünün karesel ortalama hatası ya da standart sapması (m_0),

$$f = n - m + 1 \tag{2.10}$$

$$m_0 = \sqrt{\frac{\vartheta^T P \vartheta}{f}} \tag{2.11}$$

olarak elde edilir (Yalçınkaya (Ünver), 1994). Buradaki birim ölçünün varyansı kullanılarak dengelenmiş yüksekliklere ait ortalama yükseklik duyarlılıkları ya da hata değerleri,

$$m_{Hi} = \pm m_0 \sqrt{q_{hihi}} \tag{2.12}$$

olarak hesaplanır (Yalçınkaya vd., 2003). Δh, yükseklik farkı ölçüleri olmak üzere, dengeli ölçüler ($\widehat{\Delta h}$), ölçülerin ortalama hatası ($m_{\Delta h}$), dengeli ölçülerin ters ağılık matrisi ($Q_{\hat{l}\hat{l}}$) ve ortalama hataları ($m_{\widehat{\Delta h}_i}$),

$$\widehat{\Delta h} = \Delta h + \vartheta \tag{2.13}$$

$$m_{\Delta hi} = \pm \frac{m_0}{\sqrt{P_i}} \tag{2.14}$$

$$Q_{\hat{l}\hat{l}} = A Q_{hh} A^T \tag{2.15}$$

$$m_{\widehat{\Delta h}_i} = \pm m_0 \sqrt{q_{\hat{l}_i\hat{l}_i}} \tag{2.16}$$

olarak elde edilir. Dengelemeden sonraki aşamada uyuşumsuz ölçüler testi yapılmak istendiğinde kullanılabilecek düzeltmelerin ters ağırlık matrisi ($Q_{\vartheta\vartheta}$) ise,

$$Q_{\vartheta\vartheta} = P^{-1} - Q_{\hat{l}\hat{l}} \tag{2.17}$$

olarak hesaplanır (Güllü, 1998; Wolf ve Ghilani, 1997; Kurt, 1996; Kuang, 1996).

2.2.3.2. Model Hipotezinin Testi

Model hataları dengeleme sonuçlarını olumsuz etkileyebileceğinden, serbest ağ dengelemesinin ardından, dengeleme hesabının kurulan matematik modelinin

uygunluğunun denetlenmesi gerekir. Matematik modelin uygunluğunun denetlenmesi, bu modelin ölçüler ile bilinmeyenler arasındaki geometrik ve fiziksel ilişkilere uygun olup olmadığının ve ölçülerin duyarlılıkları ile aralarındaki korelasyonları yeterince iyi yansıtıp yansıtmadığının irdelenmesi anlamına gelmektedir. Bu denetim model hipotez testi yolu ile gerçekleştirilir (Öztürk ve Şerbetçi, 1992; Yalçınkaya (Ünver), 1994; Yalçınkaya vd., 2003).

Birim ölçünün dengeleme hesabından önce elde edilen ortalama hatasının öncül (a priori) değeri s_0 ve dengeleme hesabı sonucunda bulunan ortalama hatasının soncul (a posteriori) değeri m_0 olmak üzere, model hipotezinin testi için sıfır hipotezi (H_0) ve çift yönlü testlerde seçenek hipotezi (H_S),

$$H_0: E\{m_0^2\} = E\{s_0^2\} \tag{2.18}$$

$$H_S: E\{m_0^2\} \neq E\{s_0^2\} \tag{2.19}$$

şeklinde kurulur. Test büyüklüğü (T),

$$T = \frac{m_0^2}{s_0^2},\ m_0 > s_0 \tag{2.20}$$

olarak hesaplanır. α, yanılma olasılığı; f, payın ve f_f, paydanın serbestlik dereceleri olmak üzere, test büyüklüğü f-dağılım tablolarından alınan

$$q = F_{f,f_f,1-\frac{\alpha}{2}} \tag{2.21}$$

değeri ile karşılaştırılır. Test büyüklüğü tablo değerinden küçük ise ($T < q$) dengeleme modeli geçerli, büyük ise ($T > q$) geçersizdir denir. Dengeleme modelinin geçerli olması kurulan matematik modelin uygun olduğunu gösterir. Dengeleme modelinin geçersiz olması ise, matematik modelin doğru kurulmamış olması, ölçü ağırlıklarının yanlış belirlenmiş olması ya da ölçülerden en az birinin uyuşumsuz olmasından kaynaklanıyor olabilir (Yalçınkaya vd., 2003). Bu durumda uyuşumsuz ölçüler testi ile hatalı uyuşumsuz ölçülerin tespit edilerek, bunların yeniden uyuşumlu hale gelinceye kadar ölçülmesi ya da tüm periyotlarda ağın şeklinin korunması koşulu ile ölçülerden çıkarılması ve sonrasında

model hipotezi testinin tekrar edilmesi gerekir (Altıntaş, 2014; Tanır, 2000; Kara, 1998; Konak, 1994; Şimşek, 1992). Tüm uyuşumsuz ölçülerin giderilmesine rağmen, dengeleme modeli yine geçersiz ise, seçilen öncül karesel ortalama hata s_0, ağdaki kaliteye uymuyor demektir. Bu durumda ağdaki kaliteye uygun bir öncül değer belirlenerek ya da $s_0 = m_0$ alınarak model hipotezi testi tekrarlanır. Test sonucu geçersiz çıkmaya devam ediyor ise, fonksiyonel modelin ($\vartheta = Ah - l$) test edilmesi gerekir (Bayrak, 2003; Kara, 1998; Konak, 1994).

2.2.3.3. Uyuşumsuz Ölçüler Testi

Ölçüler her ne kadar yüksek hassasiyette veri sağlayan ekipmanlar kullanılarak, özenle ve dikkatli bir biçimde yapılsa dahi, birtakım hataların meydana gelmesi engellenemez. Bu hatalar giderilmedikleri sürece, meydana gelen yüzey değişimlerinin büyüklüğü ve yönü hususunda yanlış bir kanıya varılmasına sebep olurlar. Bu hataların bir kısmı kolayca fark edilerek giderilebilen kaba hatalardan oluşurken, diğer bir kısmı ise rastgele ölçü hatalarına yakın ve daha küçük değerlerdeki, kolayca fark edilemeyen bazı kaba ve sistematik hatalardan oluşur (Bayrak, 2003). Dengeleme hesabının matematik modelinin geçersiz olmasına neden olan bu hatalar, uyuşumsuz ölçü testleri ile belirlenerek giderilebilirler. Uyuşumsuz ölçü testleri bir seferde hata miktarı en fazla olan yalnız bir ölçünün tespit edilerek giderilmesine yönelik olarak uygulanır. İlk önce test sınır değerini en fazla aşan ya da en uyuşumsuz olan bir ölçü belirlenerek elimine edilir, sonrasında ise kalan diğer ölçüler yeniden dengelenerek tekrar test edilirler ve uyuşumsuz ölçü kalmayıncaya kadar bu işleme devam edilir (Altıntaş, 2014; Bayrak, 2003; Tanır, 2000; Kuang, 1996; Yalçınkaya (Ünver), 1994). Bu çalışmada, hassas nivelman ölçülerindeki uyuşumsuz ölçülerin varlığının test edilmesinde klasik yöntemlerden Tau testi ve t testi kullanılmıştır.

Herhangi bir ölçüye ilişkin düzeltme ϑ_i, düzeltmelerin $Q_{\vartheta\vartheta}$ ters ağırlık matrisinin i'inci köşegen elemanı $q_{\vartheta_i\vartheta_i}$, birim ölçünün soncul ortalama hatası ya da standart sapması m_0 ve test edilecek i inci ölçü dışında kalan model hatalarından arındırılmış diğer ölçülerle bulunacak soncul standart sapma $\overline{m_0}$ olmak üzere,

$$\overline{m_0}^2 = \frac{1}{f-1}\left(f m_0^2 - \frac{\vartheta_i^2}{q_{\vartheta_i\vartheta_i}}\right) \tag{2.22}$$

yanılma olasılığı her iki test için de $\alpha_0 = 0.001$ olarak alındığında, i inci ölçü için hesaplanılacak sırasıyla tau (T_{i-tau}) ve t testleri (T_{i-t}) için test büyüklükleri,

$$T_{i-tau} = \frac{|\vartheta_i|}{m_0\sqrt{q_{\vartheta_i\vartheta_i}}} \tag{2.23}$$

$$T_{i-t} = \frac{|\vartheta_i|}{\overline{m_0}\sqrt{q_{\vartheta_i\vartheta_i}}} \tag{2.24}$$

olarak elde edilir. Test sınır değerleri ise,

$$T_{sınır-tau} = t_{f,1-\alpha_0} \tag{2.25}$$

$$T_{sınır-t} = t_{f-1,1-\alpha_0/2} \tag{2.26}$$

olarak elde edilir. Sınır değerleri aşan ölçüler uyuşumsuz olarak kabul edilerek, ölçü kümesinden çıkartılır ya da yeniden ölçülürler. Uyuşumsuz herhangi bir ölçü kalmayıncaya kadar bu işleme devam edilir (Bayrak, 2003; Kuang, 1996; Yalçınkaya (Ünver), 1994; Öztürk ve Şerbetçi, 1992).

2.2.3.4. Dengeleme ve Ölçülerin İrdeleme Sonuçları

Tüm periyotlardaki ölçüler MATLAB yazılımı kullanılarak dengelenmiştir. Ölçülerin dengelenmesi sonucunda dengeli ölçü ve nokta yükseklikleri, ortalama hataları ya da standart sapma değerleri ile birlikte elde edilmiştir. Tüm periyotlardaki ölçülerin dengelenmesi sonrasında MATLAB yazılımı ile uygulanan model hipotez testi ve uyuşumsuz ölçüler testleri sonuçlarında, tüm periyotlarda dengeleme modeli geçerli çıkmış ve tüm ölçülerin tau ve t testlerine göre test büyüklüklerinin test sınır değerlerinden küçük çıktığı görülerek herhangi bir uyuşumsuz ölçü olmadığı tespit edilmiştir. Ölçülere ait hassasiyetleri ifade eden ortalama hata değerleri dengeli ölçüler için 0.1-0.2 mm arasında elde edilirken, dengeli nokta yükseklikleri için ise 0.1-0.3 mm arasında elde edilmiştir. Tablo 4, Tablo 5, Tablo 6 ve Tablo 7 sırasıyla birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü güzergahta tüm periyotlardaki dengeleme sonrası elde edilen dengeli ölçüleri ve ortalama

hatalarını göstermektedir. Tablo 8, Tablo 9, Tablo 10 ve Tablo 11 ise bu ölçülere ait uyuşumsuz ölçü test değerlerini ve tau ve t testi sınır değerlerini göstermektedir. Tablo 12'de ise dengeli nokta yükseklikleri ile ortalama hataları gösterilmiştir. Nivelman ağının sırasıyla ikinci ve üçüncü güzergahlarında yer alan ve imha olduklarından dolayı iptal edilen Y_{24} ve Y_{27} noktaları Tablo 12'de gösterilmemiştir.

Tablo 4. Birinci güzergah dengeli ölçüleri ve ortalama hataları

Noktalar		1. Periyot		2. Periyot		3. Periyot		4. Periyot		5. Periyot	
Geri	İleri	Ölç.(m)	Hat.(mm)	Ölç.(m)	Hat.(mm)	Ölç.(m)	Hat.(mm)	Ölç.(m)	Hat.(mm)	Ölç.(m)	Hat.(mm)
S1	F1	0.2117	0.1	0.2109	0.1	0.2108	0.1	0.2091	0.1	0.2087	0.1
F1	Y17	0.0179	0.1	0.0185	0	0.0193	0	0.0191	0.1	0.0198	0
Y17	Y16	-0.0201	0.1	-0.0201	0.1	-0.0239	0.1	-0.0250	0.1	-0.0294	0.1
Y16	Y15	-0.0947	0.1	-0.0933	0.1	-0.0919	0.1	-0.0898	0.1	-0.0884	0.1
Y15	Y14	-0.0437	0.1	-0.0458	0.1	-0.0504	0.1	-0.0539	0.1	-0.0585	0.1
Y14	Y13	-0.1380	0.1	-0.1398	0.1	-0.1413	0.1	-0.1408	0.1	-0.1416	0.1
Y13	B1	-2.4971	0.1	-2.4957	0.1	-2.4903	0.1	-2.4878	0.1	-2.4819	0.1
B1	B2	0.0114	0.1	0.0119	0.1	0.0117	0.1	0.0118	0.1	0.0115	0.1
B2	B3	-0.0017	0.1	-0.0015	0.1	-0.0020	0.1	-0.0021	0.1	-0.0023	0.1
B3	B4	-0.0167	0.1	-0.0166	0.1	-0.0169	0.1	-0.0172	0.1	-0.0167	0.1
B4	Y33	1.5340	0.1	1.5332	0.1	1.5345	0.1	1.5338	0.1	1.5342	0.1
Y33	Y32	0.5424	0.1	0.5422	0.1	0.5429	0.1	0.5433	0.1	0.5430	0.1
Y32	Y31	0.4768	0.1	0.4777	0.1	0.4788	0.1	0.4793	0.1	0.4805	0.1
Y31	Y21	0.4825	0.1	0.4848	0.1	0.4834	0.1	0.4854	0.1	0.4840	0.1
Y21	Y20	0.3961	0.1	0.3944	0.1	0.3963	0.1	0.3952	0.1	0.3963	0.1
Y20	Y19	-0.4121	0.1	-0.4115	0.1	-0.4117	0.1	-0.4113	0.1	-0.4111	0.1
Y19	Y18	-0.4047	0.1	-0.4050	0.1	-0.4049	0.1	-0.4059	0.1	-0.4056	0.1
Y18	Y17	0.1856	0.1	0.1851	0.1	0.1858	0.1	0.1852	0.1	0.1861	0.1
Y17	F1	-0.0179	0.1	-0.0185	0	-0.0193	0	-0.0191	0.1	-0.0198	0
F1	S1	-0.2117	0.1	-0.2109	0.1	-0.2108	0.1	-0.2091	0.1	-0.2087	0.1
S1	F1	0.2117	0.1	0.2109	0.1	0.2108	0.1	0.2091	0.1	0.2087	0.1
F1	Y17	0.0179	0.1	0.0185	0	0.0193	0	0.0191	0.1	0.0198	0
Y17	Y18	-0.1856	0.1	-0.1851	0.1	-0.1858	0.1	-0.1852	0.1	-0.1861	0.1
Y18	Y19	0.4047	0.1	0.4050	0.1	0.4049	0.1	0.4059	0.1	0.4056	0.1
Y19	Y20	0.4121	0.1	0.4115	0.1	0.4117	0.1	0.4113	0.1	0.4111	0.1
Y20	Y21	-0.3961	0.1	-0.3944	0.1	-0.3963	0.1	-0.3952	0.1	-0.3963	0.1
Y21	Y31	-0.4825	0.1	-0.4848	0.1	-0.4834	0.1	-0.4854	0.1	-0.4840	0.1
Y31	Y32	-0.4768	0.1	-0.4777	0.1	-0.4788	0.1	-0.4793	0.1	-0.4805	0.1
Y32	Y33	-0.5424	0.1	-0.5422	0.1	-0.5429	0.1	-0.5433	0.1	-0.5430	0.1
Y33	B4	-1.5340	0.1	-1.5332	0.1	-1.5345	0.1	-1.5338	0.1	-1.5342	0.1
B4	B3	0.0167	0.1	0.0166	0.1	0.0169	0.1	0.0172	0.1	0.0167	0.1
B3	B2	0.0017	0.1	0.0015	0.1	0.0020	0.1	0.0021	0.1	0.0023	0.1
B2	B1	-0.0114	0.1	-0.0119	0.1	-0.0117	0.1	-0.0118	0.1	-0.0115	0.1
B1	Y13	2.4971	0.1	2.4957	0.1	2.4903	0.1	2.4878	0.1	2.4819	0.1
Y13	Y14	0.1380	0.1	0.1398	0.1	0.1413	0.1	0.1408	0.1	0.1416	0.1
Y14	Y15	0.0437	0.1	0.0458	0.1	0.0504	0.1	0.0539	0.1	0.0585	0.1
Y15	Y16	0.0947	0.1	0.0933	0.1	0.0919	0.1	0.0898	0.1	0.0884	0.1
Y16	Y17	0.0201	0.1	0.0201	0.1	0.0239	0.1	0.0250	0.1	0.0294	0.1
Y17	F1	-0.0179	0.1	-0.0185	0	-0.0193	0	-0.0191	0.1	-0.0198	0
F1	S1	-0.2117	0.1	-0.2109	0.1	-0.2108	0.1	-0.2091	0.1	-0.2087	0.1

Tablo 5. İkinci güzergah dengeli ölçüleri ve ortalama hataları

Noktalar		1. Periyot		2. Periyot		3. Periyot		4. Periyot		5. Periyot	
Geri	İleri	Ölç.(m)	Hat.(mm)	Ölç.(m)	Hat.(mm)	Ölç.(m)	Hat.(mm)	Ölç.(m)	Hat.(mm)	Ölç.(m)	Hat.(mm)
B4	Y33	1.5340	0.1	1.5332	0.1	1.5345	0.1	1.5338	0.1	1.5342	0.1
Y33	Y32	0.5424	0.1	0.5422	0.1	0.5429	0.1	0.5433	0.1	0.5430	0.1
Y32	Y31	0.4768	0.1	0.4777	0.1	0.4788	0.1	0.4793	0.1	0.4805	0.1
Y31	Y21	0.4825	0.1	0.4848	0.1	0.4834	0.1	0.4854	0.1	0.4840	0.1
Y21	Y22	-2.0392	0.1	-2.0411	0.1	-2.0407	0.1	-2.0423	0.1	-2.0414	0.1
Y22	Y23	-1.6156	0.1	-1.6148	0.1	-1.6138	0.1	-1.6135	0.1	-1.6123	0.1
Y23	Y24	0.2675	0.1	0.2675	0.1	0.2672	0.1	0.4420	0.1	0.4435	0.1
Y24	Y25	0.2517	0.1	0.2520	0.1	0.2506	0.1	0.0766	0.1	0.0740	0.1
Y25	Y34	0.2124	0.1	0.2115	0.1	0.2128	0.1	0.2118	0.1	0.2130	0.1
Y34	Y35	-0.0797	0.1	-0.0807	0.1	-0.0819	0.1	-0.0824	0.1	-0.0833	0.1
Y35	Y36	-0.2832	0.1	-0.2832	0.1	-0.2832	0.1	-0.2824	0.1	-0.2834	0.1
Y36	D26	0.2417	0.1	0.2420	0.1	0.2408	0.1	0.2409	0.1	0.2397	0.1
D26	B7	0.0151	0.1	0.0148	0.1	0.0149	0.1	0.0144	0.1	0.0149	0.1
B7	D30	0.0023	0.1	0.0026	0	0.0024	0	0.0027	0.1	0.0027	0.1
D30	B6	-0.0109	0.1	-0.0112	0.1	-0.0107	0.1	-0.0112	0.1	-0.0106	0.1
B6	B5	0.0283	0.1	0.0282	0.1	0.0279	0.1	0.0273	0.1	0.0271	0.1
B5	B4	-0.0259	0.1	-0.0255	0.1	-0.0259	0.1	-0.0255	0.1	-0.0256	0.1
B4	B5	0.0259	0.1	0.0255	0.1	0.0259	0.1	0.0255	0.1	0.0256	0.1
B5	B6	-0.0283	0.1	-0.0282	0.1	-0.0279	0.1	-0.0273	0.1	-0.0271	0.1
B6	D30	0.0109	0.1	0.0112	0.1	0.0107	0.1	0.0112	0.1	0.0106	0.1
D30	B7	-0.0023	0.1	-0.0026	0	-0.0024	0	-0.0027	0.1	-0.0027	0.1
B7	D26	-0.0151	0.1	-0.0148	0.1	-0.0149	0.1	-0.0144	0.1	-0.0149	0.1
D26	Y36	-0.2417	0.1	-0.2420	0.1	-0.2408	0.1	-0.2409	0.1	-0.2397	0.1
Y36	Y35	0.2832	0.1	0.2832	0.1	0.2832	0.1	0.2824	0.1	0.2834	0.1
Y35	Y34	0.0797	0.1	0.0807	0.1	0.0819	0.1	0.0824	0.1	0.0833	0.1
Y34	Y25	-0.2124	0.1	-0.2115	0.1	-0.2128	0.1	-0.2118	0.1	-0.2130	0.1
Y25	Y24	-0.2517	0.1	-0.2520	0.1	-0.2506	0.1	-0.0766	0.1	-0.0740	0.1
Y24	Y23	-0.2675	0.1	-0.2675	0.1	-0.2672	0.1	-0.4420	0.1	-0.4435	0.1
Y23	Y22	1.6156	0.1	1.6148	0.1	1.6138	0.1	1.6135	0.1	1.6123	0.1
Y22	Y21	2.0392	0.1	2.0411	0.1	2.0407	0.1	2.0423	0.1	2.0414	0.1
Y21	Y31	-0.4825	0.1	-0.4848	0.1	-0.4834	0.1	-0.4854	0.1	-0.4840	0.1
Y31	Y32	-0.4768	0.1	-0.4777	0.1	-0.4788	0.1	-0.4793	0.1	-0.4805	0.1
Y32	Y33	-0.5424	0.1	-0.5422	0.1	-0.5429	0.1	-0.5433	0.1	-0.5430	0.1
Y33	B4	-1.5340	0.1	-1.5332	0.1	-1.5345	0.1	-1.5338	0.1	-1.5342	0.1

Tablo 6. Üçüncü güzergah dengeli ölçüleri ve ortalama hataları

Noktalar		1. Periyot		2. Periyot		3. Periyot		4. Periyot		5. Periyot	
Geri	İleri	Ölç.(m)	Hat.(mm)	Ölç.(m)	Hat.(mm)	Ölç.(m)	Hat.(mm)	Ölç.(m)	Hat.(mm)	Ölç.(m)	Hat.(mm)
D26	D25	-0.0034	0.1	-0.0028	0.1	-0.0024	0.1	-0.0019	0.1	-0.0012	0.1
D25	A023	-0.0281	0.1	-0.0281	0.1	-0.0281	0.1	-0.0284	0.1	-0.0280	0.1
A023	B8	-0.0235	0.1	-0.0239	0.1	-0.0238	0.1	-0.0239	0.1	-0.0230	0.1
B8	R22	-0.0905	0.1	-0.0903	0.1	-0.0904	0.1	-0.0904	0.1	-0.0900	0.1
R22	A20	-0.0035	0.1	-0.0034	0	-0.0030	0.1	-0.0026	0.1	-0.0024	0.1
A20	A23	0.0577	0.1	0.0580	0.1	0.0587	0.1	0.0593	0.1	0.0594	0.1
A23	Y1	-0.5487	0	-0.5493	0	-0.5492	0	-0.5498	0.1	-0.5496	0
Y1	Y30	1.4754	0.1	1.4746	0.1	1.4738	0.1	1.4732	0.1	1.4727	0.1
Y30	Y29	-1.2842	0.1	-1.2831	0.1	-1.2826	0.1	-1.2820	0.1	-1.2816	0.1
Y29	Y28	0.0948	0.1	0.0949	0.1	0.0955	0.1	0.0955	0.1	0.0962	0.1
Y28	Y27	0.1485	0.1	0.1488	0.1	0.1956	0.1	0.1471	0.1	0.1475	0.1
Y27	Y26	0.1147	0.1	0.1150	0.1	0.0689	0.1	0.1179	0.1	0.1176	0.1
Y26	Y25	-0.0004	0.1	-0.0001	0.1	-0.0016	0.1	-0.0019	0.1	-0.0034	0.1
Y25	Y34	0.2124	0.1	0.2115	0.1	0.2128	0.1	0.2118	0.1	0.2130	0.1
Y34	Y35	-0.0797	0.1	-0.0807	0.1	-0.0819	0.1	-0.0824	0.1	-0.0833	0.1
Y35	Y36	-0.2832	0.1	-0.2832	0.1	-0.2832	0.1	-0.2824	0.1	-0.2834	0.1
Y36	D26	0.2417	0.1	0.2420	0.1	0.2408	0.1	0.2409	0.1	0.2397	0.1
D26	Y36	-0.2417	0.1	-0.2420	0.1	-0.2408	0.1	-0.2409	0.1	-0.2397	0.1
Y36	Y35	0.2832	0.1	0.2832	0.1	0.2832	0.1	0.2824	0.1	0.2834	0.1
Y35	Y34	0.0797	0.1	0.0807	0.1	0.0819	0.1	0.0824	0.1	0.0833	0.1
Y34	Y25	-0.2124	0.1	-0.2115	0.1	-0.2128	0.1	-0.2118	0.1	-0.2130	0.1
Y25	Y26	0.0004	0.1	0.0001	0.1	0.0016	0.1	0.0019	0.1	0.0034	0.1
Y26	Y27	-0.1147	0.1	-0.1150	0.1	-0.0689	0.1	-0.1179	0.1	-0.1176	0.1
Y27	Y28	-0.1485	0.1	-0.1488	0.1	-0.1956	0.1	-0.1471	0.1	-0.1475	0.1
Y28	Y29	-0.0948	0.1	-0.0949	0.1	-0.0955	0.1	-0.0955	0.1	-0.0962	0.1
Y29	Y30	1.2842	0.1	1.2831	0.1	1.2826	0.1	1.2820	0.1	1.2816	0.1
Y30	Y1	-1.4754	0.1	-1.4746	0.1	-1.4738	0.1	-1.4732	0.1	-1.4727	0.1
Y1	A23	0.5487	0	0.5493	0	0.5492	0	0.5498	0.1	0.5496	0
A23	A20	-0.0577	0.1	-0.0580	0.1	-0.0587	0.1	-0.0593	0.1	-0.0594	0.1
A20	R22	0.0035	0.1	0.0034	0	0.0030	0.1	0.0026	0.1	0.0024	0.1
R22	B8	0.0905	0.1	0.0903	0.1	0.0904	0.1	0.0904	0.1	0.0900	0.1
B8	A023	0.0235	0.1	0.0239	0.1	0.0238	0.1	0.0239	0.1	0.0230	0.1
A023	D25	0.0281	0.1	0.0281	0.1	0.0281	0.1	0.0284	0.1	0.0280	0.1
D25	D26	0.0034	0.1	0.0028	0.1	0.0024	0.1	0.0019	0.1	0.0012	0.1

Tablo 7. Dördüncü güzergah dengeli ölçüleri ve ortalama hataları

Noktalar		1. Periyot		2. Periyot		3. Periyot		4. Periyot		5. Periyot	
Geri	İleri	Ölç.(m)	Hat.(mm)	Ölç.(m)	Hat.(mm)	Ölç.(m)	Hat.(mm)	Ölç.(m)	Hat.(mm)	Ölç.(m)	Hat.(mm)
A23	F2	1.7495	0.1	1.7463	0.1	1.7425	0.1	1.7412	0.1	1.7371	0.1
F2	F3	-0.6322	0.1	-0.6324	0.1	-0.6305	0.1	-0.6305	0.1	-0.6272	0.1
F3	F4	-0.5259	0.1	-0.5234	0.1	-0.5207	0.1	-0.5205	0.1	-0.5183	0.1
F4	F5	-0.0610	0.1	-0.0607	0.1	-0.0607	0.1	-0.0603	0.1	-0.0594	0.1
F5	F6	-0.0675	0.1	-0.0689	0.1	-0.0706	0.1	-0.0714	0.1	-0.0727	0.1
F6	S2	-0.1036	0.1	-0.1015	0.1	-0.0996	0.1	-0.0982	0.1	-0.0974	0.1
S2	F6	0.1036	0.1	0.1015	0.1	0.0996	0.1	0.0982	0.1	0.0974	0.1
F6	F5	0.0675	0.1	0.0689	0.1	0.0706	0.1	0.0714	0.1	0.0727	0.1
F5	F4	0.0610	0.1	0.0607	0.1	0.0607	0.1	0.0603	0.1	0.0594	0.1
F4	F3	0.5259	0.1	0.5234	0.1	0.5207	0.1	0.5205	0.1	0.5183	0.1
F3	F2	0.6322	0.1	0.6324	0.1	0.6305	0.1	0.6305	0.1	0.6272	0.1
F2	A23	-1.7495	0.1	-1.7463	0.1	-1.7425	0.1	-1.7412	0.1	-1.7371	0.1

Tablo 8. Birinci güzergah uyuşumsuz ölçüler test büyüklükleri ve sınır değerleri

Noktalar		Ölçüler İçin Test Büyüklükleri					Test Sınır Değ.	
Geri	İleri	1.Per.	2.Per.	3.Per.	4.Per.	5.Per.	Tau	t
F1	Y17	1.156	0.160	1.671	0.281	0.454	1.993	3.407
Y17	Y16	1.843	1.907	0.738	1.332	1.974	1.993	3.407
Y16	Y15	1.717	1.943	1.967	1.339	0.294	1.993	3.407
Y15	Y14	1.964	1.627	1.973	1.577	1.052	1.993	3.407
Y14	Y13	1.964	1.566	0.507	0.368	1.027	1.993	3.407
Y13	B1	0.095	1.903	1.198	1.801	1.657	1.993	3.407
B1	B2	1.058	1.951	1.694	1.892	0.902	1.993	3.407
B2	B3	1.047	1.655	1.980	1.929	0.746	1.993	3.407
B3	B4	0.841	1.901	0.475	0.493	0.749	1.993	3.407
B4	Y33	1.982	0.507	1.053	0.147	0.115	1.993	3.407
Y33	Y32	0.361	0.496	1.804	0.663	0.841	1.993	3.407
Y32	Y31	0.305	0.623	0.728	1.310	0.111	1.993	3.407
Y31	Y21	0.173	0.256	0.423	0.484	0.860	1.993	3.407
Y21	Y20	0.217	1.953	1.989	1.446	1.126	1.993	3.407
Y20	Y19	1.960	0.965	1.690	1.990	1.668	1.993	3.407
Y19	Y18	1.966	1.248	0.802	1.874	1.206	1.993	3.407
Y18	Y17	0.950	1.772	1.555	1.987	1.640	1.993	3.407
Y17	F1	1.209	0.338	0.643	0.238	0.483	1.993	3.407
F1	S1	1.353	0.857	0.036	0.968	0.869	1.993	3.407
S1	F1	0.565	1.952	0.126	1.973	1.590	1.993	3.407
F1	Y17	1.980	0.231	0.450	0.238	0.630	1.993	3.407
Y17	Y18	0.904	0.967	0.382	0.144	0.754	1.993	3.407
Y18	Y19	0.110	1.495	1.137	0.259	0.320	1.993	3.407
Y19	Y20	0.208	1.625	0.141	0.025	0.830	1.993	3.407
Y20	Y21	1.962	0.626	0.166	0.560	0.293	1.993	3.407
Y21	Y31	0.396	0.804	0.918	1.271	1.313	1.993	3.407
Y31	Y32	0.683	0.369	0.590	0.416	0.557	1.993	3.407
Y32	Y33	0.513	0.547	0.486	1.063	1.288	1.993	3.407
Y33	B4	1.055	0.656	0.291	1.907	0.319	1.993	3.407
B4	B3	1.024	0.856	1.474	1.651	0.142	1.993	3.407
B3	B2	0.761	1.018	0.090	0.149	0.118	1.993	3.407
B2	B1	0.777	0.760	0.223	0.217	0.026	1.993	3.407
B1	Y13	1.964	0.861	0.756	0.349	0.764	1.993	3.407
Y13	Y14	0.093	1.199	1.447	1.782	0.132	1.993	3.407
Y14	Y15	0.095	1.137	0.019	0.572	0.158	1.993	3.407
Y15	Y16	0.246	0.957	0.083	0.917	1.232	1.993	3.407
Y16	Y17	0.137	0.615	1.045	0.630	1.159	1.993	3.407
Y17	F1	0.385	0.053	0.578	0.281	0.600	1.993	3.407
F1	S1	0.788	1.096	0.090	1.005	0.721	1.993	3.407

Tablo 9. İkinci güzergah uyuşumsuz ölçüler test büyüklükleri ve sınır değerleri

Noktalar		Ölçüler İçin Test Büyüklükleri					Test Sınır Değ.	
Geri	İleri	1.Per.	2.Per.	3.Per.	4.Per.	5.Per.	Tau	t
B4	Y33	1.283	0.407	1.009	0.117	0.197	1.993	3.407
Y33	Y32	0.207	0.445	1.758	0.693	0.758	1.993	3.407
Y32	Y31	0.264	0.521	0.682	1.279	0.027	1.993	3.407
Y31	Y21	0.050	0.455	0.468	0.515	0.778	1.993	3.407
Y21	Y22	1.951	0.543	0.680	1.143	0.110	1.993	3.407
Y22	Y23	0.601	0.573	1.746	1.635	0.865	1.993	3.407
Y23	Y24	1.134	0.689	1.276	1.988	0.110	1.993	3.407
Y24	Y25	0.129	0.271	0.041	1.020	0.087	1.993	3.407
Y25	Y34	0.745	0.106	0.614	0.475	0.880	1.993	3.407
Y34	Y35	0.263	0.698	0.212	0.514	0.223	1.993	3.407
Y35	Y36	1.877	0.864	1.331	0.057	0.118	1.993	3.407
Y36	D26	0.925	0.287	0.654	0.146	0.345	1.993	3.407
D26	B7	1.976	0.458	0.533	0.115	0.454	1.993	3.407
B7	D30	0.438	0.622	0.795	1.989	0.252	1.993	3.407
D30	B6	1.349	0.428	1.924	0.312	0.081	1.993	3.407
B6	B5	0.539	1.673	1.417	1.191	0.696	1.993	3.407
B5	B4	1.611	0.398	1.851	1.985	1.482	1.993	3.407
B4	B5	0.393	0.113	0.746	0.151	0.325	1.993	3.407
B5	B6	0.682	1.959	0.309	0.649	1.115	1.993	3.407
B6	D30	0.310	0.185	0.982	1.877	1.622	1.993	3.407
D30	B7	0.263	0.786	0.159	0.933	1.292	1.993	3.407
B7	D26	0.738	0.168	0.590	1.980	1.382	1.993	3.407
D26	Y36	0.426	0.750	0.460	0.760	1.220	1.993	3.407
Y36	Y35	1.371	1.918	1.135	0.681	1.006	1.993	3.407
Y35	Y34	0.671	0.400	0.012	0.122	1.084	1.993	3.407
Y34	Y25	0.971	0.890	0.424	1.080	1.699	1.993	3.407
Y25	Y24	1.035	0.002	1.015	0.733	1.639	1.993	3.407
Y24	Y23	0.076	0.406	0.178	0.166	1.904	1.993	3.407
Y23	Y22	0.601	0.855	0.655	0.176	0.918	1.993	3.407
Y22	Y21	0.711	0.833	1.805	0.725	1.949	1.993	3.407
Y21	Y31	0.013	0.605	0.873	1.241	1.190	1.993	3.407
Y31	Y32	0.226	0.572	0.636	0.447	0.432	1.993	3.407
Y32	Y33	0.169	0.597	0.440	1.032	1.162	1.993	3.407
Y33	B4	1.246	0.556	0.336	1.876	0.237	1.993	3.407

Tablo 10. Üçüncü güzergah uyuşumsuz ölçüler test büyüklükleri ve sınır değerleri

Noktalar		Ölçüler İçin Test Büyüklükleri					Test Sınır Değ.	
Geri	İleri	1.Per.	2.Per.	3.Per.	4.Per.	5.Per.	Tau	t
D26	D25	1.378	0.396	0.166	1.088	1.534	1.993	3.407
D25	A023	1.559	0.502	0.789	1.175	1.080	1.993	3.407
A023	B8	0.497	0.969	1.155	0.560	0.209	1.993	3.407
B8	R22	0.219	1.008	0.857	0.023	1.865	1.993	3.407
R22	A20	0.356	1.097	1.549	0.803	0.451	1.993	3.407
A20	A23	0.797	0.040	0.714	0.200	1.519	1.993	3.407
A23	Y1	0.112	0.761	1.510	0.237	0.347	1.993	3.407
Y1	Y30	0.672	0.198	0.293	0.493	1.350	1.993	3.407
Y30	Y29	0.795	0.350	0.570	0.992	1.107	1.993	3.407
Y29	Y28	0.145	0.959	1.340	0.084	1.837	1.993	3.407
Y28	Y27	0.764	1.183	0.653	0.432	1.455	1.993	3.407
Y27	Y26	0.170	1.888	0.678	0.633	0.001	1.993	3.407
Y26	Y25	0.779	1.530	0.814	0.869	1.453	1.993	3.407
Y25	Y34	1.010	0.263	0.567	0.443	0.708	1.993	3.407
Y34	Y35	0.634	0.549	0.167	0.484	0.059	1.993	3.407
Y35	Y36	1.333	0.713	1.286	0.026	0.035	1.993	3.407
Y36	D26	0.464	0.442	0.607	0.114	0.261	1.993	3.407
D26	Y36	0.387	0.596	0.414	0.729	1.093	1.993	3.407
Y36	Y35	1.409	1.766	1.089	0.650	0.881	1.993	3.407
Y35	Y34	0.708	0.499	0.033	0.152	0.962	1.993	3.407
Y34	Y25	0.932	0.785	0.376	1.049	1.570	1.993	3.407
Y25	Y26	0.600	0.692	0.104	0.404	1.600	1.993	3.407
Y26	Y27	1.203	0.324	1.385	0.171	0.147	1.993	3.407
Y27	Y28	0.632	1.065	1.372	0.038	1.604	1.993	3.407
Y28	Y29	1.378	1.027	1.976	0.332	1.969	1.993	3.407
Y29	Y30	0.440	1.640	1.207	0.576	1.239	1.993	3.407
Y30	Y1	1.982	1.913	0.968	0.934	1.210	1.993	3.407
Y1	A23	0.688	1.689	1.807	0.042	0.409	1.993	3.407
A23	A20	1.963	1.918	1.315	0.593	1.643	1.993	3.407
A20	R22	0.506	0.292	1.993	1.093	0.543	1.993	3.407
R22	B8	1.327	0.778	1.428	0.396	1.983	1.993	3.407
B8	A023	0.661	0.896	0.559	0.950	0.332	1.993	3.407
A023	D25	0.060	1.912	1.561	0.670	1.240	1.993	3.407
D25	D26	0.065	1.928	0.909	0.601	1.687	1.993	3.407

Tablo 11. Dördüncü güzergah uyuşumsuz ölçüler test büyüklükleri ve sınır değerleri

Noktalar		Ölçüler İçin Test Büyüklükleri					Test Sınır Değ.	
Geri	İleri	1.Per.	2.Per.	3.Per.	4.Per.	5.Per.	Tau	t
A23	F2	0.805	0.037	0.067	0.768	0.489	1.993	3.407
F2	F3	1.710	0.000	0.326	0.073	0.620	1.993	3.407
F3	F4	0.158	0.090	1.388	1.392	0.248	1.993	3.407
F4	F5	0.900	0.000	0.373	1.422	0.623	1.993	3.407
F5	F6	0.329	0.521	0.977	1.170	0.396	1.993	3.407
F6	S2	0.174	1.702	0.663	1.602	1.153	1.993	3.407
S2	F6	0.174	1.702	0.663	1.602	1.153	1.993	3.407
F6	F5	0.329	0.521	0.977	1.170	0.396	1.993	3.407
F5	F4	0.900	0.000	0.373	1.422	0.623	1.993	3.407
F4	F3	0.158	0.090	1.388	1.392	0.248	1.993	3.407
F3	F2	1.710	0.000	0.326	0.073	0.620	1.993	3.407
F2	A23	0.805	0.037	0.067	0.768	0.489	1.993	3.407

Tablo 12. Dengeli nokta yükseklikleri (m) ve ortalama hataları (mm)

	1. PERİYOT		2. PERİYOT		3. PERİYOT		4. PERİYOT		5. PERİYOT	
N.No	Yükseklik	Hata	Yükseklik	Hata	Yükseklik	Hata	Yükseklik	Hata	Yükseklik	Hata
S1	8.0701	0.2	8.0701	0.1	8.0700	0.2	8.0699	0.2	8.0701	0.2
F1	8.2818	0.2	8.2810	0.1	8.2808	0.1	8.2790	0.2	8.2789	0.2
Y17	8.2997	0.2	8.2994	0.1	8.3001	0.1	8.2982	0.2	8.2987	0.2
Y16	8.2796	0.2	8.2794	0.1	8.2761	0.1	8.2731	0.2	8.2693	0.2
Y15	8.1849	0.2	8.1861	0.1	8.1843	0.1	8.1834	0.2	8.1809	0.2
Y14	8.1412	0.2	8.1403	0.1	8.1339	0.1	8.1294	0.2	8.1224	0.2
Y13	8.0032	0.2	8.0004	0.1	7.9926	0.1	7.9886	0.2	7.9808	0.2
B1	5.5061	0.2	5.5047	0.1	5.5023	0.1	5.5008	0.2	5.4988	0.2
B2	5.5174	0.2	5.5167	0.1	5.5140	0.1	5.5126	0.2	5.5103	0.1
B3	5.5157	0.1	5.5151	0.1	5.5120	0.1	5.5105	0.2	5.5080	0.1
B4	5.4991	0.1	5.4985	0.1	5.4951	0.1	5.4932	0.1	5.4912	0.1
Y33	7.0331	0.1	7.0317	0.1	7.0296	0.1	7.0270	0.2	7.0255	0.1
Y32	7.5755	0.1	7.5740	0.1	7.5724	0.1	7.5703	0.2	7.5685	0.1
Y31	8.0523	0.1	8.0517	0.1	8.0512	0.1	8.0496	0.2	8.0489	0.1
Y21	8.5348	0.1	8.5365	0.1	8.5346	0.1	8.5350	0.1	8.5330	0.1
Y20	8.9308	0.1	8.9309	0.1	8.9309	0.1	8.9302	0.2	8.9293	0.1
Y19	8.5187	0.2	8.5193	0.1	8.5192	0.1	8.5189	0.2	8.5182	0.1
Y18	8.1141	0.2	8.1143	0.1	8.1143	0.1	8.1129	0.2	8.1126	0.1
Y22	6.4955	0.1	6.4954	0.1	6.4939	0.1	6.4927	0.2	6.4916	0.1
Y23	4.8799	0.1	4.8806	0.1	4.8801	0.1	4.8792	0.2	4.8793	0.1
Y25	5.3991	0.1	5.4001	0.1	5.3980	0.1	5.3978	0.1	5.3968	0.1
Y34	5.6114	0.1	5.6116	0.1	5.6108	0.1	5.6096	0.1	5.6098	0.1
Y35	5.5317	0.1	5.5309	0.1	5.5289	0.1	5.5272	0.1	5.5265	0.1
Y36	5.2486	0.1	5.2477	0.1	5.2457	0.1	5.2447	0.1	5.2430	0.1
D26	5.4902	0.1	5.4897	0.1	5.4866	0.1	5.4856	0.1	5.4828	0.1
B7	5.5054	0.1	5.5045	0.1	5.5015	0.1	5.5000	0.1	5.4976	0.1
D30	5.5077	0.1	5.5071	0.1	5.5039	0.1	5.5027	0.1	5.5003	0.1
B6	5.4967	0.1	5.4959	0.1	5.4932	0.1	5.4915	0.2	5.4897	0.1
B5	5.5250	0.1	5.5240	0.1	5.5211	0.1	5.5188	0.2	5.5168	0.1
D25	5.4868	0.1	5.4870	0.1	5.4842	0.1	5.4837	0.2	5.4815	0.1
A023	5.4587	0.1	5.4589	0.1	5.4561	0.1	5.4553	0.2	5.4535	0.1
B8	5.4352	0.1	5.435	0.1	5.4323	0.1	5.4315	0.2	5.4305	0.1
R22	5.3446	0.1	5.3447	0.1	5.3420	0.1	5.3411	0.2	5.3404	0.1
A20	5.3412	0.1	5.3413	0.1	5.3390	0.1	5.3384	0.2	5.3381	0.1
A23	5.3989	0.1	5.3993	0.1	5.3977	0.1	5.3977	0.2	5.3975	0.1
Y1	4.8503	0.1	4.8501	0.1	4.8485	0.1	4.8479	0.2	4.8479	0.1
Y30	6.3256	0.2	6.3246	0.1	6.3222	0.1	6.3211	0.2	6.3206	0.1
Y29	5.0414	0.2	5.0415	0.1	5.0397	0.1	5.0392	0.2	5.0390	0.1
Y28	5.1362	0.1	5.1364	0.1	5.1351	0.1	5.1347	0.2	5.1352	0.1
Y26	5.3995	0.1	5.4002	0.1	5.3996	0.1	5.3997	0.2	5.4002	0.1
S2	5.7582	0.3	5.7587	0.2	5.7580	0.2	5.7580	0.3	5.7595	0.2

2.2.4. Dengeli Yükseklik Farkları ile Düşey Yüzey Değişimlerinin Belirlenmesi

Tüm periyotlardaki ölçülerin dengelenmesi ile elde edilen dengelenmiş kesin yükseklik değerlerinin periyodik farkları alınarak, nivelman noktalarında periyotlar arası meydana gelen düşey yüzey değişimleri belirlenmiştir (Tablo 13).

Tablo 13. Nivelman noktalarındaki periyodik düşey yüzey değişimleri (mm)

N.No	Per 1-2	Per 1-3	Per 1-4	Per 1-5	Per 2-3	Per 2-4	Per 2-5	Per 3-4	Per 3-5	Per 4-5
S1	0.0	-0.1	-0.2	0.0	-0.1	-0.2	0.0	-0.1	0.1	0.2
F1	-0.8	-1.0	-2.8	-2.9	-0.2	-2.0	-2.1	-1.8	-1.9	-0.1
Y17	-0.3	0.4	-1.5	-1.0	0.7	-1.2	-0.7	-1.9	-1.4	0.5
Y16	-0.2	-3.5	-6.5	-10.3	-3.3	-6.3	-10.1	-3.0	-6.8	-3.8
Y15	1.2	-0.6	-1.5	-4.0	-1.8	-2.7	-5.2	-0.9	-3.4	-2.5
Y14	-0.9	-7.3	-11.8	-18.8	-6.4	-10.9	-17.9	-4.5	-11.5	-7.0
Y13	-2.8	-10.6	-14.6	-22.4	-7.8	-11.8	-19.6	-4.0	-11.8	-7.8
B1	-1.4	-3.8	-5.3	-7.3	-2.4	-3.9	-5.9	-1.5	-3.5	-2.0
B2	-0.7	-3.4	-4.8	-7.1	-2.7	-4.1	-6.4	-1.4	-3.7	-2.3
B3	-0.6	-3.7	-5.2	-7.7	-3.1	-4.6	-7.1	-1.5	-4.0	-2.5
B4	-0.6	-4.0	-5.9	-7.9	-3.4	-5.3	-7.3	-1.9	-3.9	-2.0
Y33	-1.4	-3.5	-6.1	-7.6	-2.1	-4.7	-6.2	-2.6	-4.1	-1.5
Y32	-1.5	-3.1	-5.2	-7.0	-1.6	-3.7	-5.5	-2.1	-3.9	-1.8
Y31	-0.6	-1.1	-2.7	-3.4	-0.5	-2.1	-2.8	-1.6	-2.3	-0.7
Y21	1.7	-0.2	0.2	-1.8	-1.9	-1.5	-3.5	0.4	-1.6	-2.0
Y20	0.1	0.1	-0.6	-1.5	0.0	-0.7	-1.6	-0.7	-1.6	-0.9
Y19	0.6	0.5	0.2	-0.5	-0.1	-0.4	-1.1	-0.3	-1.0	-0.7
Y18	0.2	0.2	-1.2	-1.5	0.0	-1.4	-1.7	-1.4	-1.7	-0.3
Y22	-0.1	-1.6	-2.8	-3.9	-1.5	-2.7	-3.8	-1.2	-2.3	-1.1
Y23	0.7	0.2	-0.7	-0.6	-0.5	-1.4	-1.3	-0.9	-0.8	0.1
Y25	1.0	-1.1	-1.3	-2.3	-2.1	-2.3	-3.3	-0.2	-1.2	-1.0
Y34	0.2	-0.6	-1.8	-1.6	-0.8	-2.0	-1.8	-1.2	-1.0	0.2
Y35	-0.8	-2.8	-4.5	-5.2	-2.0	-3.7	-4.4	-1.7	-2.4	-0.7
Y36	-0.9	-2.9	-3.9	-5.6	-2.0	-3.0	-4.7	-1.0	-2.7	-1.7
D26	-0.5	-3.6	-4.6	-7.4	-3.1	-4.1	-6.9	-1.0	-3.8	-2.8
B7	-0.9	-3.9	-5.4	-7.8	-3.0	-4.5	-6.9	-1.5	-3.9	-2.4
D30	-0.6	-3.8	-5.0	-7.4	-3.2	-4.4	-6.8	-1.2	-3.6	-2.4
B6	-0.8	-3.5	-5.2	-7.0	-2.7	-4.4	-6.2	-1.7	-3.5	-1.8
B5	-1.0	-3.9	-6.2	-8.2	-2.9	-5.2	-7.2	-2.3	-4.3	-2.0
D25	0.2	-2.6	-3.1	-5.3	-2.8	-3.3	-5.5	-0.5	-2.7	-2.2
A023	0.2	-2.6	-3.4	-5.2	-2.8	-3.6	-5.4	-0.8	-2.6	-1.8
B8	-0.2	-2.9	-3.7	-4.7	-2.7	-3.5	-4.5	-0.8	-1.8	-1.0
R22	0.1	-2.6	-3.5	-4.2	-2.7	-3.6	-4.3	-0.9	-1.6	-0.7
A20	0.1	-2.2	-2.8	-3.1	-2.3	-2.9	-3.2	-0.6	-0.9	-0.3
A23	0.4	-1.2	-1.2	-1.4	-1.6	-1.6	-1.8	0.0	-0.2	-0.2
Y1	-0.2	-1.8	-2.4	-2.4	-1.6	-2.2	-2.2	-0.6	-0.6	0.0
Y30	-1.0	-3.4	-4.5	-5.0	-2.4	-3.5	-4.0	-1.1	-1.6	-0.5
Y29	0.1	-1.7	-2.2	-2.4	-1.8	-2.3	-2.5	-0.5	-0.7	-0.2
Y28	0.2	-1.1	-1.5	-1.0	-1.3	-1.7	-1.2	-0.4	0.1	0.5
Y26	0.7	0.1	0.2	0.7	-0.6	-0.5	0.0	0.1	0.6	0.5
S2	0.5	-0.2	-0.2	1.3	-0.7	-0.7	0.8	0.0	1.5	1.5

Tablo 12'de görülmekte olan S_2 sabit noktasının birinci ve dördüncü periyot dengeli yüksekliklerinin 0.3 mm değerindeki ortalama hataları hariç, diğer tüm noktaların periyodik nokta yüksekliklerine ait ortalama hata değerlerinin 0.1-0.2 mm arasında olduğu görülebilmektedir. Bu nedenle dolgu sahası üzerinde yer alan nivelman noktalarında meydana gelen düşey yüzey değişimlerinin hassas nivelman ölçüleri ile genel olarak yaklaşık 0.4 mm hassasiyette tespit edildiği ve genel olarak bu değerden büyük olan değişimlerin anlamlı olduğu söylenebilir.

Tablo 13'de yer alan, ilk ve son ölçü periyotları arasındaki yaklaşık iki yıllık zaman aralığında meydana gelen düşey yüzey değişimlerini ifade eden yeşil renk ile taranmış Per 1-5 sütunundaki değerler incelendiğinde, noktaların büyük çoğunluğunun – ya da aşağı yönde çökme şeklinde değişim gösterdiğini ve en fazla deforme olan ya da çöken noktaların -22.4 mm ve -18.8 mm değerleriyle Y_{13} ve Y_{14} noktaları oldukları görülebilmektedir. Yükselme görülen az sayıdaki noktalar arasından, en fazla yükselme görülen nokta ise 1.3 mm değeriyle S_2 noktası olmuştur.

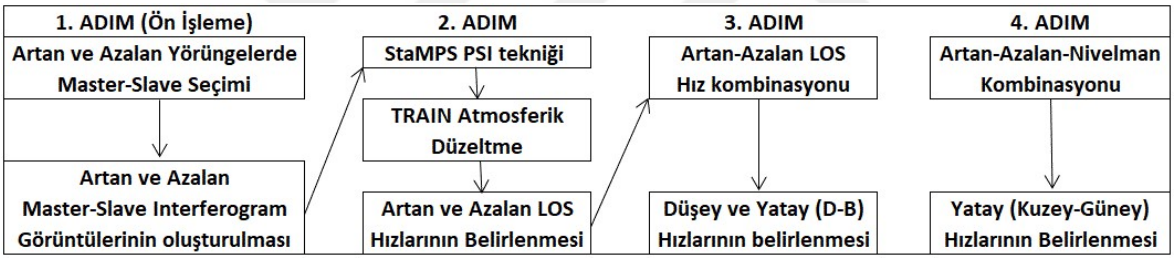
SAR verileri ile yapılacak karşılaştırmalar için nivelman noktalarında tespit edilen bu düşey yüzey değişimlerinin yıllık ortalama hız değerlerinin hesaplanması gerekir. Düşey hız değerlerinin hesabı, SAR verileri ile elde edilen düşey hızlar ile karşılaştırılması ve bölgenin deformasyonu açısından değerlendirilmesi, bulguların irdelendiği tez çalışmasının üçüncü bölümünde ele alınacaktır.

2.3. StaMPS PSI Yöntemiyle Yüzey Değişimlerinin Belirlenmesi

StaMPS PSI tekniği uygulamaları iki farklı tarih aralığında gerçekleştirilmiştir. Bunlardan birincisi elde edilen sonuçların nivelman ölçülerinden elde edilen düşey hızlar ile karşılaştırıldığı ve nivelman ölçülerinin yapıldığı zamansal aralığa yakın olan, yaklaşık iki yıllık süreyi kapsayan 14.01.2018-28.01.2020 tarih aralığıdır. Diğeri ise, spor kompleksinin açılışı ile dolgu sahasındaki nivelman ölçülerinin tamamlandığı tarihleri içeren ve yaklaşık üç yıllık süreyi kapsayan 20.12.2016 - 28.01.2020 tarih aralığıdır. Bu tarih aralıklarında artan ve azalan yörüngeler üzerinde elde edilen toplam 191 adet Sentinel-1 SAR görüntüsü kullanılarak uygulamalar gerçekleştirilmiştir.

Bu uygulamaları genel olarak dört adımda özetleyebiliriz (Şekil 12). Ön işleme adımları olarak adlandırılan birinci adımda, artan ve azalan yörüngeler için birbirinden ayrı olarak seçilen ve değerlendirilen master-slave görüntü çiftleri arasındaki faz farklarının

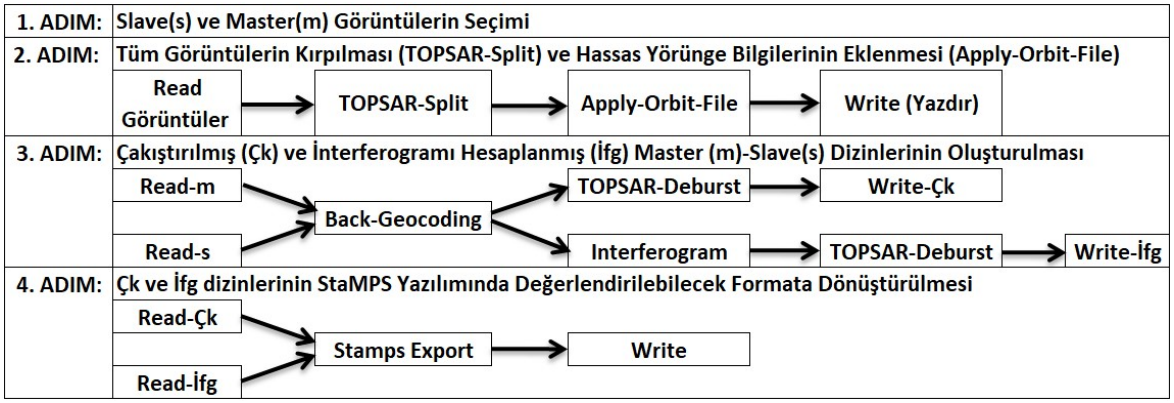
coğrafi koordinatları ile birlikte elde edildiği interferogram görüntüleri oluşturulmuştur. İkinci adımda, birinci adımdan elde edilen master-slave interferogram dizinleri StaMPS yazılımında değerlendirilerek, çalışma alanı üzerindeki PS noktaları ve bu noktaların LOS yönündeki yıllık ortalama hız değerleri artan ve azalan yörüngeler için belirlenmiştir. Ayrıca bu adımda StaMPS yazılımı ile entegre çalışabilen TRAIN yazılımında bulunan lineer troposferik model ve GACOS verileri kullanılarak, LOS hız değerlerine atmosferik düzeltmeler getirilmiştir. Üçüncü adımda, ikinci adım sonucunda artan ve azalan yörünge verilerinden elde edilen hız değerlerinin kombinasyonu yapılarak, düşey ve yatay (D-B) hız değerleri elde edilmiştir. Yalnızca 14.01.2018-28.01.2020 tarih aralığındaki yaklaşık son iki yıllık veriler için gerçekleştirilen dördüncü adımda ise, artan, azalan LOS doğrultularındaki ve hassas nivelman ölçülerinden elde edilen düşey doğrultudaki hız değerlerinin kombinasyonu ile kuzey-güney doğrultusundaki yatay hız bileşeni elde edilmiştir. Bu bölümde bu dört adım detaylı bir biçimde açıklanacaktır.



Şekil 12. StaMPS PSI tekniği uygulamaları

2.3.1. Ön İşleme (Pre-Processing) Adımları

StaMPS tekniğinde ön işleme adımları ISCE, Gamma, ROI_PAC, Doris ve SNAP gibi yazılımlar aracılığı ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu tez çalışmasında ise ESA tarafından geliştirilen SNAP 7.0 yazılımı kullanılmıştır. Ön işleme adımlarında dört adımda gerçekleştirilen uygulamalar, açıklamaları ve yazılımda yapılacak işlerin tasarlandığı Graph Builder'da yer alan yazılım komutları ile kısaca Şekil 13'de gösterilmiştir.



Şekil 13. Ön işleme adımları

2.3.1.1. Slave ve Master Görüntülerin Seçimi

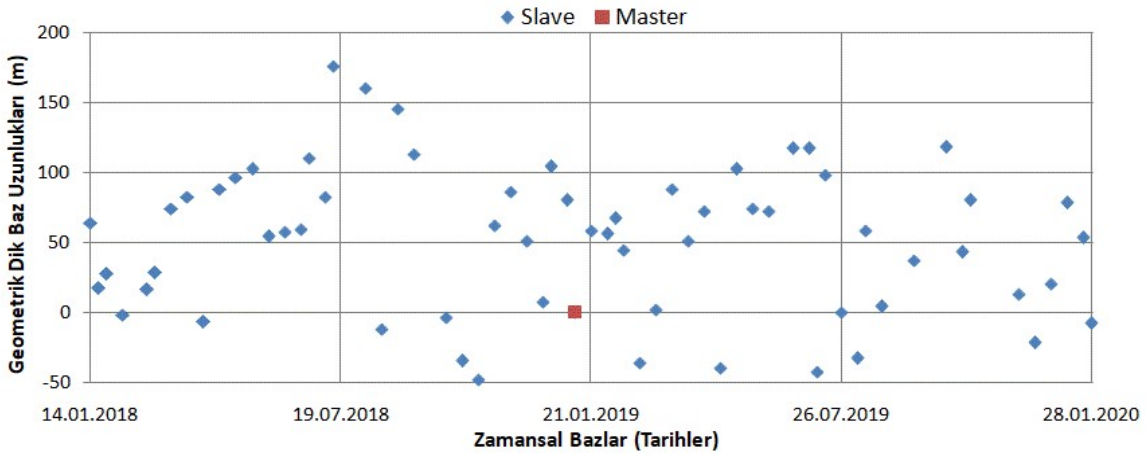
InSAR çalışmalarının ilk adımı değerlendirmeye alınacak görüntülerin elde edilmesi ve seçilmesi ile başlar. Birinci bölümde de bahsedildiği üzere, Sentinel-1 uydu misyonuna ait veriler ile gerçekleştirilen InSAR çalışmalarında, IW görüntüleme modu ile eğik menzil geometrisi ya da LOS doğrultusu üzerinde elde edilen level-1 SLC tipindeki SAR verileri kullanılır. Değerlendirmeye alınacak veriler arasındaki gerekli konumsal korelasyonun sağlanabilmesi için, bu verilerin aynı geçiş (artan-azalan) ve yörünge yolu ya da izi (track) üzerinde birbirine yakın mesafelerdeki görüntüleme geometrileri ile elde edilmiş ve aynı polarizasyonda olmaları gerekir. Dolayısıyla artan ve azalan geçiş yörünge verilerinin birbirinden ayrı bir biçimde, kendi içerlerinde değerlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, çalışma alanı bu tez çalışmasında olduğu gibi heterojen deformasyon gösterebilecek bir alan ise, alandaki deformasyon olgusunu daha detaylı bir biçimde ortaya çıkarabilmek için, yansıtıcı obje piksellerinin daha yoğun olduğu görüntüler seçilmelidir (Altintas ve Gokalp, 2021). Bu bakımdan 20.12.2016 - 28.01.2020 tarih aralığındaki artan ve azalan geçiş yörüngelerindeki 6 gün aralıklı tüm Sentinel-1 IW SLC SAR görüntüleri indirilmiştir. Bunlar arasından genel olarak 12 gün aralıklı ve dolgu sahasını en fazla sayıda yansıtıcı obje ile temsil eden en iyi görüntüler seçilerek uygulamalar gerçekleştirilmiştir. 14.01.2018-28.01.2020 tarih aralığındaki yaklaşık iki yıllık süreyi kapsayan değerlendirmelerde artan geçiş yörüngesi üzerinde 63, azalan geçiş yörüngesi üzerinde ise 62 görüntü kullanılarak uygulamalar gerçekleştirilmiştir. 20.12.2016 - 28.01.2020 tarih aralığındaki yaklaşık üç yıllık süreyi kapsayan değerlendirmelerde ise artan geçiş yörüngesi üzerinde 95, azalan geçiş yörüngesi üzerinde ise 96 adet SAR görüntüsü

kullanılmıştır. Artan ve azalan geçiş yörüngesi üzerinde yer alan tüm verilerin sırasıyla 43 ve 123 numaralı olmak üzere aynı yörünge yolu üzerinde ve birbirlerine yakın görüntüleme geometrileriyle elde edildikleri görülerek, bu veriler kendi geçiş ve yörünge yolları üzerinde bulunan diğer veriler ile birlikte, kendi içerlerinde değerlendirilmişlerdir. InSAR çalışmalarında genellikle VV düşey polarizasyonlu veriler kullanıldığından, bu çalışmada da düşey polarizasyonlu veriler kullanılmıştır. Artan ve azalan geçiş yörüngelerinde kullanılan tüm SAR verileri tarih, sensör ve yörünge yolu numarası (YYN) bilgileri ile birlikte Tablo 14'de verilmiştir.

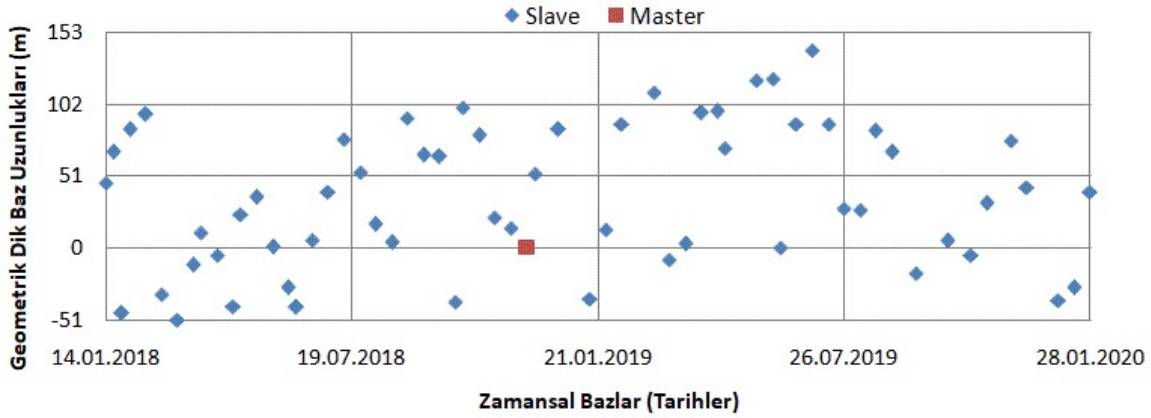
Tablo 14. Artan ve azalan Sentinel-1 görüntüleri tarih, sensör ve YYN bilgileri

Artan Yörünge - YYN:43						Azalan Yörünge - YYN:123					
SN	Tarih	Sensör	SN	Tarih	Sensör	SN	Tarih	Sensör	SN	Tarih	Sensör
1	20.12.2016	S-1A	49	7.07.2018	S-1A	1	20.12.2016	S-1B	49	1.06.2018	S-1B
2	1.01.2017	S-1A	50	13.07.2018	S-1B	2	1.01.2017	S-1B	50	7.06.2018	S-1A
3	7.01.2017	S-1B	51	6.08.2018	S-1B	3	13.01.2017	S-1B	51	19.06.2018	S-1A
4	19.01.2017	S-1B	52	18.08.2018	S-1B	4	25.01.2017	S-1B	52	1.07.2018	S-1A
5	31.01.2017	S-1B	53	30.08.2018	S-1B	5	6.02.2017	S-1B	53	13.07.2018	S-1A
6	12.02.2017	S-1B	54	11.09.2018	S-1B	6	18.02.2017	S-1B	54	25.07.2018	S-1A
7	24.02.2017	S-1B	55	5.10.2018	S-1B	7	2.03.2017	S-1B	55	6.08.2018	S-1A
8	8.03.2017	S-1B	56	17.10.2018	S-1B	8	14.03.2017	S-1B	56	18.08.2018	S-1A
9	20.03.2017	S-1B	57	29.10.2018	S-1B	9	20.03.2017	S-1A	57	30.08.2018	S-1A
10	1.04.2017	S-1B	58	10.11.2018	S-1B	10	13.04.2017	S-1A	58	11.09.2018	S-1A
11	13.04.2017	S-1B	59	22.11.2018	S-1B	11	25.04.2017	S-1A	59	23.09.2018	S-1A
12	25.04.2017	S-1B	60	4.12.2018	S-1B	12	7.05.2017	S-1A	60	5.10.2018	S-1A
13	7.05.2017	S-1B	61	16.12.2018	S-1B	13	13.05.2017	S-1B	61	11.10.2018	S-1B
14	19.05.2017	S-1B	62	22.12.2018	S-1A	14	25.05.2017	S-1B	62	23.10.2018	S-1B
15	31.05.2017	S-1B	63	3.01.2019	S-1A	15	6.06.2017	S-1B	63	4.11.2018	S-1B
16	12.06.2017	S-1B	64	9.01.2019	S-1B	16	18.06.2017	S-1B	64	16.11.2018	S-1B
17	24.06.2017	S-1B	65	21.01.2019	S-1B	17	30.06.2017	S-1B	65	28.11.2018	S-1B
18	6.07.2017	S-1B	66	2.02.2019	S-1B	18	12.07.2017	S-1B	66	4.12.2018	S-1A
19	18.07.2017	S-1B	67	8.02.2019	S-1A	19	24.07.2017	S-1B	67	22.12.2018	S-1B
20	30.07.2017	S-1B	68	14.02.2019	S-1B	20	30.07.2017	S-1A	68	15.01.2019	S-1B
21	23.08.2017	S-1B	69	26.02.2019	S-1B	21	17.08.2017	S-1B	69	27.01.2019	S-1B
22	4.09.2017	S-1B	70	10.03.2019	S-1B	22	29.08.2017	S-1B	70	8.02.2019	S-1B
23	16.09.2017	S-1B	71	22.03.2019	S-1B	23	22.09.2017	S-1B	71	4.03.2019	S-1B
24	28.09.2017	S-1B	72	3.04.2019	S-1B	24	4.10.2017	S-1B	72	16.03.2019	S-1B
25	10.10.2017	S-1B	73	15.04.2019	S-1B	25	10.10.2017	S-1A	73	28.03.2019	S-1B
26	22.10.2017	S-1B	74	27.04.2019	S-1B	26	22.10.2017	S-1A	74	9.04.2019	S-1B
27	3.11.2017	S-1B	75	9.05.2019	S-1B	27	28.10.2017	S-1B	75	21.04.2019	S-1B
28	15.11.2017	S-1B	76	21.05.2019	S-1B	28	9.11.2017	S-1B	76	27.04.2019	S-1A
29	27.11.2017	S-1B	77	2.06.2019	S-1B	29	15.11.2017	S-1A	77	9.05.2019	S-1A
30	9.12.2017	S-1B	78	20.06.2019	S-1A	30	21.11.2017	S-1B	78	21.05.2019	S-1A
31	21.12.2017	S-1B	79	2.07.2019	S-1A	31	3.12.2017	S-1B	79	2.06.2019	S-1A
32	2.01.2018	S-1B	80	8.07.2019	S-1B	32	15.12.2017	S-1B	80	8.06.2019	S-1B
33	14.01.2018	S-1B	81	14.07.2019	S-1A	33	27.12.2017	S-1B	81	20.06.2019	S-1B
34	20.01.2018	S-1A	82	26.07.2019	S-1A	34	2.01.2018	S-1A	82	2.07.2019	S-1B
35	26.01.2018	S-1B	83	7.08.2019	S-1A	35	14.01.2018	S-1A	83	14.07.2019	S-1B
36	7.02.2018	S-1B	84	13.08.2019	S-1B	36	20.01.2018	S-1B	84	26.07.2019	S-1B
37	25.02.2018	S-1A	85	25.08.2019	S-1B	37	26.01.2018	S-1A	85	7.08.2019	S-1B
38	3.03.2018	S-1B	86	18.09.2019	S-1B	38	1.02.2018	S-1B	86	19.08.2019	S-1B
39	15.03.2018	S-1B	87	12.10.2019	S-1B	39	13.02.2018	S-1B	87	31.08.2019	S-1B
40	27.03.2018	S-1B	88	24.10.2019	S-1B	40	25.02.2018	S-1B	88	18.09.2019	S-1A
41	8.04.2018	S-1B	89	30.10.2019	S-1A	41	9.03.2018	S-1B	89	12.10.2019	S-1A
42	20.04.2018	S-1B	90	5.12.2019	S-1A	42	21.03.2018	S-1B	90	30.10.2019	S-1B
43	2.05.2018	S-1B	91	17.12.2019	S-1A	43	27.03.2018	S-1A	91	11.11.2019	S-1B
44	14.05.2018	S-1B	92	29.12.2019	S-1A	44	8.04.2018	S-1A	92	29.11.2019	S-1A
45	26.05.2018	S-1B	93	10.01.2020	S-1A	45	20.04.2018	S-1A	93	11.12.2019	S-1A
46	7.06.2018	S-1B	94	22.01.2020	S-1A	46	26.04.2018	S-1B	94	4.01.2020	S-1A
47	19.06.2018	S-1B	95	28.01.2020	S-1B	47	8.05.2018	S-1B	95	16.01.2020	S-1A
48	25.06.2018	S-1A				48	20.05.2018	S-1B	96	28.01.2020	S-1A

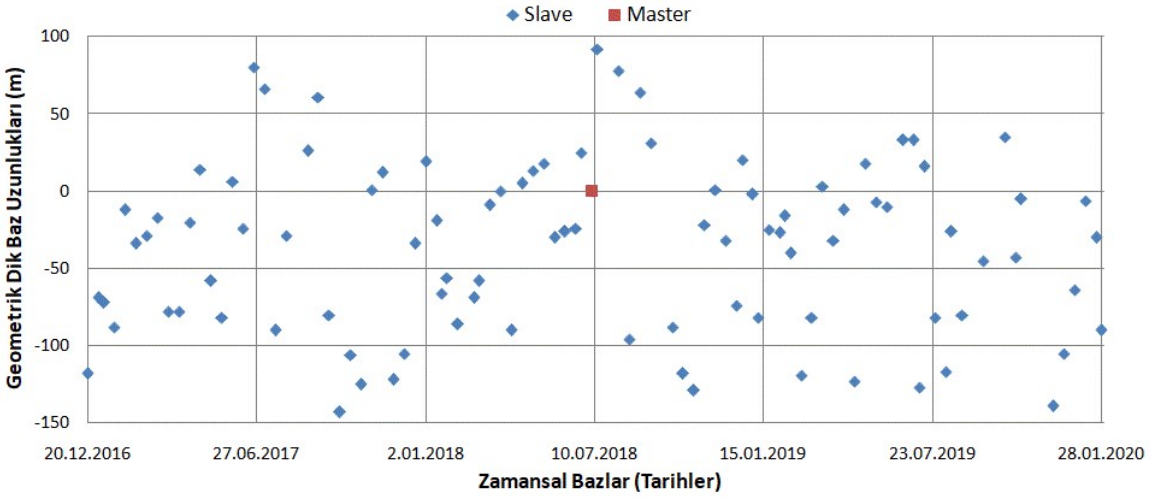
PSI tekniği uygulamalarında tek bir master ya da birincil görüntüye bağlı olarak, master-slave faz farklarını içeren toplam N+1 adet SAR görüntüsünden N adet interferogram görüntüsü oluşturulmaktadır. Bu nedenle master görüntünün tüm interferogramlardaki korelasyonu maksimum ya da korelasyonsuzluğu minimum yapan görüntü olarak seçilmesi gerekmektedir. Korelasyonun maksimum olabilmesi ise, daha önce birinci bölümde Eşitlik (1.25)'de ifade edildiği üzere, seçilen master ile slave görüntüler arasındaki geometrik dik baz uzunlukları, zamansal aralıklar ve doppler merkez kayıklıklarının minimum olmasına bağlıdır. SNAP yazılımında bu değerler ve Eşitlik (1.25)'de ifade edilen formül dikkate alınarak, "Radar" sekmesinin "interferometric" bölümünden "InSAR Stack Overview" operatörü kullanılarak, bir gurup görüntü içerisinden en uygun master görüntü seçilebilmektedir. Bu tez çalışmasında da SNAP yazılımından faydalanılarak 14.01.2018-28.01.2020 ve 20.12.2016-28.01.2020 tarih aralıklarında artan ve azalan yörüngeler için yapılan dört farklı değerlendirme için dört adet master görüntü seçilmiştir. 14.01.2018-28.01.2020 tarih aralığının artan ve azalan yörüngeleri için sırasıyla slave görüntüleme geometrileriyle olan geometrik dik bazları 176 ve 140 metreyi aşmayan 09.01.2019 tarihli S-1B ve 28.11.2018 tarihli S-1B görüntüleri master olarak seçilmiştir. 20.12.2016-28.01.2020 tarih aralığının artan ve azalan yörüngeleri için ise 143 ve 96 metrenin altında kalan dik bazların sağlandığı 07.07.2018 tarihli S-1A ve 01.07.2018 tarihli S-1A görüntüleri master olarak seçilmiştir. Seçilen master görüntüleri ile slave görüntüleri aralarındaki geometrik dik bazlar ile zamansal aralıkları gösteren Yıldız Grafikleri sırasıyla Şekil 14, Şekil 15, Şekil 16 ve Şekil 17'de gösterilmektedir.



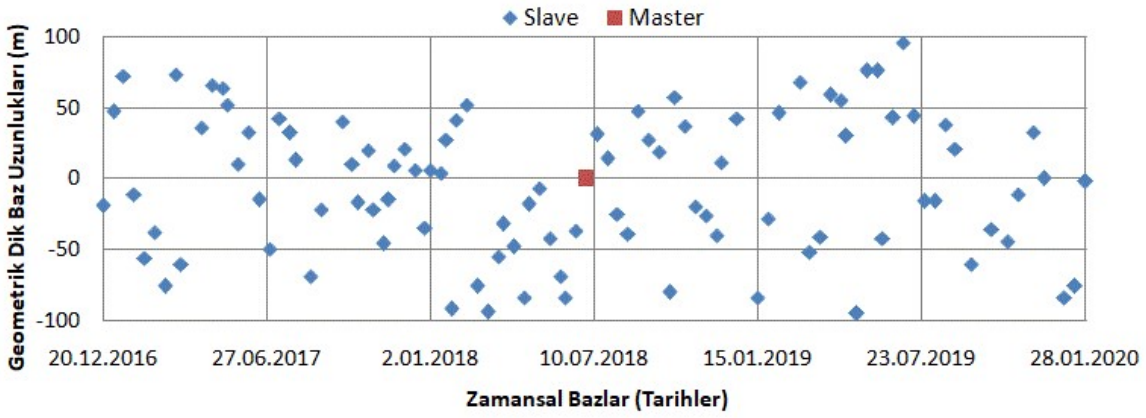
Şekil 14. 14.01.2018-28.01.2020 Aralığında artan yörünge yıldız grafiği



Şekil 15. 14.01.2018-28.01.2020 Aralığında azalan yörünge yıldız grafiği



Şekil 16. 20.12.2016-28.01.2020 Aralığında artan yörünge yıldız grafiği



Şekil 17. 20.12.2016-28.01.2020 Aralığında azalan yörünge yıldız grafiği

2.3.1.2. Görüntülerin Kırpılması ve Hassas Yörünge Bilgilerinin Eklenmesi

Üç alt şerit ve her bir alt şeritte de bir dizi patlamadan oluşan Sentinel-1 IW SLC SAR görüntüleri hem yeryüzünde (250kmx100km) hem de veri boyutu olarak (yaklaşık 4 GB) oldukça büyük alan kaplamaktadırlar. Yapılan çalışmalarda ihtiyaç duyulmadığı halde bu verilerin tamamının kullanılması bilgisayar-program çalışma performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle değerlendirmeye alınacak tüm görüntülerin yalnızca çalışma alanını içerecek şekilde alt şeritlere ve patlamalara (burstlere) ayrılarak kırpılması gerekmektedir. Bu işlem için SNAP yazılımının "TOPSAR-Split" operatöründen faydalanılır. Bu tez çalışmasında tek bir patlama görüntüsü tüm çalışma alanı ve referans noktasını içerdiğinden, tek bir patlama görüntüsü kullanılmıştır. Kırpma işleminden sonra, "Apply-Orbit-File" operatöründen faydalanılarak, Sentinel-1 için Hassas Yörünge Belirleme Servisi (Precise Orbit Determination (POD))'nin sağladığı hassas yörünge bilgileri her bir görüntü için girilmiştir.

2.3.1.3. Çakıştırılmış ve İnterferogramı Hesaplanmış Master-Slave Dizinlerinin Oluşturulması

Bu adımda bir önceki adımda kırpılmış ve hassas yörünge bilgileri eklenmiş olarak elde edilen veriler değerlendirmeye alınır. İlk olarak SNAP yazılımının "Back-Geocoding" operatöründen faydalanılarak tekli master-slave görüntü dizinleri (stack) oluşturulur. Oluşturulan tekli dizinlerde, master görüntü ile her bir slave görüntü üst üste çakıştırılarak her bir slave görüntünün master görüntü üzerine yeniden örneklenmesi sağlanır. Çakıştırma (coregistration) ya da eşleştirme işlemi ile görüntülerin piksel altı doğrulukta eşleştirilmesi sağlanır. Yeniden örnekleme (resampling) işleminde ise bir SYM verisi ile bir enterpolasyon yöntemi kullanılarak, slave görüntü üzerinde yer alan piksellerin kompleks faz ve genlik değerleri master görüntüdeki eşlenik konumları üzerinde yeniden hesaplanmaktadır. Bu çalışmada yeniden örnekleme işleminin daha hassas yapılabilmesi adına, genel olarak kullanılan 90 m çözünürlüğündeki 3 yay saniyesi aralıklı SRTM SYM verisi ve bilineer (bilinear) enterpolasyonu yöntemi yerine, daha hassas olan 30 m çözünürlüklü 1 yay saniyesi aralıklı SRTM SYM verisi ile kübik evrişim (cubic convolution) enterpolasyonu yöntemi kullanılmıştır. Back-Geocoding işleminden sonra, eğer çalışma alanı birden fazla patlama görüntüsü içeriyorsa, patlama görüntüleri

arasındaki menzil ve azimut yönlerindeki düzeltmeleri yaparak daha hassas bir eşleştirme yapılabilmesi için "Geliştirilmiş Spektral Çeşitlilik" (Enhanced-Spectral-Diversity (ESD)) operatörü kullanılmaktadır (Serco Italia, 2018). Fakat bu çalışmada tüm değerlendirmelerde yalnızca bir patlama görüntüsü kullanıldığından, bu işleme ihtiyaç duyulmamıştır.

Şekil 13'de de görülebildiği üzere, "TOPSAR-Deburst" operatörü Back-Geocoding ve Interferogram operatörleri ile yapılan işlemlerden sonra kullanılmaktadır. Bu operatör ile tüm radar patlama görüntülerinin birleştirildiği deburst işlemi yapılır. Çalışma alanının tek bir radar patlaması içerdiği uygulamalarda dahi, bu işlemin yapılması gerekir. Çünkü bu işlem yapılmadan veriler StaMPS yazılımına aktarılamamaktadırlar. Ayrıca patlama görüntüleri geniş alanlar içermektedirler. Eğer bu çalışmada olduğu gibi, gereksiz büyük veri kullanmamak ve sonraki uygulamalar için zamandan tasarruf etmek istenirse, "Spatial subset" komutuyla sadece çalışma bölgesini içeren yeterli boyutlardaki görüntü kümesini bu alandan kesip almadan önce, deburst işleminin yapılması gerekmektedir. Görüntü kümesi oluşturma işlemi üçüncü adımın sonunda çakıştırılmış ve interferogramı hesaplanmış görüntü dizinleri için yapılabilmektedir (Altintas ve Gokalp, 2021).

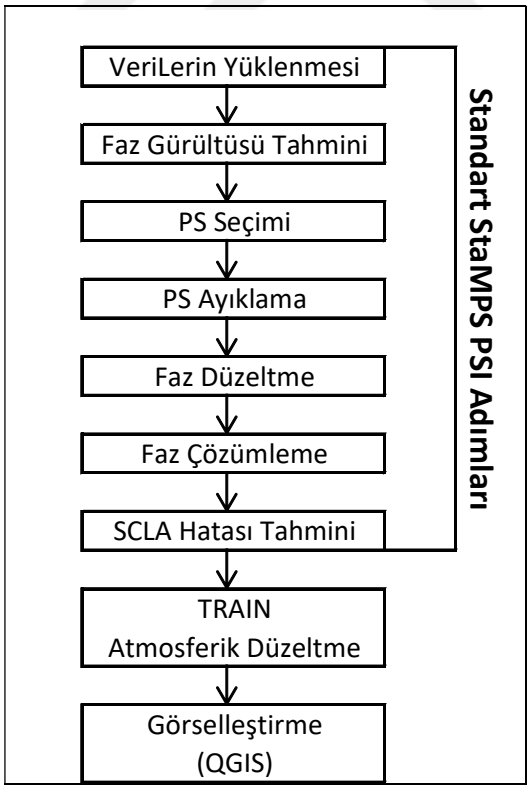
"Interferogram" operatöründe ise master ve slave görüntüler arasındaki faz farkları topoğrafik ve düz yeryüzü faz etkilerinden arındırılarak hesaplanır. Bu işlemde hassas bir topoğrafik faz çıkarımı yapabilmek için 3 yay saniyesi aralıklı SRTM verisi yerine daha hassas olan 30 m yersel çözünürlüğe sahip, 1 yay saniyesi aralıklı SRTM verisi kullanılmıştır. Bu operatör içerisinde ayrıca "Output Elevation" ve "Output Orthorectified Lat/Lon" seçenekleri seçilerek, yükseklik değerlerini içeren yükseklik bandı ile geometrik düzeltmeleri yapılmış enlem ve boylam bilgilerini içeren bantlar sonuç ürün içerisinde üretilmiştir. Böylelikle geleneksel geocoding işlemi uygulanarak, piksel koordinatları yer sabit koordinat sistemine dönüştürülmüştür. Şekil 13'de üçüncü adımda yer alan tüm işlemler gerçekleştirildikten sonra, tüm tekli master-slave dizinleri çakıştırılmış (Çk) ve çakıştırılarak interferogramı hesaplanmış (İfg) görüntü dizinleri olarak iki farklı şekilde elde edilmiştir.

2.3.1.4. Çk ve İfg Master-Slave Dizinlerinin StaMPS Yazılımına Aktarılması

Bu adımda Çk ve İfg master-slave dizinleri "Stamps Export" operatörü ya da komutu kullanılarak, StaMPS yazılımında değerlendirilebilecek formata dönüştürülmüştür.

2.3.2. StaMPS PSI Tekniği İşleme Adımları

Ön işleme adımları tamamlandıktan sonra, StaMPS PSI tekniği işlem adımları StaMPS/MTI 4.1b yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu yazılım Ubuntu gibi LINUX tipindeki ücretsiz işletim sistemlerinde MATLAB programı aracılığı ile çalışan bir yazılımdır. StaMPS yazılımı, faz çözümleme aşamasında entegre bir biçimde yararlandığı SNAPHU yazılımının içerisine yüklenmesini gerektirir. StaMPS yazılımında gerçekleştirilen PSI tekniği uygulamaları genel olarak 7+1 adımdan oluşur. Sekizinci adım kullanıcının isteğine bırakılmış atmosferik düzeltme adımıdır. Bu işlem StaMPS yazılımında bulunan filtreleme modeli şeklinde yapılabildiği gibi, atmosferik veri ve modellerin kullanıldığı daha gerçekçi yaklaşımlar ile de yapılabilmektedir. Atmosferik modelleme olarak TRAIN yazılımı tercih edilirse, bu yazılımın da entegre bir biçimde StaMPS yazılımı içerisine kurulması gerekmektedir. StaMPS tekniği uygulamalarının sonunda verilerin görselleştirilmesi için ise QGIS yazılımından faydalanılmıştır. StaMPS yazılımında gerçekleştirilen işlem adımları kısa başlıklar halinde Şekil 18'de gösterilmiştir.



Şekil 18. StaMPS PSI tekniği işleme adımları şeması

StaMPS yazılımı ilk olarak kullanılan işletim sitemindeki komut penceresine yazılan kod ile çalışmaya başlatılır ve sonrasında açılan MATLAB penceresi içerisinde gerekli kodlar yazılarak StaMPS PSI tekniğine ait işlem adımları gerçekleştirilir. Bu işlem adımları ile ilgili kodlara ve detaylı açıklamalara StaMPS yazılım klavuzundan (Hooper vd., 2018) ulaşılabilinir.

StaMPS yazılımının çalıştırılması için yazılan ilk kod içerisinde, bu tez çalışmasının birinci bölümde Eşitlik (1.28) ile değinilen ve kullanıcı isteğine bağlı olarak seçilebilen ya da değiştirilebilen Genlik Dağılım İndeksi (D_A) değeri yer almaktadır. Bir piksel üzerindeki tüm interferogramlar boyunca elde edilen genlik değerlerinin standart sapmasının ortalamasına oranını ifade eden bu değer, başlangıçtaki PS piksel adaylarının seçimindeki piksel sayısının azaltılmasını sağlayan bir eşik değeridir. Bu değerin düşük tutulması özellikle geniş çalışma alanlarında bilgisayar bellek gereksinimlerini azaltıcı ve işlem sürecini hızlandıran önemli bir etkiye sahiptir (Sousa vd., 2011). Fakat bu çalışmada olduğu gibi küçük ve heterojen deforme olan alanlarda bu değerin yüksek tutulması, daha fazla PS noktası üretilerek, bölgedeki deformasyon olgusunun daha iyi anlaşılabilmesini sağlamaktadır (Altintas ve Gokalp, 2021). Bu nedenle bu tez çalışmasında bu eşik değeri, StaMPS PSI tekniğinde standart olarak seçilen "0.4" değeri yerine (Hooper vd., 2007, 2018), "0.6" olarak seçilmiştir ve böylelikle hem artan hem de azalan yörünge verileri ile yapılan değerlendirmelerde çalışma alanı üzerinde yaklaşık üç kat daha fazla PS noktası elde edilmiştir.

StaMPS yazılımı Genlik Dağılım İndeksi eşik değeri tanımlanarak çalıştırıldıktan sonra, yazılımda standart olarak uygulanan birinci ile yedinci adım arasındaki adımlar MATLAB yazılımında gerçekleştirilir. Bu adımlar paragraflar halinde aşağıda sıralanmıştır.

Birinci adımda tüm veriler PS işleme için gerekli formatlara dönüştürülerek MATLAB çalışma alanında saklanır.

İkinci adımda tüm interferogramlardaki her bir aday pikselin faz gürültüsü çeşitli ön parametrelere bağlı olarak iteratif bir biçimde tahmin edilir. Ön parametre değerlerinden biri olan maksimum iterasyon sayısı standart olarak üçtür fakat istenirse kullanıcı tarafından değiştirilebilir. Bu adımda piksel faz merkezinin menzil yönündeki kayıklığından kaynaklanan korelasyonsuz SYM hatası için ön parametre olarak belli bir eşik değer (standart olarak 5 m) kullanılır ve bu hatayı aşan pikseller sonraki adımda PS olarak seçilmez. Diğer parametre değerleri ise genel olarak PS adayı piksellerin

gürültülerinin tahmin edilerek konumsal korelasyonlu fazını belirlemek için kullanılan alçak geçişli filtre ile kombine edilmiş adaptif filtrelerinin boyutları ve PS seçimindeki ağırlıklandırma yöntemleriyle ilgilidir. Ağırlıklandırma yöntemi olarak, birinci bölümde de bahsedildiği üzere, "SNR" değerine göre yapılan ağırlıklandırmaya nazaran daha fazla PS noktasının elde edilebildiği (Hooper vd., 2007) ve yazılımda standart olarak kullanılan "PS olma olasılığı" yöntemi kullanılmıştır. Bu adımda tüm parametre değerleri yazılım kılavuzunda standart olarak belirtilen değerler olarak kullanılmıştır.

Faz gürültüsü tahmininden sonra gerçekleştirilen üçüncü adımda, PS pikselleri gürültü özelliklerine göre seçilirler.

Dördüncü adımda, üçüncü adımda PS olarak seçilen piksellerin bir kısmının düşürülerek ayıklaması yapılır. Bu adımda düşürülerek PS kümesinden çıkartılan pikseller, etraflarında bulunan komşu piksellerden gelen sinyal katkılarından dolayı çok gürültülü olarak kabul edilen piksellerdir. Bu işlemde tüm piksellerin faz gürültülerinin tüm interferogramlar boyunca elde edilen standart sapmaları hesaplanılarak, standart sapması belirlenen eşik değerden büyük olan PS pikselleri elimine edilirler.

Beşinci adımda PS olarak seçilen piksellerin sarılı ya da çözümlenmemiş fazı, konumsal olarak korelasyonsuz bakış açısı (Spatially Uncorrelated Look Angle (SULA)) ya da SYM hatası terimi için düzeltilir. Başka bir deyişle SULA hatası giderilir. Eğer çalışma alanı büyüklüğünden dolayı tek bir parça (patch) olarak değil de, parçalar halinde incelenmiş ise, bu adımın sonunda bu parçalar birleştirilir. Bu adımın sonunda sarılı faz görüntülenebilmektedir.

Altıncı adımda faz çözümlemesi aşaması gerçekleştirilir. Faz çözümleme yöntemi olarak, Hooper (2006), Hooper ve Zebker (2007) ve Hooper (2010) tarafından geliştirilen üç boyutlu faz çözümleme yöntemi kullanılır. Bu aşamada ayrıca yazılım kullanım kılavuzunda da önerildiği gibi, faz çözümlemesinden önce gürültüyü azaltmak için bir ön filtre olarak Goldstein filtresi kullanılmıştır.

Yedinci adımda, neredeyse tamamı SYM'nin kendi içerisindeki ve radar koordinatlarına yanlış eşleştirilmesindeki hataları içeren konumsal korelasyonlu SYM hatasından kaynaklanan, konumsal olarak korelasyonlu bakış açısı (Spatially Correlated Look Angle (SCLA)) hatası hesaplanır. Bununla birlikte master görüntüye ait atmosfer ve yörünge hatası (AOE) fazı aynı anda tahmin edilir (Hooper vd., 2018).

Altıncı adımda uygulanan faz çözümleme aşamasının doğruluğu uzun dik bazlardan etkilenir. SCLA hataları da daha büyük dik bazlara sahip interferogramlarda daha büyük

olmaktadır. Genel olarak 200 metrenin altında kısa dik baz uzunlukları ile görüntüleme geometrisi sağlayan Sentinel-1 uydu misyonu bu bakımdan büyük avantaj sağlar. Fakat yine de, daha yüksek doğrulukta bir faz çözümlemesi yaparak daha hassas sonuçlar elde etmek için, özellikle SCLA ve AOE hatalarının faz çözümleme aşamasından önce toplam fazdan çıkarılarak giderilmesi gerekmektedir. Bu sayede elde edilen yer değiştirme hız tahminlerinin de doğruluğu artacaktır. Bu nedenle, yedinci adım gerçekleştirildikten sonra, bu tez çalışmasında da uygulandığı gibi altıncı ve yedinci adımların ikinci bir kez tekrar gerçekleştirilmesi önerilmektedir (Hooper vd., 2013, 2018; Canaslan, 2016).

StaMPS PSI tekniğinin standart olarak uygulanan ilk yedi adımı gerçekleştirildikten sonra, yüzey değişimlerinin doğru tespit edebilmesi adına, herhangi bir lokal deformasyona uğramayan, stabilitesi yüksek bir noktanın tüm ölçülerin dayandırıldığı bir referans noktası olarak seçilmesi gerekmektedir. Bunun için lokal stabilitesi yüksek TRBN TUSAGA istasyonu sabit ya da referans noktası olarak seçilerek, tüm PS noktalarının LOS doğrultusundaki yüzey değişimlerinin yıllık ortalama hız değerleri bu referans noktasına bağlı olarak belirlenmiştir.

Referans noktası seçilerek elde edilen yüzey değişimlerinin LOS doğrultusundaki hız değerlerine, StaMPS işlemenin sekizinci ve son adımı olarak, TRAIN yazılımının lineer troposferik düzeltme modeli kullanılarak atmosferik düzeltme getirilmiştir. Bu adımda atmosferik faz etkisini azaltmak için yüksek çözünürlüklü Avrupa Orta Menzilli Hava Tahminleri Merkezi (ECMWF) verileri ile sürekli GPS troposferik gecikme tahminlerinin entegrasyonundan oluşan GACOS verileri kullanılmıştır (Yu vd., 2018a, 2018b). GACOS verilerine ücretsiz olarak http://www.gacos.net/ internet adresinden, edinilmek istenen atmosferik verinin konumuna ait kuzey-güney enlemleri, doğu-batı boylamları ile UTC saati ve verilerin gönderilmesi istenilen e-mail adresi girilerek erişilebilmektedir.

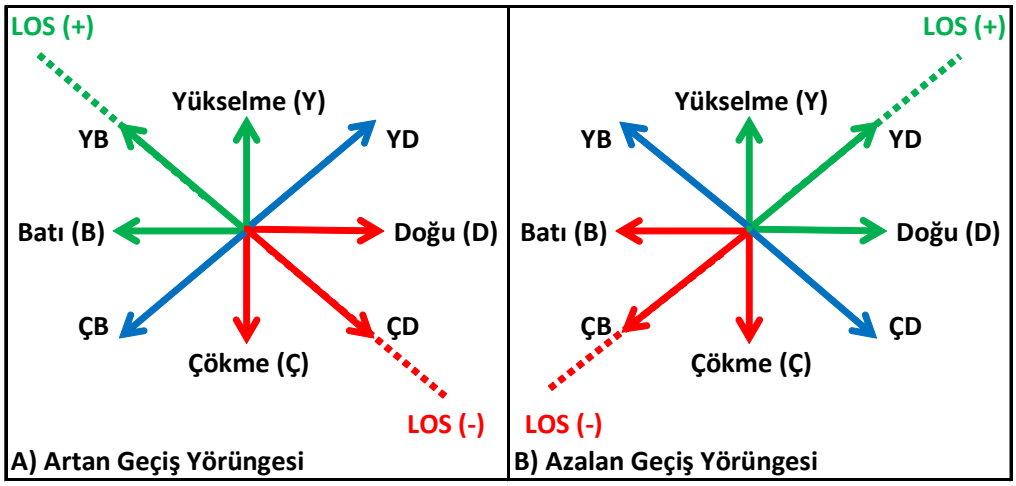
Atmosferik düzeltmeleri de içeren tüm StaMPS işlem adımları tamamlandıktan sonra, sonuç olarak elde edilen hız değerlerinin görselleştirilmesi için QGIS 3.14 yazılımından faydalanılmıştır.

StaMPS PSI tekniği uygulamalarında ölçülerin duyarlılığını genel olarak etkileyen üç etken bulunmaktadır. Bunlar; görüntü sayısının yeterli miktarda olmaması ya da az olması, zamansal korelasyonsuzluk sebebiyle seçilen PS noktalarının stabil olmaması ve PS noktalarının seçilen referans noktasına olan uzaklığının fazla olması şeklinde sıralanabilir (Hooper vd., 2007; Canaslan, 2016). Dolayısıyla kullanılan görüntü sayısı arttıkça ve PS noktaları hareketsiz olarak seçilen referans noktasına yaklaştıkça hassasiyet artmaktadır.

Bu tez çalışmasında oldukça fazla sayıda görüntü miktarı ile çalışma alanına yakın ve güvenilir bir sabit nokta seçilerek, doğruluğu nivelman ölçüleri ile yapılan karşılaştırmalar ile onaylanan, yüksek hassasiyette sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar Bulgular ve İrdelemelerin anlatılacağı üçüncü bölümde açıklanacaktır.

2.3.3. Artan ve Azalan LOS Hız Verilerinin Kombinasyonu

SAR görüntüleri uydu radar anteni ile yeryüzündeki yansıtıcı objeler arasında bulunan ve LOS doğrultusu olarak adlandırılan eğik menzil geometrisi üzerinde tanımlanan verilerden oluşur. Bu verilerin değerlendirilmesi ile yeryüzünde meydana gelen yüzey değişimlerine ilişkin yıllık ortalama hız değerleri tek boyutlu LOS doğrultusu üzerinde elde edilirler. Başka bir deyişle, LOS hız değerleri yeryüzünde meydana gelen yatay ve düşey yüzey değişimlerinin uydunun eğik menzil geometrisi üzerindeki bileşkesidirler. LOS doğrultusu üzerindeki + ve – işaretli hız değerleri, sırasıyla uyduya yaklaşma ve uydudan uzaklaşma hareketleri olarak ifade edilirler. Artan ve Azalan olmak üzere, farklı geçiş yörüngeleri farklı LOS doğrultularına sahiptirler. Bu nedenle çökme ve yükselme gibi yalnızca düşey eksen üzerinde meydana gelen yüzey hareketleri haricinde kalan, yatay ve yatay+düşey hareket kombinasyonları gibi diğer hareketler farklı geçiş yörüngelerinde farklı algılanırlar. Şekil 19, düşey (yükselme-çökme), yatay (D-B) ve yatay+düşey hareketlerin artan ve azalan geçiş yörüngelerinde nasıl algılandıklarını göstermektedir.



Şekil 19. Artan ve azalan geçiş yörüngelerine göre algılanan hareketler

Şekil 19'da yeşil ve kırmızı oklar ile gösterilen yer hareketleri sırasıyla LOS geometrisi üzerinde uyduya yaklaşma ve uydudan uzaklaşma olarak ifade edilen + ve – işaretli yönlerdeki hareketleri göstermektedir. Mavi oklar ise, hareket yönleri nedeniyle LOS geometrisi üzerinde iyi bir biçimde algılanamayan ve bu nedenle LOS doğrultusu üzerinde olduğundan daha küçük ve 0'a yakın değerler ile gözlemlenen hareketleri temsil etmektedir. Mavi oklar ile gösterilen hareketlerin LOS ekseni üzerindeki hareket yönleri, LOS ekseni ile yaptıkları açılara bağlı olarak + veya – işaretli olabilmektedir. Artan ve azalan yörüngelerde aynı işaret ve benzer şiddetlerde algılanan hareketlerin yalnızca düşey eksen üzerinde meydana gelen ve sırasıyla LOS eksenine + ve – yönlerde etki eden yükselme (Y) ve çökme (Ç) hareketleri olduğu görülebilmektedir. Bu nedenle çalışma alanında yalnızca düşey hareket varsa ya da yatay hareket düşeye nazaran ihmal edilebilecek kadar küçükse, bu durumda artan ve azalan yörüngelerde benzer sonuçlar elde edilebilmektedir. Fakat diğer yatay (D-B) ve yatay+düşey hareketlerin bileşkeleri şeklinde meydana gelen hareketler (YB (Yükselme+Batı), YD (Yükselme+Doğu), ÇB (Çökme+Batı), ÇD (Çökme+Doğu)) incelendiğinde, bu hareketlerin artan ve azalan geçiş geometrilerindeki LOS doğrultularında farklı işaretlerde ve büyüklüklerde algılandıkları görülebilmektedir. Genel olarak artan yörünge üzerinde + LOS yönünde etki eden Y, B, YB ve – LOS yönünde etki eden Ç, D, ÇD hareketleri iyi bir şekilde gözlemlenebilirken, azalan yörünge üzerinde ise + LOS yönünde etki eden Y, D, YD ve – LOS yönünde etki eden Ç, B, ÇB hareketleri iyi bir şekilde gözlemlenebilmektedir. LOS geometrisi üzerinde tek boyutlu bir bileşke vektör olarak gözlemlenebilen ve gözlemlenemeyen tüm bu yüzey hareketlerinin yatay ve düşey bileşenlerine ayrıştırılarak elde edilebilmesi için, artan ve azalan yörüngelerden elde edilen LOS doğrultusundaki hız değerlerinin kombine edilmesi gerekmektedir.

Artan ve azalan LOS hız verilerinin kombinasyonu için, bu verilerin aynı zaman periyodu içerisinde elde edilen ve aynı konuma ait veriler olması gerekmektedir (Fuhrmann ve Garthwaite, 2019). Her iki yörüngede de elde edilen PS noktaları genellikle farklı konumlarda bulunduklarından, bunların belli bir konumda eşleştirilebilmesi için enterpole edilmeleri gerekir. Bu aşamada SAGA GIS 2.3.2 yazılımında bulunan ve birçok InSAR çalışmasında (Caro Cuenca vd., 2011; Fuhrmann vd., 2015; Fuhrmann ve Garthwaite, 2019; Yazici ve Gormus, 2022) tercih edilen Ordinary Kriging enterpolasyon yönteminden faydalanılmıştır. Kriging, değeri bilinmeyen noktaların değerini tahmin etmek için, bu noktaları çevreleyen ve değerleri bilinen diğer noktalardan ağırlıkları

oranında faydalanan bir enterpolasyon yöntemidir. Bu yöntemde kullanılan ağırlıklar, değeri bilinen noktaların tahmini yapılacak olan noktalara olan uzaklıklarına göre belirlenmektedir. Yakınlarda bulunan noktaların ağırlıkları ve tahmine olan etkisi daha büyük olmaktadır (Tural, 2011; Yazici ve Gormus, 2022). Kriging yönteminde kullanılan temel eşitlik, N_P, tahmin edilecek noktanın değeri; N_i, tahmin edilecek nokta değerlerinin hesaplanmasında kullanılacak bilinen nokta değerleri; n, modeli oluşturan nokta sayısı ve P_i, bilinen noktaların ağırlık değerleri olmak üzere, Eşitlik (2.27)'de verilmiştir (Yaprak ve Arslan, 2008).

$$N_P = \sum_{i=1}^{n} P_i N_i \tag{2.27}$$

InSAR çalışmalarında yapılacak enterpolasyon işleminin doğruluğu PS nokta yoğunluğuna bağlıdır. Nokta yoğunluğu arttıkça, kestirilecek noktaların tahmin doğrulukları da artar. Özellikle bu çalışmadaki gibi değişken deforme olan alanlarda farklı yörüngelerden elde edilen sonuçlarda PS nokta yoğunluğunun yüksek olması, yatay ve düşey hız kestirimlerinin doğru yapılabilmesi açısından oldukça önemlidir.

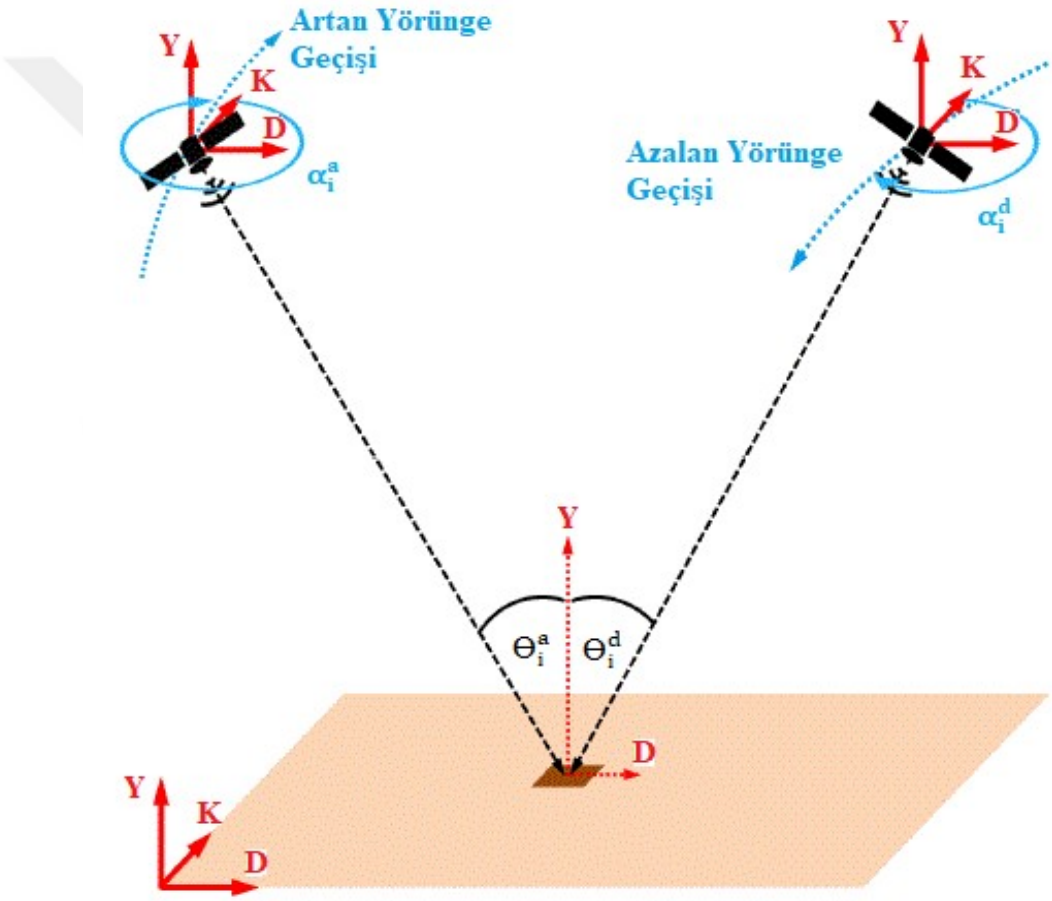
Artan ve azalan yörüngelerdeki PS noktalarının LOS hız değerlerinin enterpolasyon işlemi tamamlandıktan sonra, bunların kombinasyonu yapılarak yatay ve düşey hız bileşenleri elde edilir. Bunun için ilk olarak LOS hız vektörünün yatay ve düşey bileşenleri cinsinden ifade edilmesi gerekir. Bir LOS hız vektörü (V_{LOS}), sırasıyla V_D ve V_K Doğu-Batı ve Kuzey-Güney eksenleri üzerindeki yatay hız bileşenleri ve V_Y, Yukarı ya da düşey eksen üzerindeki hız bileşeni olmak üzere, üç boyutlu hız vektörlerinin bir bileşkesidir. Bu değer, α_i, master görüntüleme geometrisine göre belirlenen uydunun uçuş ya da azimut yönünün kuzey ekseni ile yapmış olduğu azimut yönü (heading) açısı ve Θ_i, radar ışınının belirlenen konum için geliş açısı olmak üzere, Eşitlik (2.28)'deki gibi elde edilir (Fialko vd., 2001; Hanssen, 2001; Motagh vd., 2017; Fuhrmann ve Garthwaite, 2019).

$$V_{LOS} = -\sin\Theta_i \cos\alpha_i V_D + \sin\Theta_i \sin\alpha_i V_K + \cos\Theta_i V_Y \tag{2.28}$$

Eşitlik (2.28)'de verilen denklem, kombinasyonun yapılabilmesi için, hem artan hem de azalan yörüngeler cinsinden tek bir formül olarak matris gösterimi şeklinde ifade edilirse, a ve d işaretleri sırasıyla artan ve azalan geçiş yörüngeleri için olan değerleri göstermek üzere, Eşitlik (2.29)'da verilen denklem elde edilir.

$$\begin{pmatrix} V_{LOS}^{a} \\ V_{LOS}^{d} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\Theta_i^a \cos\alpha_i^a & \sin\Theta_i^a \sin\alpha_i^a & \cos\Theta_i^a \\ -\sin\Theta_i^d \cos\alpha_i^d & \sin\Theta_i^d \sin\alpha_i^d & \cos\Theta_i^d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_D \\ V_K \\ V_Y \end{pmatrix} \quad (2.29)$$

Y, yukarı ya da düşey eksen; D, doğu-batı ekseni ve K, kuzey-güney eksenini ifade etmek üzere, artan ve azalan yörünge verilerinin kombinasyonu için, bunlara ait görüntüleme geometrileri ile gerekli diğer veriler ($\Theta_i^a, \Theta_i^d, \alpha_i^a, \alpha_i^d$) Şekil 20'de gösterilmiştir (Fuhrmann ve Garthwaite, 2019).



Şekil 20. Artan ve azalan görüntüleme geometrileri (Fuhrmann ve Garthwaite, 2019'dan değiştirilerek)

Artan ve azalan yörüngeler için Eşitlik (2.29) ile verilen denklemler yazılarak çözüldüğünde, V_D ve V_Y hızları elde edilebilmektedir. Bunun için Microsoft Exel yazılımından faydalanılmıştır. Fakat V_K genellikle çözülemez veya 0 olarak elde edilir. Bunun nedeni SAR uydu sistemlerinin yakın kutupsal yörüngeleri nedeni ile LOS

doğrultusunda elde ettikleri ölçülerinin, kuzey-güney ekseni üzerindeki hareket bileşenine karşı düşük hassasiyetli olmasından kaynaklanmaktadır (Aslan vd., 2019; Fuhrmann ve Garthwaite, 2019; Motagh vd., 2017; Fuhrmann vd., 2015; Wright vd., 2004). Ayrıca kuzey-güney bileşeninin çarpan katsayısını oluşturan ifade ($\sin\Theta_i \sin\alpha_i$) ile elde edilen değer, diğer hareket bileşenlerinin çarpanlarına nazaran çok daha küçüktür. Bu nedenle bu eksen üzerindeki hareketler LOS ölçülerini çok küçük miktarlarda etkilerler. Örnek vermek gerekirse; bu tez çalışmasında V_Y ve V_D bileşenlerinin çarpanları sırasıyla, artan ve azalan yörüngeler üzerinde yaklaşık olarak 0.75-0.74 ile 0.65-0.66 arasında elde edilirken, V_K bileşeninin çarpanı ise her iki yörünge için de 0.11 olarak elde edilmiştir. Buna göre V_K hareket bileşeninin LOS ölçülerine olan etkisinin, toplamda 1.51'lik çarpan katsayısı içerisinde 0.11'lik değeri ile yaklaşık %7 oranında olduğu görülebilmektedir. Düşey eksen üzerindeki V_Y bileşeninin ise LOS ölçülerine yaklaşık %50 oranında katkı sağladığı görülmektedir. V_K bileşeni, hem artan ve azalan kombinasyonundan elde edilemediği, hem de LOS geometrisine olan düşük katkısından dolayı ihmal edilirse, Eşitlik (2.29)'da verilen denklem Eşitlik (2.30)'da ki gibi yazılabilir (Aslan vd., 2019; Motagh vd., 2017).

$$\begin{pmatrix} V_{Los}^{a} \\ V_{Los}^{d} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\Theta_i^{a}\cos\alpha_i^{a} & \cos\Theta_i^{a} \\ -\sin\Theta_i^{d}\cos\alpha_i^{d} & \cos\Theta_i^{d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_D \\ V_Y \end{pmatrix} \tag{2.30}$$

2.3.4. Artan, Azalan ve Nivelman Verilerinin Kombinasyonu

LOS ölçülerinin kuzey-güney yönlerindeki hareketi belirleme duyarlılığı kötü olduğundan, genellikle, yalnızca aynı uydu misyonuna ait artan ve azalan yörüngeleri içeren iki farklı görüntüleme geometrisi ile V_K hız bileşeni elde edilemez. Bu hız bileşeninin elde edebilmesi için, en az üç veya daha fazla sayıdaki farklı görüntüleme geometrileri ile elde edilen LOS hızlarının kombinasyonundan faydalanılabileceği gibi (Hu vd., 2014; Fuhrmann ve Garthwaite, 2019), artan ve azalan yörüngelerdeki InSAR verilerinin nivelman veya GNSS gibi farklı grup jeodezik ölçüler ile kombinasyonundan da faydalanılabilir (Hu vd., 2011; Samsonov ve Tiampo, 2006; Catalao vd., 2011; Caro Cuenca vd., 2011; Fuhrmann vd., 2015). Bu tez çalışmasında ise hassas nivelman ölçülerinden elde edilen hız değerlerinden faydalanılmıştır.

Artan, azalan LOS hızları ile düşey nivelman hız değerlerinin kombinasyonunda Eşitlik (2.29)'dan faydalanılarak ve bu denklem içerisindeki V_Y değerleri yerine nivelman hız değerleri konularak, V_D ve V_K hız bileşenleri artan ve azalan InSAR ölçülerinden elde edilir. InSAR ölçülerinin V_K hız bileşenini belirlemeye yönelik hassasiyetinin düşük olmasından dolayı, V_K değerleri bu kombinasyonun sonucunda, V_D ve ikili artan+azalan kombinasyonu sonucunda elde edilen V_Y değerlerine nazaran daha düşük hassasiyette elde edilirler (Fuhrmann vd., 2015).

3. BULGULAR VE İRDELEMELER

Bu bölümde sırasıyla hassas nivelman ölçüleri ve PSI yöntemiyle elde edilen sonuçlar açıklanacak ve bölgenin deformasyonu açısından yorumlanacaktır.

3.1. Hassas Nivelman Ölçüleri ile Düşey Hızların Belirlenmesi ve İrdelenmesi

Hem PSI yöntemi ile elde edilen düşey hız değerleri ile karşılaştırma yapılabilmesi, hem de artan ve azalan yörünge LOS hızları ile kombinasyon yapılarak V_K hız vektörlerinin elde edilebilmesi için, nivelman noktalarındaki düşey yüzey değişimlerinin yıllık ortalama hız değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Bunun için, Y_i ve Y_j, aynı nivelman noktasına ait sırasıyla i. ve j. periyotlarda elde edilen yükseklik değerlerini; ΔY_{ij}, j. ve i. periyotlar arasındaki yükseklik farkını; t_i ve t_j, sırasıyla i. ve j. periyotlardaki ortalama tarihleri ve Δt_{ij}, j. ve i. periyotların ortalama tarihleri arasındaki yıl birimindeki zamansal farkı ifade etmek üzere, nivelman ölçülerinden hesaplanan düşey yıllık ortalama hız değerleri (V_y) Eşitlik (3.1)'deki gibi elde edilmiştir.

$$V_y = \frac{\Delta Y_{ij}}{\Delta t_{ij}} = \frac{Y_s - Y_i}{t_s - t_i} \tag{3.1}$$

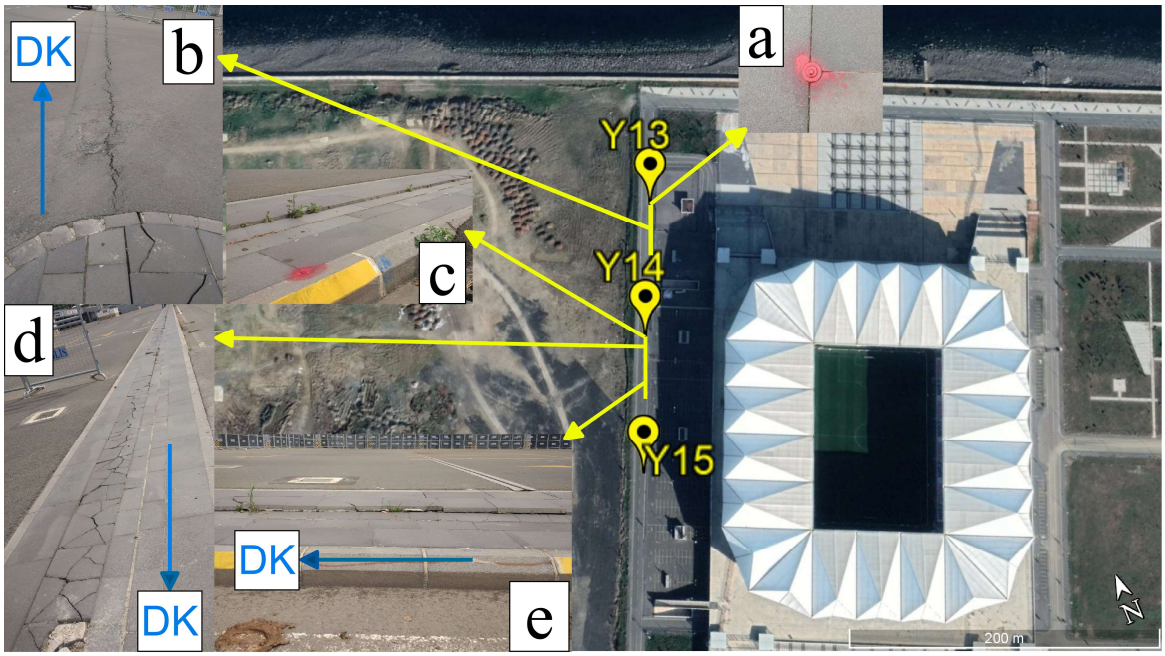
Eşitlik (3.1)'de hesaba katılan ortalama tarihler, ölçülerin gerçekleştirildiği periyotlardaki ilk ve son tarihlerin ortalamalarını ifade etmektedir. Ölçülerin gerçekleştirildiği beş periyottaki ortalama tarihler sırasıyla; 19.01.2018, 12.07.2018, 09.02.2019, 11.07.2019, 28.01.2020 olarak elde edilmiştir. Buna göre Eşitlik (3.1) hesabı ile nivelman noktalarında tüm periyotlar arasında milimetre/yıl (mm/y) biriminde elde edilen düşey yıllık hız değerleri Tablo 15'de gösterilmektedir.

Tablo 15. Nivelman ölçülerinden elde edilen periyodik düşey yıllık hızlar (mm/y)

N.No	Per 1-2	Per 1-3	Per 1-4	Per 1-5	Per 2-3	Per 2-4	Per 2-5	Per 3-4	Per 3-5	Per 4-5
S1	0.0	-0.1	-0.1	0.0	-0.2	-0.2	0.0	-0.2	0.1	0.4
F1	-1.7	-0.9	-1.9	-1.4	-0.3	-2.0	-1.4	-4.3	-2.0	-0.2
Y17	-0.6	0.4	-1.0	-0.5	1.2	-1.2	-0.5	-4.6	-1.4	0.9
Y16	-0.4	-3.3	-4.4	-5.1	-5.7	-6.3	-6.5	-7.2	-7.0	-6.9
Y15	2.5	-0.6	-1.0	-2.0	-3.1	-2.7	-3.4	-2.2	-3.5	-4.5
Y14	-1.9	-6.9	-8.0	-9.3	-11.0	-10.9	-11.6	-10.8	-11.9	-12.7
Y13	-5.9	-10.0	-9.9	-11.1	-13.4	-11.8	-12.7	-9.6	-12.2	-14.2
B1	-2.9	-3.6	-3.6	-3.6	-4.1	-3.9	-3.8	-3.6	-3.6	-3.6
B2	-1.5	-3.2	-3.3	-3.5	-4.6	-4.1	-4.1	-3.4	-3.8	-4.2
B3	-1.3	-3.5	-3.5	-3.8	-5.3	-4.6	-4.6	-3.6	-4.1	-4.5
B4	-1.3	-3.8	-4.0	-3.9	-5.9	-5.3	-4.7	-4.6	-4.0	-3.6
Y33	-2.9	-3.3	-4.1	-3.8	-3.6	-4.7	-4.0	-6.2	-4.2	-2.7
Y32	-3.1	-2.9	-3.5	-3.5	-2.8	-3.7	-3.6	-5.0	-4.0	-3.3
Y31	-1.3	-1.0	-1.8	-1.7	-0.9	-2.1	-1.8	-3.8	-2.4	-1.3
Y21	3.6	-0.2	0.1	-0.9	-3.3	-1.5	-2.3	1.0	-1.7	-3.6
Y20	0.2	0.1	-0.4	-0.7	0.0	-0.7	-1.0	-1.7	-1.7	-1.6
Y19	1.3	0.5	0.1	-0.2	-0.2	-0.4	-0.7	-0.7	-1.0	-1.3
Y18	0.4	0.2	-0.8	-0.7	0.0	-1.4	-1.1	-3.4	-1.8	-0.5
Y22	-0.2	-1.5	-1.9	-1.9	-2.6	-2.7	-2.5	-2.9	-2.4	-2.0
Y23	1.5	0.2	-0.5	-0.3	-0.9	-1.4	-0.8	-2.2	-0.8	0.2
Y25	2.1	-1.0	-0.9	-1.1	-3.6	-2.3	-2.1	-0.5	-1.2	-1.8
Y34	0.4	-0.6	-1.2	-0.8	-1.4	-2.0	-1.2	-2.9	-1.0	0.4
Y35	-1.7	-2.6	-3.1	-2.6	-3.4	-3.7	-2.8	-4.1	-2.5	-1.3
Y36	-1.9	-2.7	-2.6	-2.8	-3.4	-3.0	-3.0	-2.4	-2.8	-3.1
D26	-1.0	-3.4	-3.1	-3.7	-5.3	-4.1	-4.5	-2.4	-3.9	-5.1
B7	-1.9	-3.7	-3.7	-3.9	-5.2	-4.5	-4.5	-3.6	-4.0	-4.4
D30	-1.3	-3.6	-3.4	-3.7	-5.5	-4.4	-4.4	-2.9	-3.7	-4.4
B6	-1.7	-3.3	-3.5	-3.5	-4.6	-4.4	-4.0	-4.1	-3.6	-3.3
B5	-2.1	-3.7	-4.2	-4.1	-5.0	-5.2	-4.7	-5.5	-4.4	-3.6
D25	0.4	-2.5	-2.1	-2.6	-4.8	-3.3	-3.6	-1.2	-2.8	-4.0
A023	0.4	-2.5	-2.3	-2.6	-4.8	-3.6	-3.5	-1.9	-2.7	-3.3
B8	-0.4	-2.7	-2.5	-2.3	-4.6	-3.5	-2.9	-1.9	-1.9	-1.8
R22	0.2	-2.5	-2.4	-2.1	-4.6	-3.6	-2.8	-2.2	-1.7	-1.3
A20	0.2	-2.1	-1.9	-1.5	-4.0	-2.9	-2.1	-1.4	-0.9	-0.5
A23	0.8	-1.1	-0.8	-0.7	-2.8	-1.6	-1.2	0.0	-0.2	-0.4
Y1	-0.4	-1.7	-1.6	-1.2	-2.8	-2.2	-1.4	-1.4	-0.6	0.0
Y30	-2.1	-3.2	-3.1	-2.5	-4.1	-3.5	-2.6	-2.6	-1.7	-0.9
Y29	0.2	-1.6	-1.5	-1.2	-3.1	-2.3	-1.6	-1.2	-0.7	-0.4
Y28	0.4	-1.0	-1.0	-0.5	-2.2	-1.7	-0.8	-1.0	0.1	0.9
Y26	1.5	0.1	0.1	0.3	-1.0	-0.5	0.0	0.2	0.6	0.9
S2	1.0	-0.2	-0.1	0.6	-1.2	-0.7	0.5	0.0	1.6	2.7

Tablo 15'den görülebildiği üzere, alandaki yüzey değişimleri genellikle aşağı ya da – yönde çökme şeklinde meydana gelmiştir. Özellikle yeşil renk ile taralı yaklaşık bir ve iki yıllık zaman aralığını içeren 1-3, 3-5 ve 1-5 periyot ölçülerinden elde edilen düşey hız değerlerine bakıldığında, bunların büyük çoğunluğunun çökme şeklinde olduğu görülebilmektedir. Yükselme görülen az sayıdaki noktalarda ise genellikle ilk periyot ölçüleri arasında (Per 1-2 ve Per 1-3) küçük oranlarda yükselme olduğu, sonraki devam eden periyotlarda ise çökme olduğu görülebilmektedir. Bu kısa süreli yükselme gösteren az sayıdaki noktalar ise stadın batısında bulunan Y_{15} ile Y_{19}, Y_{21}, Y_{23}, Y_{25} ve Y_{26} gibi

genellikle stadın ve alanın denizden uzak olan güney kısmında yer alan noktalardır. Per 1-5 arasında elde edilen düşey hızlara bakıldığında, genel olarak denize daha yakın olan ve bu nedenle daha fazla dolgu malzemesi kullanılarak doldurulan bölgelerde yer alan noktalarda, denize uzak olan noktalara nazaran daha büyük oranlarda çökmeler olduğu görülebilmektedir. Alanda en fazla deforme olan ya da çöken noktalar kırmızı renk ile gösterilen, stadyumun kuzey batısında bulunan Y_{13} ve Y_{14} noktaları olmuştur. Sarı renk ile gösterilen ve deniz duvarı üzerinde bulunan nivelman noktaları ise, denize daha yakın konumda bulunmalarına rağmen, sağlam beton zemin üzerinde tesis edildiklerinden, kaldırım üzerinde tesis edilen diğer noktalara nazaran genellikle daha düşük oranlı ve periyotlar arası daha dengeli ya da stabil bir biçimde çökme göstermişlerdir. Noktaların geneline bakıldığında, 1-3 periyotları arasında birinci yılda görülen çökme oranlarının, 3-5 periyotları arasındaki ikinci yılda görülenlerden daha küçük olduğu, başka bir deyişle zamanla noktalardaki çökme oranlarının arttığı görülebilmektedir. Bu artışın en fazla gözlemlendiği noktalar, -2.2 mm/y ile -5 mm/y arasındaki artış oranları ile kaldırım zemin üzerinde tesis edilen ve stadyumun yakınlarında bulunan Y_{13}, Y_{14}, Y_{15} ve Y_{16} noktaları olmuştur. Alanda, zeminde oluşan çatlaklar ve çökmeler ile gözle görülebilir biçimde en fazla deforme olan bölgeler Y_{13}, Y_{14} ve Y_{15} noktaları arasında gözlemlenmiştir. Bu bölgeler Google Earth görüntüsü üzerinde Şekil 21'de gösterilmiştir.



Şekil 21. Dolgu sahasında DK (deniz kenarı) yönüne göre gözlemlenen çatlak ve çöküntüler

3.2. StaMPS PSI Yöntemiyle Elde Edilen Bulgular ve İrdelemeleri

Bu bölümde iki farklı tarih aralığında yapılan değerlendirmelerin sonuçları irdelemeleriyle birlikte açıklanacaktır. İlk olarak nivelman ölçülerinin de gerçekleştirildiği, yaklaşık olarak son iki yılı kapsayan 14.01.2018 - 28.01.2020 tarih aralığındaki değerlendirme sonuçları verilecektir. Sonrasında ise Spor kompleksi ve stadyumun açılışı ile nivelman ölçülerinin bittiği tarihi kapsayan ve yaklaşık üç yıllık süreyi içeren 20.12.2016 – 28.01.2020 tarih aralığındaki değerlendirme sonuçları verilecektir.

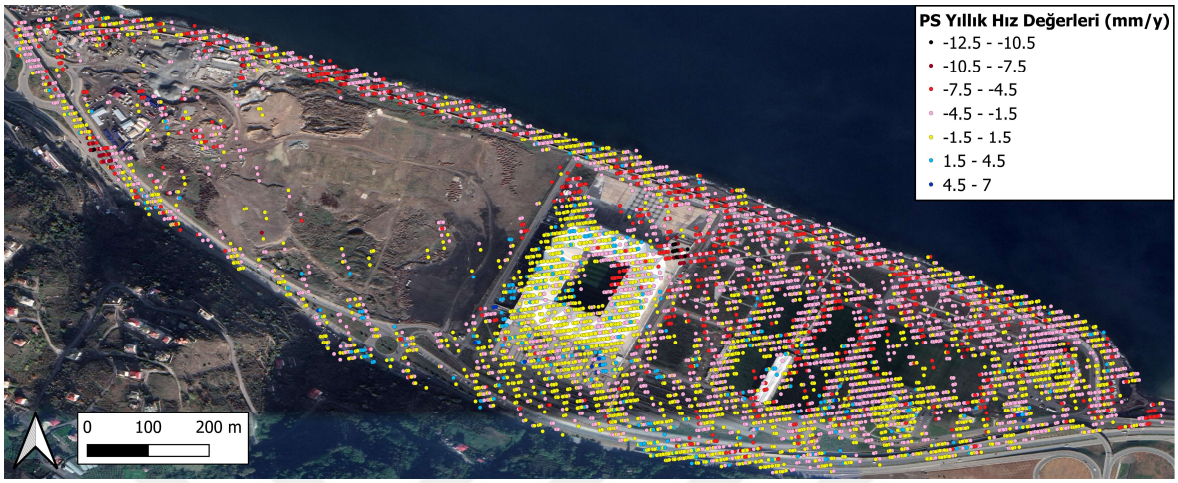
3.2.1. 14.01.2018-28.01.2020 (İki Yıllık) Sonuçlar ve İrdelemeler

14.01.2018-28.01.2020 tarih aralığındaki son iki yılı kapsayan değerlendirmeler genel olarak nivelman ölçülerinden elde edilen hız değerleri ile yapılan karşılaştırma ve kombinasyonları içermektedir. Daha detaylı açıklarsak, bu değerlendirmeler artan ve azalan yörüngelerden elde edilen PS noktalarına ait yıllık ortalama hız değerlerini ve standart sapmalarını, artan ve azalan LOS hızlarının enterpolasyon haritalarını, artan+azalan verilerinin kombinasyonu sonucunda nivelman noktaları üzerinde elde edilen yatay (D-B) ve düşey hız değerlerini ve nivelman ölçülerinden elde edilen hız değerleri ile karşılaştırmalarını ve son olarak da artan+azalan+nivelman üçlü veri kombinasyonu ile nivelman noktalarında elde edilen K-G yatay hız bileşenlerini ve tüm bu sonuçlar ile ilgili irdelemeleri içermektedir.

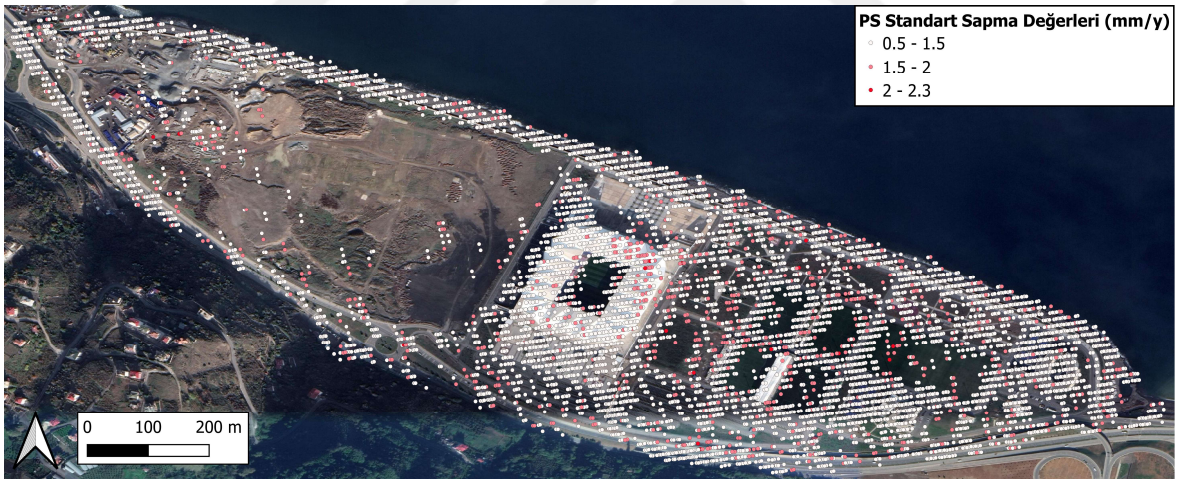
3.2.1.1. Artan Yörünge Sonuçları ve İrdelemeleri

Uygulamada yaklaşık 12 gün aralıklı, VV düşey polarizasyonlu ve 43 numaralı aynı yörünge yolu ya da izi üzerindeki toplam 63 adet Sentinel-1 IW SLC SAR görüntüsü kullanılmıştır. En büyük geometrik bazın 176 metreyi geçmediği ve görüntüler arasındaki en yüksek korelasyonun sağlandığı 09.01.2019 tarihli S-1B görüntüsü master seçilerek, toplamda 62 adet interferogram görüntüsü elde edilmiştir. 62 adet interferogramın StaMPS PSI tekniği ile değerlendirilmesi sonucunda, 0.76 km^2 genişliğindeki dolgu sahası üzerinde yaklaşık 5630 adet PS noktası (km^2 başına 7408 PS noktası) ve bu noktalara ait yüzey değişimleri LOS doğrultusu üzerinde -12.5 mm/y ile 7 mm/y arasında değişen yıllık hız

değerleri olarak elde edilmiştir (Şekil 22). Bu LOS hızlarının hassasiyetlerini ifade eden standart sapma değerleri ise 0.5 mm/y ile 2.3 mm/y arasında elde edilmiştir (Şekil 23).



Şekil 22. 14.01.2018-28.01.2020 Artan PS LOS hızları (mm/y)



Şekil 23. 14.01.2018-28.01.2020 Artan PS LOS hızlarının standart sapmaları (mm/y)

Şekil 22'de dolgu sahasını çevreleyen PS noktaları yıllık hız değerleri ile birlikte gösterilmiştir. Burada yer alan – ve + işaretler sırasıyla PS noktalarının LOS doğrultusu üzerindeki uydudan uzaklaşma ve uyduya yaklaşma hareket yönlerini ifade etmektedir. Genel olarak – yönlü hareketli noktalar kırmızı, + yönlü hareketli noktalar mavi ve diğer noktalara nispeten daha hareketsiz olan ya da -1.5 mm/y ile +1.5 mm/y arasında 0'a yakın hız değerleri alan noktalar ise sarı renk ile gösterilmişlerdir. Negatif yönlü hareket eden noktaların hız değer skalası büyükten küçüğe doğru sırasıyla siyah (-12.5 mm/y ile -10.5

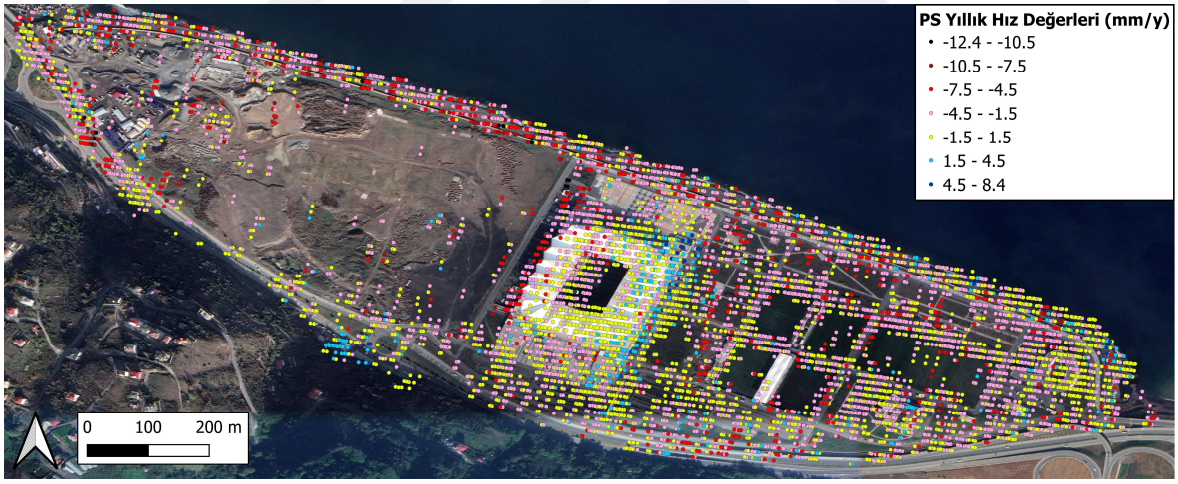
mm/y arasında), bordo (-10.5 mm/y ile -7.5 mm/y arasında), kırmızı (-7.5 mm/y ile -4.5 mm/y arasında) ve pembe (-4.5 mm/y ile -1.5 mm/y arasında) renkler ile ifade edilirken, pozitif yönlü hareketlerin ise renk skalası küçükten büyüğe doğru sırasıyla açık mavi (1.5 mm/y ile 4.5 mm/y arasında) ve koyu mavi (4.5 mm ile 7 mm/y arasında) renkler ile ifade edilmiştir. Şekil 22 genel olarak incelendiğinde, – yönlü hareketli nokta sayısının + yönlülerden fazla olduğu, en fazla yoğunlukta olan noktaların, 0'a yakın değerler alan sarı ve – yöndeki en küçük hareketi ifade eden pembe noktalar olduğu, en az sayıdaki noktaların ise en yüksek – yönlü hareketi ifade eden siyah renkli noktalar olduğu görülebilmektedir. Şekil 23'de ise PS noktalarının yıllık hız değerlerine ait standart sapma değerleri küçükten büyüğe doğru beyaz (0.5 mm/y – 1.5 mm/y), pembe (1.5 mm/y – 2 mm/y) ve kırmızı (2 mm/y – 2.3 mm/y) renkler ile gösterilmiştir. Noktaların çoğunun 1.5 mm/y değerinin altında bir standart sapmaya sahip olduğu görülebilmektedir. Dolgu sahasında yer alan tüm PS noktalarının standart sapma değerlerinin ortalaması ise 1.2 mm/y olarak elde edilmiştir.

Çalışma alanını oluşturan dolgu sahası, Şekil 22'de görülebildiği ve ikinci bölümde de bahsedildiği üzere, sol tarafında yer alan boş dolgu sahası ile sağ tarafında yer alan spor kompleksi alanlarını içermektedir. İnsan yapımı betonarme yapıların yoğunluğu sebebiyle, spor kompleksinin yer aldığı tarafta yapılaşmamış diğer boş alana nazaran çok daha fazla sayıda PS noktası elde edildiği görülebilmektedir. Spor kompleksi alanına bakıldığında, çok kısa mesafelerdeki birbirine çok yakın noktalarda dahi çok değişken ya da heterojen deformasyon oranları görülebilmektedir. Bunun sebebi spor kompleksinin deniz duvarı, asfalt, çim, farklı tiplerde betonarme kaldırımlar, binalar ve membran gibi zaman içerisinde farklı deforme olabilecek farklı türden birçok yapıyı içermesi ve bu yapıların düşük performanslı dolgu malzemesine sahip (Bektaş, 2019) bir dolgu sahası üzerinde yer almasından kaynaklanmaktadır (Altintas ve Gokalp, 2021). Alanda birbirine en yakın mesafelerdeki en değişken deformasyon oranlarının ise stadyumun üzerini kaplayan membran üzerinde olduğu görülebilmektedir. Bunun nedeni ise membranın güçlü bir rüzgarın etkisindeyken bile hareket edebilen hafif bir malzemeye sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Alanda en stabil ya da düşük oranlı ve homojen bir biçimde deforme olan yapının dolgu sahasının kuzeyinde yer alan ve genel olarak pembe noktalarla çevrili deniz duvarı olduğu görülebilmektedir. En yüksek yer değişim oranları ise stadyumun kuzey doğusundaki giriş kısmında ve bu bölümde yer alan merdivenlerin üzerinde siyah,

bordo ve kırmızı noktalar olarak, kuzeyinde ve kuzey batısında ise kırmızı noktalar olarak gözlemlenmiştir.

3.2.1.2. Azalan Yörünge Sonuçları ve İrdelemeleri

Uygulamada genellikle 12 gün aralıklı, VV düşey polarizasyonlu ve 123 numaralı aynı yörünge yolu üzerindeki toplam 62 adet Sentinel-1 SAR görüntüsü kullanılmıştır. En büyük geometrik bazın 140 metreyi geçmediği ve görüntüler arasındaki en yüksek korelasyonun sağlandığı 28.11.2018 tarihli S-1B görüntüsü master seçilerek, toplamda 61 adet interferogram görüntüsü elde edilmiştir. 61 adet interferogramın StaMPS PSI tekniği ile değerlendirilmesi sonucunda, dolgu sahası üzerinde yaklaşık 5820 adet PS noktası (km^2 başına 7658 PS noktası) ve bu noktalara ait yüzey değişimleri LOS doğrultusu üzerinde -12.4 mm/y ile 8.4 mm/y arasında değişen yıllık hız değerleri ile elde edilmiştir (Şekil 24).

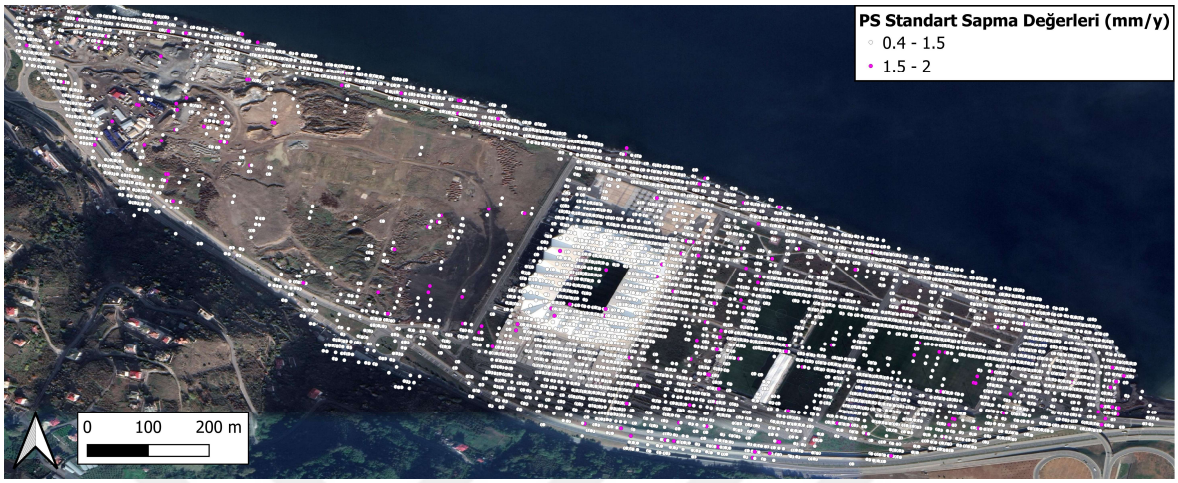


Şekil 24. 14.01.2018-28.01.2020 Azalan PS LOS hızları (mm/y)

Şekil 24'de azalan LOS hız değerlerinin renk skalası, Şekil 22'de gösterilen artan LOS değerlerininki ile neredeyse aynıdır. Aralarındaki tek farklılık artan ve azalan LOS hızlarının en büyük ve en küçük değerlerinin farklı olmasından kaynaklı, Şekil 24'de siyah (-12.4 mm/y ile -10.5 mm/y arasında) ve koyu mavi (4.5 mm/y ile 8.4 mm/y arasında) renkler ile gösterilen noktaların Şekil 22'den biraz farklı değer aralıklarını temsil etmesidir.

Şekil 24'de gösterilen LOS hızlarının standart sapma değerleri ise, çoğunluğu 1.5 mm/y değerinin altında olmak ve ortalamaları 1 mm/y olmak üzere, 0.4 mm/y ile 2 mm/y

arasında elde edilmiş ve Şekil 25'de beyaz (0.4 mm/y – 1.5 mm/y) ve pembe (1.5 mm/y – 2 mm/y) renk tonları ile gösterilmiştir.



Şekil 25. 14.01.2018-28.01.2020 Azalan PS LOS hızlarının standart sapmaları (mm/y)

Şekil 24 incelendiğinde, – yönlü hareketli nokta sayısının + yönlülerden fazla olduğu, en fazla yoğunlukta olan noktaların pembe ve sarı noktalar olduğu, en az sayıdaki noktaların ise siyah renkli noktalar olduğu görülebilmektedir. Azalan sonuçlarda da artan yörüngede olduğu gibi dolgu sahasının sağ tarafında bulunan spor kompleksi alanında, insan yapımı yapıların yoğunluğu nedeniyle, sol taraftaki boş yapılaşmamış alana nazaran çok daha fazla sayıda PS noktası elde edilmiştir. Azalan sonuçlarda da birbirine çok yakın mesafelerdeki noktalarda, özellikle membran üzerinde yer alan PS noktalarında heterojen yer değiştirme oranları elde edilmiştir. Yine artan yörüngeden elde edilen sonuçlarda olduğu gibi, azalan yörüngede de benzer şekilde en stabil deforme olan yapının genel olarak pembe noktalar ile çevrili deniz duvarı olduğu görülmüştür. Artan yörüngeden farklı olarak ise, en büyük yer değiştirme oranları siyah, bordo ve kırmızı noktalar olarak stadyumun kuzeybatısında gözlemlenmiştir. Bunun haricinde özellikle stadyumun batı ve kuzeydoğu kısımlarında her iki yörüngeden elde edilen hız değerlerinde işaret (-,+) değişiklerine varan büyük oranlarda farklılıklar görülmektedir. Bunun nedeni, ikinci bölümde de değinildiği üzere, yatay (D-B) hareketin ya da yatay hareketin büyüklüğüne bağlı olarak, yatay ve düşey hareketlerin bileşkesi olarak gerçekleşen hareketin artan ve azalan yörüngelerde farklı işaret veya yönlerde algılanması ya da geçiş yörüngelerinin birinde iyi bir biçimde algılanamayarak 0'a yakın değerler almasından kaynaklanmaktadır.

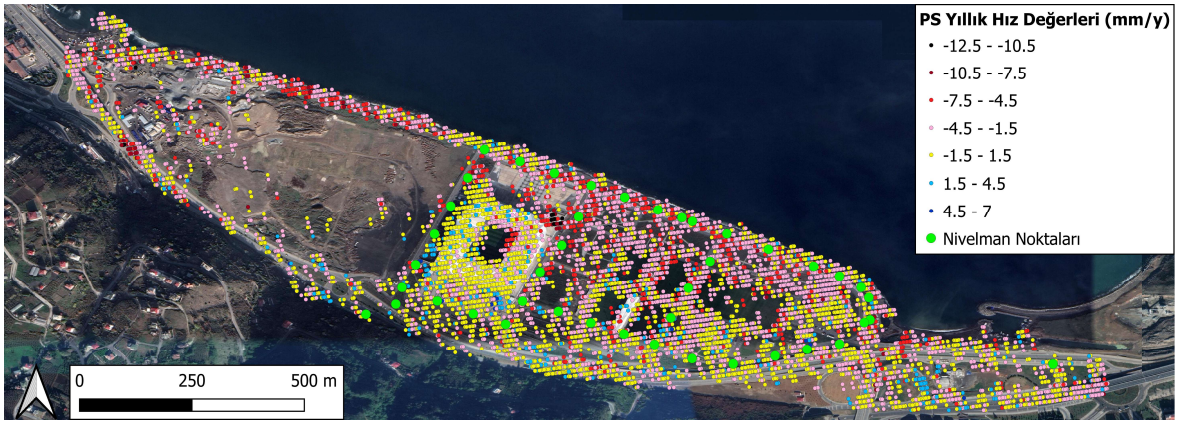
Bununla birlikte Şekil 21'de gösterilen stadyumun kuzeybatı ve batı kısımlarında Y_{13}, Y_{14} ve Y_{15} noktalarının civarında bulunan, dolgu sahasındaki gözle görülebilen en büyük çatlak ve çöküntülerin yer aldığı bölgelerdeki deformasyonların, yörünge geometrisi daha uygun olduğundan, azalan yörünge sonuçları ile daha iyi resmedildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca azalan yörüngede artan yörüngeye nispeten daha yüksek yoğunlukta PS noktaları elde edilmiştir. Bu nedenlerden dolayı, azalan geometrinin bu alan için, artan geometriye nazaran bölgeyle daha uyumlu daha iyi sonuçlar verdiği söylenebilir. Artan ve azalan yörüngelerden elde edilen sonuçlardaki farklılıklar 3 yıllık verilerin değerlendirmelerinde zaman serileri ile birlikte daha detaylı gösterilecektir.

3.2.1.3. Artan+Azalan Kombinasyonu ve Nivelman Hızları ile Karşılaştırılması

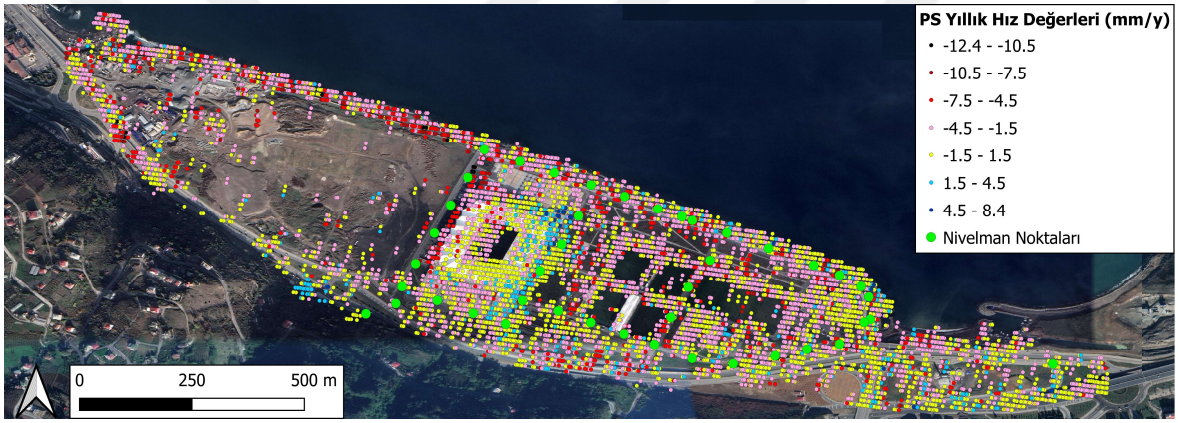
14.01.2018-28.01.2020 tarih aralığında yapılan değerlendirmeler genel olarak, nivelman ölçülerinden elde edilen düşey yıllık hız değerleri ile karşılaştırma ve kombine edilme amaçlıdır. Bu nedenle, bu bölümde yalnızca nivelman nokta konumlarındaki InSAR verilerinden türetilen yatay (D-B) ve düşey hız vektörlerinin elde edilme ve nivelman ölçülerinden elde edilen hız değerleri ile karşılaştırılma süreci açıklanacaktır. Tüm dolgu sahasındaki yatay (D-B) ve düşey hız vektörleri ise 3 yıllık değerlendirmelerin sonuçlarında verilecektir.

Nivelman nokta konumlarındaki düşey yıllık hız vektörlerinin artan ve azalan yıllık LOS hız verilerinden türetilebilmesi için, öncelikle her iki yörünge LOS verilerinin de nivelman nokta konumlarına enterpole edilmesi gerekmektedir. Bunun için, hem dolgu sahası içinde hem de dışında yer alan tüm obje ve sabit noktaları çevreleyecek PS nokta kümelerinin enterpolasyonda kullanılması gerekir. Şekil 26 ve Şekil 27'de enterpolasyon için kullanılan sırasıyla artan ve azalan yörüngelerden elde edilen PS noktaları, LOS hız değerleri ve nivelman nokta konumları ile birlikte gösterilmiştir.

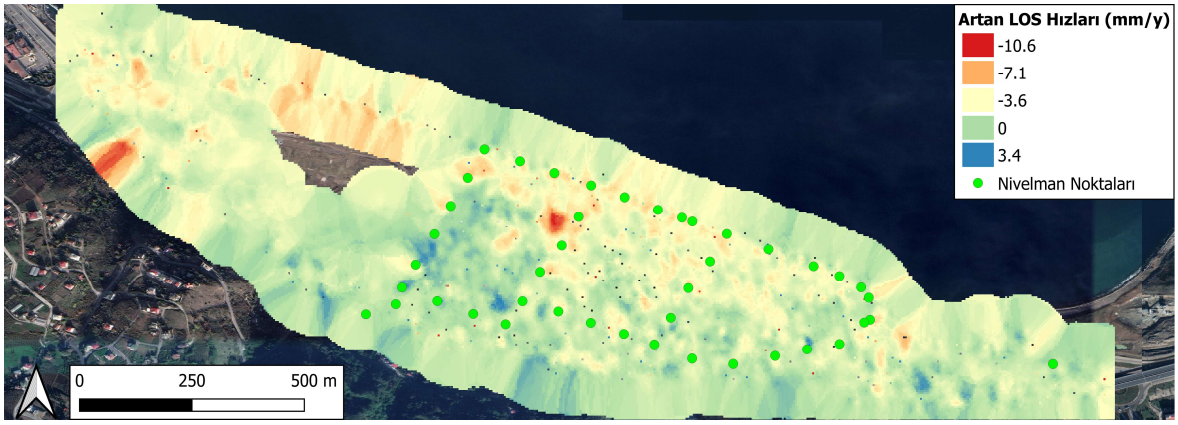
Şekil 26 ve Şekil 27'de yer alan artan ve azalan PS nokta kümelerinin LOS hız değerlerinin enterpolasyonları sonucunda elde edilen artan ve azalan LOS yıllık hız enterpolasyon haritaları sırasıyla Şekil 28 ve Şekil 29'da gösterilmiştir.



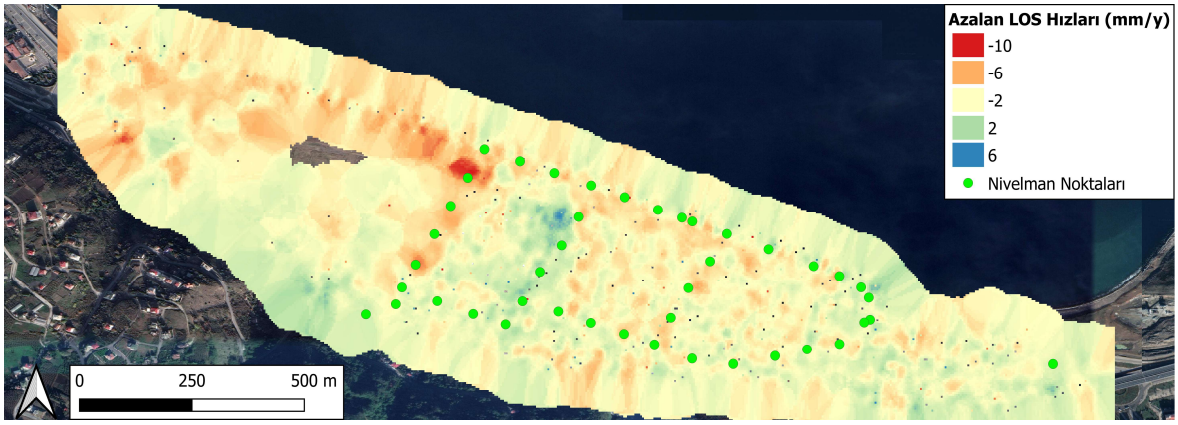
Şekil 26. 14.01.2018-28.01.2020 Enterpolasyonda kullanılan artan yörünge PS noktalarının LOS hız değerleri ve nivelman noktaları konumları ile gösterimi



Şekil 27. 14.01.2018-28.01.2020 Enterpolasyonda kullanılan azalan yörünge PS noktalarının LOS hız değerleri ve nivelman noktaları konumları ile gösterimi



Şekil 28. Artan yörünge LOS hızları enterpolasyon haritası (mm/y)



Şekil 29. Azalan yörünge LOS Hızları enterpolasyon haritası (mm/y)

Şekil 28 ve Şekil 29'da verilen enterpolasyon haritalarından ve ikinci bölümde artan ve azalan yörüngeler için Eşitlik (2.30) ile verilen V_{LOS} kombinasyon denkleminden faydalanılarak kombinasyon gerçekleştirilmiştir. Bu denklemde kullanılan master görüntüleme geometrilerine ait azimut yönü (heading) açıları (α_i) artan yörünge için 350.21135 derece ya da 6.1123 radyan, azalan yörünge için ise 189.70455 derece ya da 3.3110 radyan olarak elde edilmiştir. Aynı denklemdeki geliş açısı (Θ_i) değerleri ise artan yörünge için 41.06961 derece veya 0.7168 radyan, azalan yörünge için ise 42.05510 derece veya 0.7340 radyan olarak kullanılmıştır. α_i değerleri aynı geçiş yörüngesi üzerinde elde edilen tüm PS noktaları için aynı iken, Θ_i değerleri ise tüm PS noktaları için farklıdır. Fakat bu farklılıklar, özellikle deformasyon oranlarının genel olarak santimetre ve altı büyüklüklerde seyrettiği bu tez çalışmasındaki gibi oldukça küçük alanlarda, sonuçları etkileyemeyecek kadar küçüktür. Örnek vermek gerekirse, dolgu sahasının en batı ve doğu kısmında bulunan PS noktalarının Θ_i değerini kullanmak yerine, dolgu sahasının yaklaşık ortasında bulunan bir PS noktasının Θ_i değeri kullanıldığında, -12.5 mm/y değerindeki en büyük LOS hızının düşey hız vektörüne dönüştürülmesinde, her iki geçiş yörüngesinde de maksimum $\pm$ 0.003 mm/y hata yapıldığı ve bu değişikliğin sonuçları etkilemediği görülmüştür. Bu nedenle işlem kolaylığı ve pratikliği açısından kombinasyon yapılırken, artan ve azalan yörüngelerde, tüm noktalar için açı değerlerini teker teker hesaba katmak yerine, dolgu sahasının yaklaşık olarak ortasına denk gelen PS noktalarına ait Θ_i değerleri kullanılmıştır.

Aşağıda yer alan Tablo 16'da nivelman nokta konumları üzerinde StaMPS PSI tekniği ile elde edilen artan ve azalan yıllık LOS hız verileri ve bunların hesaba katılması ile elde edilen düşey (V_Y) ve yatay (V_D) yıllık ortalama hız değerleri gösterilmiştir. Tabloda

ayrıca nivelman ölçülerinden elde edilen düşey yıllık hız değerleri (V_y) ile yapılan karşılaştırmalar, iki veri grubu arasındaki farklar ile birlikte gösterilmiştir.

Tablo 16. StaMPS V_D V_Y hızları ve nivelman (V_y) hızları ile karşılaştırılması

	LOS Hızları (mm/y)		PS Mesafesi (m)		StaMPS (mm/y)		Nivelman	Nivelman - StaMPS
NN	Artan	Azalan	Artan	Azalan	VD	VY	Vy (mm/y)	Vy-VY (mm/y)
B1	-1	-4.5	-	-	-2.7	-3.7	-3.6	0.1
B2	-5	-3.5	-	-	1.1	-5.7	-3.5	2.2
B3	-5	-2	8.0	-	2.3	-4.7	-3.8	0.9
B4	-4.3	-2.1	-	-	1.6	-4.3	-3.9	0.4
B5	-4	-2.4	-	-	1.2	-4.3	-4.1	0.2
B6	-3.8	-1.7	-	-	1.6	-3.7	-3.5	0.2
B7	-4.3	-4.2	-	-	0.0	-5.7	-3.9	1.8
B8	-4.1	-1.2	-	-	2.2	-3.6	-2.3	1.3
D25	-3.6	-1.1	0.6	-	1.9	-3.2	-2.6	0.6
D26	-3.9	-1.6	-	-	1.7	-3.7	-3.7	0.0
D30	-3.4	-2.1	0.5	-	1.0	-3.7	-3.7	0.0
A023	-3	0.4	-	-	2.6	-1.8	-2.6	-0.8
R22	-1.1	0.1	-	-	0.9	-0.7	-2.1	-1.4
A23	-1.2	-0.3	-	2.9	0.7	-1.0	-0.7	0.3
A20	-2	-0.7	-	-	1.0	-1.8	-1.5	0.3
Y1	-2	-1	-	-	0.7	-2.0	-1.2	0.8
Y13	-6.4	-7.2	3.4	-	-0.7	-9.1	-11.1	-2.0
Y14	-3.1	-4.5	-	-	-1.1	-5.1	-9.3	-4.2
Y15	-0.4	-3.7	-	-	-2.5	-2.7	-2.0	0.7
Y16	-2.5	-6.6	-	-	-3.2	-6.1	-5.1	1.0
Y17	2.3	-1	-	-	-2.5	0.9	-0.5	-1.4
Y18	0.6	-2.1	-	-	-2.1	-1.0	-0.7	0.3
Y19	-0.4	-0.5	6.3	7.3	-0.1	-0.6	-0.2	0.4
Y20	-1.3	-0.3	-	3.2	0.8	-1.1	-0.7	0.4
Y21	-1.1	-1	-	-	0.1	-1.4	-0.9	0.5
Y22	-2.9	-1.3	-	-	1.2	-2.8	-1.9	0.9
Y23	-1	-1.4	-	-	-0.3	-1.6	-0.3	1.3
Y25	-0.8	-1.9	3.7	-	-0.9	-1.8	-1.1	0.7
Y26	-1.6	-0.6	8.5	11.0	0.8	-1.5	0.3	1.8
Y28	-3.6	1.3	-	3.5	3.7	-1.6	-0.5	1.1
Y29	0.3	-0.9	-	-	-0.9	-0.4	-1.2	-0.8
Y30	-3.4	-0.9	-	0.7	1.9	-2.9	-2.5	0.4
Y31	-2.8	0.1	-	-	2.2	-1.8	-1.7	0.1
Y32	-2.2	1	-	-	2.4	-0.8	-3.5	-2.7
Y33	-4.6	-3.2	-	-	1.0	-5.2	-3.8	1.4
Y34	-1.6	-2.9	-	-	-1.0	-3.0	-0.8	2.2
Y35	-3.5	-2	-	-	1.1	-3.7	-2.6	1.1
Y36	-3.1	-1.7	1.2	5.0	1.0	-3.2	-2.8	0.4
S1	-1.2	1	-	8.1	1.7	-0.1	0.0	0.1
S2	1	-0.6	8.5	7.3	-1.2	0.3	0.6	0.3
F1	-0.1	-2.2	-	-	-1.6	-1.5	-1.4	0.1
Farkların Ortalaması = 0.3 mm/y					Standart Sapma = 1.2 mm/y			

Tablo 16'dan da görülebildiği gibi D-B ekseni üzerindeki yatay hız değerleri (V_D), - ve + işaretler sırasıyla batı ve doğu yönlerini ifade etmek üzere, -3.2 mm/y ile +3.7 mm/y arasında elde edilmiştir. Genel olarak stadyumun batı tarafında yer alan noktaların batı yönüne, doğu ve kuzey tarafında yer alan noktaların ise doğu yönüne doğru hareket ettikleri gözlemlenmiştir. En büyük batı yönlü hız değerleri genel olarak stadyumun batı tarafında yer alan sırasıyla Y_{16}, B_1, Y_{17} ve Y_{15} noktalarında -3.2 mm/y, -2.7 mm/y, -2.5 mm/y ve -2.5 mm/y değerleri ile gözlemlenirken, en büyük doğu yönlü hızlar ise genel olarak stadyumun doğusunda yer alan bölgelerde bulunan sırasıyla Y_{28} ve A_{023} numaralı noktalarda 3.7 mm/y ve 2.6 mm/y değerleri ile gözlemlenmiştir. Dolgu sahasının yatay (D-B) hareketi üç yıllık değerlendirme sonuçlarında çok daha fazla sayıda kombinasyon noktası üretilerek daha detaylı bir biçimde gösterilecek ve açıklanacaktır.

Tablo 16'da StaMPS yöntemi ile elde edilen V_Y hız değerleri incelendiğinde ise nivelman ölçülerinden elde edilen düşey hız değerlerine benzer sonuçlar elde edildiği görülebilmektedir. Noktaların genelinde aşağı yönlü hareket olduğu ve en büyük çökme oranlarının, tabloda turuncu renk ile gösterilen, sırasıyla Y_{13}, Y_{16}, B_2 ve Y_{14} noktalarında -9.1 mm/y, -6.1 mm/y, -5.7 mm/y ve -5.1 mm/y hız değerleri ile elde edildiği görülmektedir. 0.1-0.3 mm arasındaki ortalama hata değerlerine sahip nokta yüksekliklerinden türetilen yüksek hassasiyetteki nivelman düşey yıllık hız değerleri (V_y) ile yapılan karşılaştırmalarda ise oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. İki farklı ölçü grubundan elde edilen hız değerleri arasındaki en büyük farklılıklar, tabloda mavi renk ile gösterilen, Y_{14}, Y_{32} ve B_2 noktalarında sırasıyla -4.2 mm/y, -2.7 mm/y ve 2.2 mm/y olarak elde edilmiştir. Tüm noktalarda iki hız değeri arasında elde edilen tüm farkların ortalaması 0.3 mm/y, standart sapması ise 1.2 mm/y olarak elde edilmiştir.

StaMPS ve Nivelman düşey hız değerleri arasında yapılan karşılaştırmalarda, Tablo 16'da sarı renkle gösterilen bazı noktalarda (B_3, D_{25}, D_{30}, A_{23}, Y_{13}, Y_{19}, Y_{20}, Y_{25}, Y_{26}, Y_{28}, Y_{30}, Y_{36}, S_1, S_2) enterpolasyon değerleri yerine, bu noktalara en yakın mesafelerde ve benzer türden yapılar üzerinde bulunan PS noktalarına ait değerler kullanılmıştır. Böylelikle bu noktalarda enterpolasyon değerlerinden elde edilen sonuçlara göre nivelman hız değerleri ile daha küçük farkların elde edildiği daha hassas sonuçlara ulaşılmıştır. Hesaplamalarda enterpolasyon değerleri yerine kullanılan artan ve azalan PS LOS hız değerleri ve mesafeleri Tablo 16'da sarı renkle taranmış bir biçimde gösterilmiştir. Artan ya da azalan yörüngedeki enterpolasyon değeri yerine PS değeri hesaba katılarak yapılan en önemli iyileştirmelerden birisi Y_{13} noktası için gerçekleştirilmiştir. En büyük nivelman

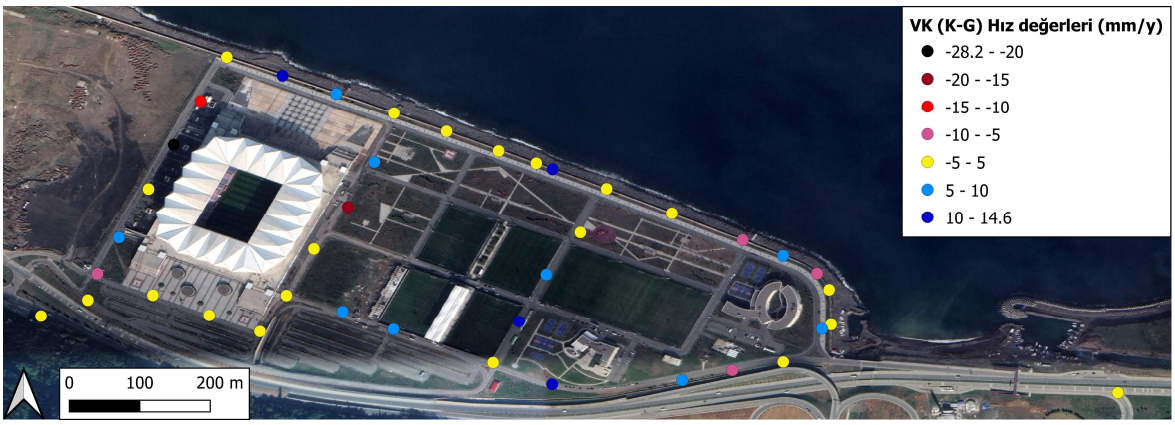
düşey hız değerine (-11.1 mm/y) sahip bu noktada, artan yörüngedeki -5.2 mm/y olan LOS enterpolasyon hız değeri yerine, bu noktaya 3.4 m uzaklıktaki artan yörüngeden elde edilen PS noktasına ait -6.4 mm/y LOS hızı kullanıldığında, bu noktadaki düşey yer değiştirme hızı değeri -8.3 mm/y yerine, nivelman hız değerine daha yakın olan -9.1 mm/y olarak elde edilmiştir. En büyük iyileştirmenin yapıldığı nokta ise, V_Y değeri olarak -4.6 mm/y yerine -3.2 mm/y değerinin elde edildiği Y_{36} noktası olmuştur. Bu noktada artan ve azalan yörüngelerde -3.7 mm/y ve -3.2 mm/y olan enterpolasyon değerleri yerine, 1.2 m ve 5 m uzaklıklarda yer alan PS noktalarının -3.1 mm/y ve -1.7 mm/y olan değerleri kullanılmıştır. Y_{28} noktasında ise azalan yörüngedeki -0.3 mm/y olan enterpolasyon değeri yerine, 3.5 m uzaklıktaki 1.3 mm/y olan PS değeri kullanılarak, düşeyde -2.6 mm/y yerine nivelman değerine daha yakın olan -1.6 mm/yıl değeri elde edilmiştir. Enterpolasyon yerine PS verilerinin kullanılmasıyla, V_Y değerlerinde en büyük iyileşme görülen noktalar, sırasıyla 1.4 mm/y, 1 mm/y, 0.9 mm/y, 0.8 mm/y, 0.8 mm/y ve 0.8 mm/y oranları kadar nivelman hız değerlerine yaklaşma görülen Y_{36}, Y_{28}, S_2, Y_{13}, Y_{26} ve Y_{30} numaralı noktalar olmuştur. Diğer noktalarda yapılan iyileştirmelerde ise 0.6 mm/y değerinin altında kalan yaklaşmalar ya da iyileştirmeler görülmüştür. Sonuç olarak tüm noktaların enterpolasyon değerleri ile elde edilen V_y-V_Y farklarının ortalama ve standart sapma değerleri sırasıyla 0.4 mm/y ve 1.4 mm/y iken, bazı noktalarda enterpolasyon değerleri yerine PS değerlerinin kullanılması sonucunda, bu oranlar 0.3 mm/y ile 1.2 mm/y değerlerine düşerek daha da iyileşmişlerdir. Bununla birlikte en büyük hız farkının gözlemlendiği Y_{14} noktasının düşey hız değerinde herhangi bir iyileştirme yapılamamıştır. Bunun ve bu noktadaki en büyük hatanın oluşmasının nedeni, bu noktanın yakın çevresinde hem artan hem de azalan yörüngelerde herhangi bir PS noktası üretilememiş olmasıdır. Bu noktanın en yakınında bulunan, artan ve azalan yörüngelerden üretilen PS noktalarının bu noktaya olan mesafeleri sırasıyla 14.6 ve 18.1 m dir. Bu durumun tersini yansıtan en iyi örnek ise, yakın çevresinde aynı türden yapı üzerinde bulunan PS noktaları sayesinde, Y_{14} noktasına göre daha yüksek düşey hız değerine sahip olmasına rağmen, hem enterpolasyon hem de PS değeri ile daha düşük farkların ya da daha uyumlu sonuçların elde edildiği Y_{13} noktasıdır.

Bu tez çalışmasında deniz dolgu sahaları üzerinde gerçekleştirilen ve birinci bölümdeki literatür taramasında değinilen InSAR-nivelman karşılaştırmalarının yer aldığı benzer diğer çalışmalara nazaran, nivelman hız değerleriyle daha uyumlu ve daha hassas sonuçlar elde edilmiştir. Bunun genel olarak üç nedeni bulunmaktadır. Bunlardan birincisi ve en önemlisi, yatay hareketin ihmal edilerek artan veya azalan yörünge verilerinden

yalnızca birinin düşeye çevrilmesiyle yapılan değerlendirmeler yerine, her iki yörünge verilerinin kombinasyonundan yararlanılmasıdır. İkincisi, noktasal çözünürlüğü yüksek olan StaMPS PSI tekniğinin kullanılması ve genlik dağılım indeks değerinin daha yüksek alınmasıyla ($D_A \leq 0.6$), her iki yörüngede de oldukça yüksek yoğunlukta PS nokta kümelerinin ve bu sayede yüksek doğruluktaki enterpolasyon haritalarının üretilebilmesidir. Üçüncü nedeni ise, her iki yörüngede de fazla sayıda görüntüden oluşan veri setlerinin kullanılması sayesinde genel olarak 1.5 mm/y değerinin altında kalan standart sapma oranları ve 1.2 mm/y ile 1 mm/y standart sapma ortalamalarına sahip yüksek hassasiyetteki artan ve azalan yörünge LOS hızlarının elde edilmesidir.

3.2.1.4. Artan+Azalan+Nivelman Kombinasyonu ile V_K Hızlarının Belirlenmesi

Artan ve Azalan yörünge verileri ile elde edilen düşey hız değerlerinin nivelman ölçülerinden elde edilen düşey hız verileri ile yüksek uyumlu olduğu görüldükten sonra, artan, azalan ve nivelman üçlü kombinasyonu yapılarak nivelman nokta konumlarındaki K-G ekseni üzerindeki 14.01.2018-28.01.2020 tarih aralığını kapsayan V_K hız bileşeni çözümlenmiştir. Bunun için Eşitlik (2.29)'da verilen denklemdeki düşey hız değerleri milimetre altı hassasiyetteki nivelman hız değerleri olarak alınarak ($V_Y = V_y$) denklem çözüldüğünde V_D ve V_K değerleri Tablo 17'deki gibi elde edilmiştir. Şekil 30 ise V_K değerlerinin harita üzerindeki gösterimini içermektedir.



Şekil 30. Nivelman noktalarındaki V_K hız değerleri (mm/y)

Tablo 17 incelendiğinde, negatif ve pozitif değerler sırasıyla güney ve kuzey yönlü hareketleri ifade etmek üzere, yer değiştirme hız vektörleri -28.2 mm/y ile 14.6 mm/y arasında elde edilmişlerdir. Tabloda sarı renkle gösterilen büyüklüğü santimetreyi aşan hızların görüldüğü noktalar sırasıyla -28.2 mm/y, -17.8 mm/y, -13.4 mm/y, 14.6 mm/y, 14.6 mm/y, 11.9 mm/y, 11.8 mm/y hız oranları ile Y_{14}, Y_{32}, Y_{13}, B_2, Y_{34}, B_7 ve Y_{26} noktaları olmuştur. InSAR ölçülerinin K-G ekseni üzerindeki hassasiyetinin düşük olmasından dolayı (Fuhrmann vd., 2015), elde edilen V_K hız değerlerinin hassasiyeti V_D ve V_Y değerlerine göre daha düşüktür. Özellikle de hassasiyeti daha yüksek olan nivelman hız değerleriyle yapılan karşılaştırmalarda, daha büyük farkların ya da daha düşük uyumluluğun elde edildiği noktalarda V_K değerlerinin daha düşük hassasiyette elde edildiği düşünülmektedir. Bu varsayımla en büyük farkların elde edildiği Y_{14}, Y_{32} ve B_2 noktalarında bu hassasiyetin diğer noktalara nispeten daha düşük olduğu düşünülmektedir. Şekil 30 incelendiğinde ise, sabit noktaları (S_1,S_2) da içeren 0'a yakın değerler alan (-5 mm/y - +5 mm/y) sarı nokta sayısının diğerlerinden fazla olduğu, en büyük hareketlerin stadyumun batı, kuzeybatı ve doğu tarafında güney yönünde gözlemlendiği görülmüştür.

Tablo 17. V_K hız değerlerinin V_D ve V_y ile gösterimi (mm/y)

N.N	VD (mm/y)	VK (mm/y)	Vy (mm/y)
B1	-2.7	0.3	-3.6
B2	1.1	14.6	-3.5
B3	2.3	6.0	-3.8
B4	1.7	2.6	-3.9
B5	1.2	1.2	-4.1
B6	1.6	1.3	-3.5
B7	0.1	11.9	-3.9
B8	2.2	8.4	-2.3
D25	1.9	3.7	-2.6
D26	1.7	-0.1	-3.7
D30	1.0	-0.1	-3.7
A023	2.6	-5.6	-2.6
R22	0.9	-9.5	-2.1
A23	0.7	2.1	-0.7
A20	1.0	2.1	-1.5
Y1	0.8	5.4	-1.2
Y13	-0.7	-13.4	-11.1
Y14	-1.2	-28.2	-9.3
Y15	-2.5	4.8	-2.0
Y16	-3.2	6.4	-5.1
Y17	-2.5	-9.3	-0.5
Y18	-2.1	1.9	-0.7
Y19	-0.1	2.7	-0.2
Y20	0.8	2.5	-0.7
Y21	0.1	3.4	-0.9
Y22	1.2	6.1	-1.9
Y23	-0.3	8.7	-0.3
Y25	-0.8	4.6	-1.1
Y26	0.8	11.8	0.3
Y28	3.7	7.1	-0.5
Y29	-0.9	-5.4	-1.2
Y30	1.9	2.6	-2.5
Y31	2.2	0.8	-1.7
Y32	2.4	-17.8	-3.5
Y33	1.0	9.5	-3.8
Y34	-1.0	14.6	-0.8
Y35	1.1	7.2	-2.6
Y36	1.0	2.8	-2.8
S1	1.7	1.0	0.0
S2	-1.2	2.1	0.6
F1	-1.6	0.8	-1.4

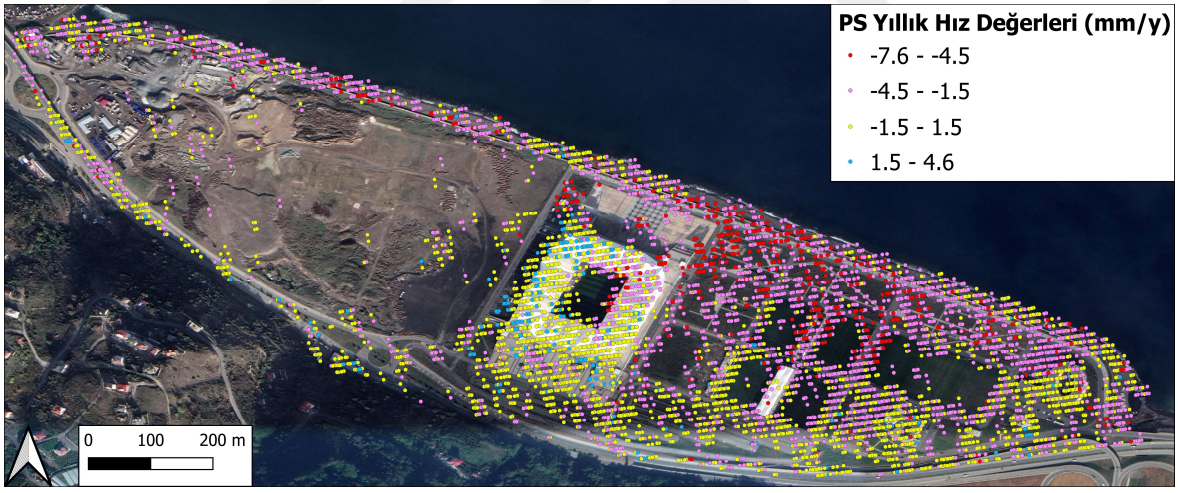
3.2.2. 20.12.2016-28.01.2020 (Üç Yıllık) Sonuçlar ve İrdelemeler

Bu bölümde 20.12.2016 – 28.01.2020 tarih aralığındaki yaklaşık üç yıllık süreyi kapsayan değerlendirme sonuçları verilecektir. Bu değerlendirmeler bu tarih aralığındaki artan ve azalan yörüngelerden elde edilen PS LOS hız değerlerini ve standart sapmalarını,

bunların zaman serileri ile birlikte karşılaştırılmasını ve kombinasyonu ile yatay (D-B) ve düşey yönde elde edilen yüzey değişim haritalarını içermektedir.

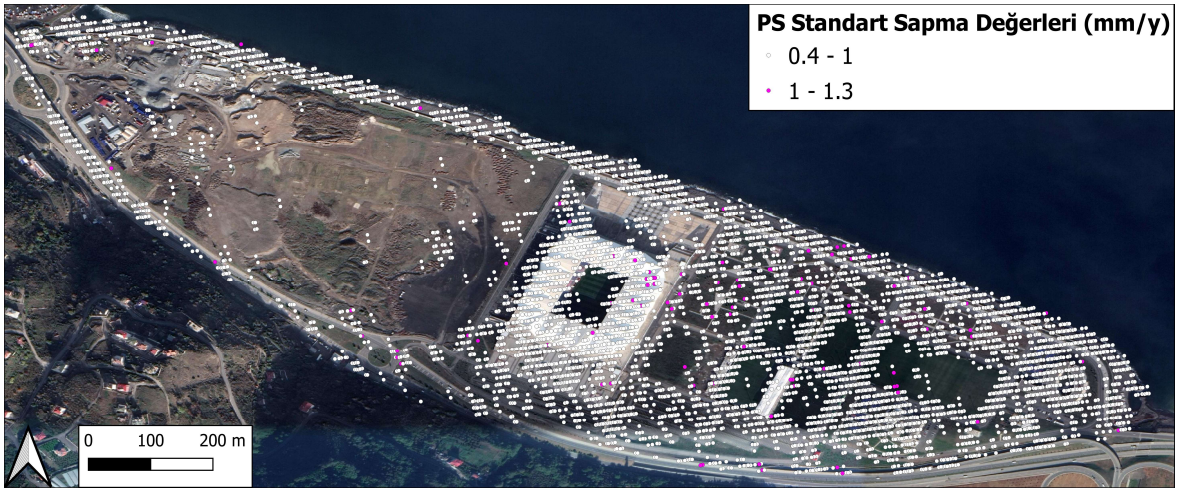
3.2.2.1. Artan Yörünge Sonuçları ve İrdelemeleri

Uygulamada genel olarak 12 gün aralıklı, VV düşey polarizasyonlu ve 43 numaralı aynı yörünge yolu üzerindeki toplam 95 adet Sentinel-1 IW SLC SAR görüntüsü kullanılmıştır. En büyük geometrik bazın 143 metreyi geçmediği ve görüntüler arasındaki en yüksek korelasyonun sağlandığı 07.07.2018 tarihli S-1A görüntüsü master seçilerek, toplamda 94 adet interferogram görüntüsü elde edilmiştir. 94 adet interferogramın StaMPS PSI tekniği ile değerlendirilmesi sonucunda, yaklaşık 5160 adet PS noktası (km^2 başına 6789 PS noktası) ve bu noktalara ait yüzey değişimleri LOS doğrultusu üzerinde -7.6 mm/y ile 4.6 mm/y arasında değişen yıllık hız değerleri olarak elde edilmiştir (Şekil 31).



Şekil 31. 20.12.2016–28.01.2020 Artan PS LOS hızları (mm/y)

Artan yörüngede elde edilen PS LOS hızlarının standart sapma değerleri ise, çoğunluğu 1 mm/y değerinin altında ve ortalaması 0.7 mm/y olmak üzere, 0.4 mm/y ile 1.3 mm/y arasında elde edilmiştir (Şekil 32).



Şekil 32. 20.12.2016–28.01.2020 Artan PS LOS hızlarının standart sapmaları (mm/y)

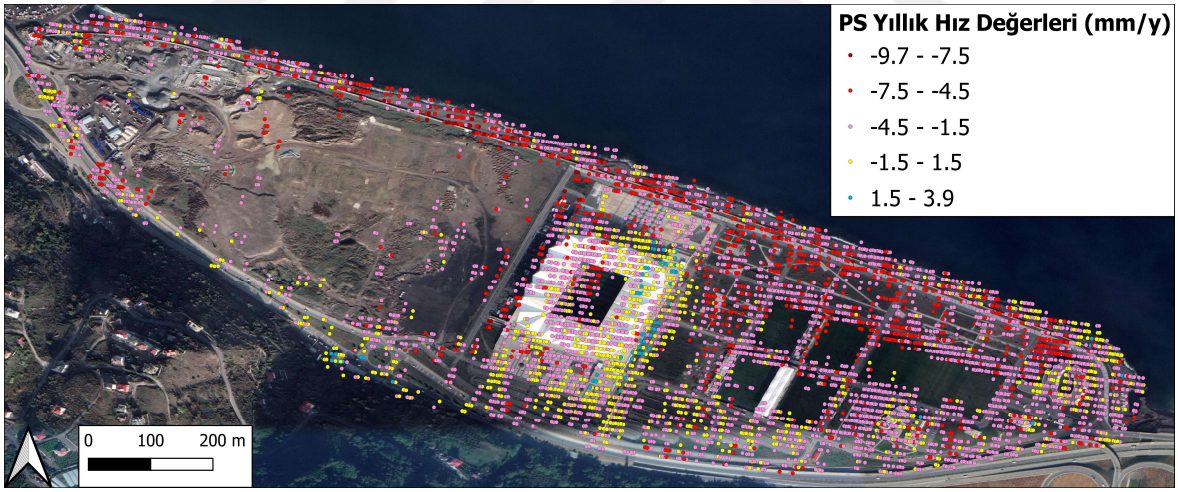
Artan yörünge üzerinde elde edilen üç yıllık sonuçlarda, iki yıllıklara nazaran PS nokta sayısı veya yoğunluğunun daha düşük fakat standart sapma değerlerinin ise daha iyi olduğu görülebilmektedir. Bunun nedeni daha geniş zaman aralığını ve daha fazla görüntü sayısını içeren uygulamalarda, bir yandan daimi yansıtıcı özelliğini koruyabilen PS noktası üretmenin zorlaşırken, diğer yandan ise veri sayısının artması ile hassasiyetin de artmasıdır.

Şekil 31'de üç yıllık artan yörünge verilerinin değerlendirilmesi sonucunda LOS hız değerleri sırasıyla -7.6 mm/y ile -4.5 mm/y, -4.5 mm/y ile -1.5 mm/y, -1.5 mm/y ile 1.5 mm/y ve 1.5 mm/y ile 4.6 mm/y arasında elde edilen PS noktaları sırasıyla kırmızı, pembe, sarı ve açık mavi renkleri ile gösterilmişlerdir. İki yıllık sonuçlarda olduğu gibi üç yıllık sonuçlarda da alanda genel olarak – yönlü hareketli nokta sayısının + yönlülerden fazla olduğu görülebilmektedir. Fakat bununla birlikte üç yıllık sonuçlardaki hem – hem de + yönlü en büyük yer değiştirme hareketlerinin (-7.6 mm/y ile 4.6 mm/y) iki yıllıklardakinden (-12.5 mm/y ile 7 mm/y) daha küçük olduğu görülmüştür. Bunun genel olarak nedeni, üç yıllık sonuçlarda stadyumun yakın çevresinde, özellikle de iki yıllık değerlendirmelerde -7.5 mm/y ile -12.5 mm/y arasındaki hız oranları ile az sayıdaki en büyük yer değiştirmelere sahip PS noktalarının görüldüğü stadyumun kuzeydoğu girişi ve kuzeybatı kısmında bulunan bölgelerde, PS noktalarının daha az sayıda elde edilmesi ile birlikte yer değiştirme oranlarının da daha küçük olmasıdır. Stadyumun yakın çevresi haricinde dolgu sahasının tümüne bakıldığında ise genel olarak iki yıllık sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Alanda en sık olarak en düşük – yönlü yüzey değişimlerini ifade eden pembe noktalar ile birlikte, 0'a yakın değerler alan sarı noktalar görülmektedir. Spor

kompleksi alanındaki en büyük yüzey değişimleri genel olarak kırmızı noktalar ile stadyumun kuzeydoğusu ile kuzeybatısında gözlemlenirken, en stabil değişimler ise pembe noktalar ile deniz duvarı üzerinde gözlemlenmiştir.

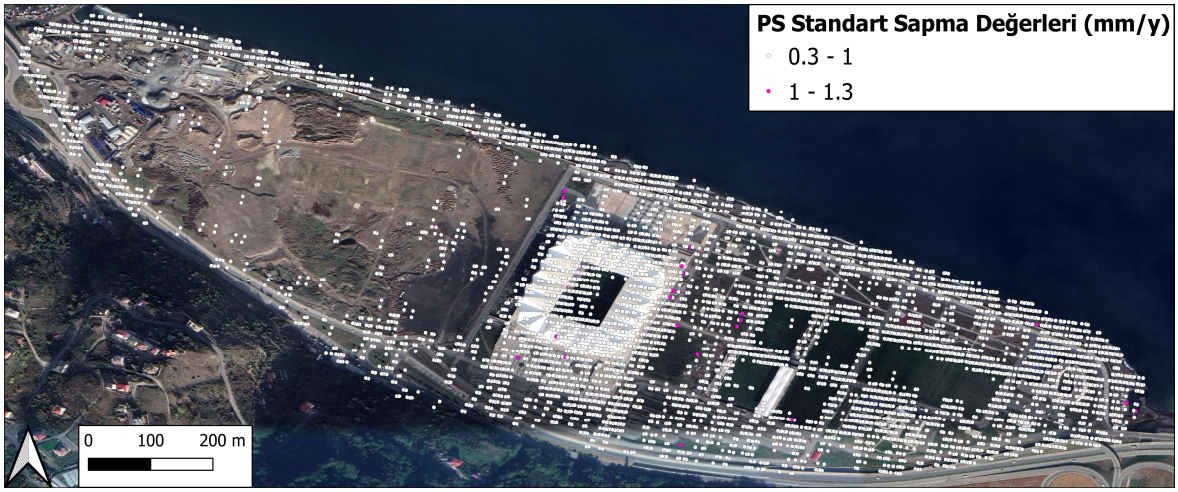
3.2.2.2. Azalan Yörünge Sonuçları ve İrdelemeleri

Uygulamada genellikle 12 gün aralıklı, VV düşey polarizasyonlu ve 123 numaralı aynı yörünge yolu üzerindeki toplam 96 adet Sentinel-1 IW SLC SAR görüntüsü kullanılmıştır. En büyük geometrik bazın 96 metreyi geçmediği ve görüntüler arasındaki en yüksek korelasyonun sağlandığı 01.07.2018 tarihli S-1A görüntüsü master seçilerek, toplamda 95 adet interferogram görüntüsü elde edilmiştir. Bu interferogramların StaMPS PSI tekniği ile değerlendirilmesi sonucunda, yaklaşık 5240 adet PS noktası (km^2 başına 6895 PS noktası) ve bu noktalara ait yüzey değişimleri LOS doğrultusu üzerinde -9.7 mm/y ile 3.9 mm/y arasında değişen yıllık hız değerleri olarak elde edilmiştir (Şekil 33).



Şekil 33. 20.12.2016–28.01.2020 Azalan PS LOS hızları (mm/y)

Azalan yörüngede elde edilen PS LOS hızlarının standart sapma değerleri ise artan yörüngedekine benzer bir biçimde, çoğunluğu 1 mm/y değerinin altında ve ortalaması 0.6 mm/y olmak üzere, 0.3 mm/y ile 1.3 mm/y arasında elde edilmiştir (Şekil 34).



Şekil 34. 20.12.2016–28.01.2020 Azalan PS LOS hızlarının standart sapmaları (mm/y)

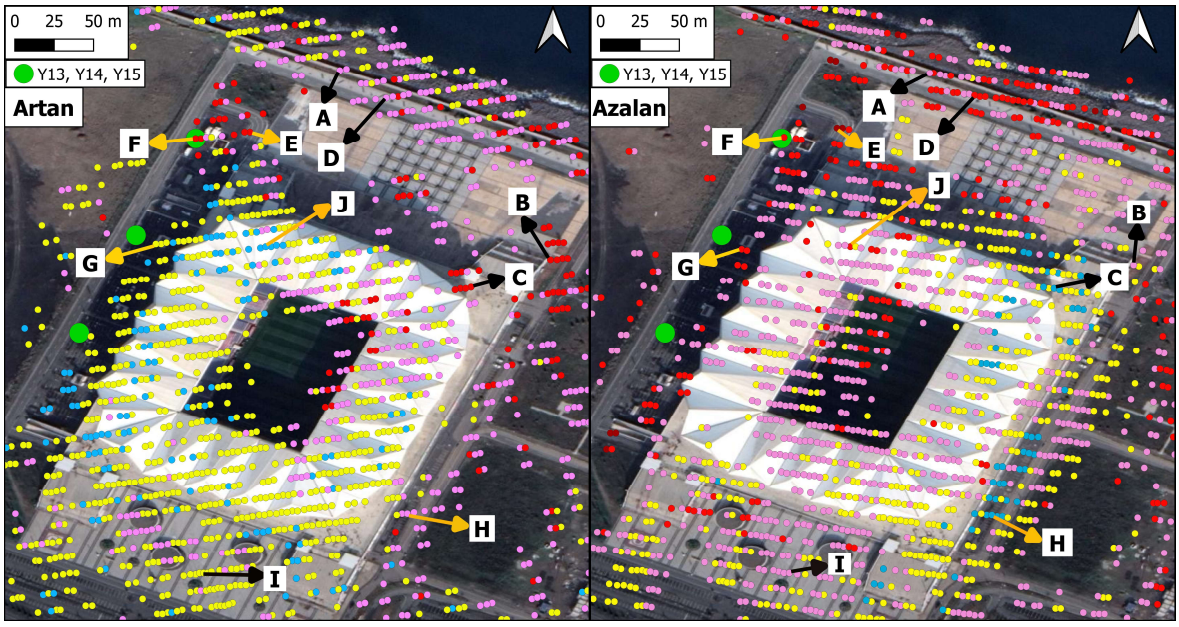
Azalan yörüngenin üç yıllık veri değerlendirmeleri sonucunda da artan yörüngede olduğu gibi, daha uzun zaman aralığına yayılan daha fazla sayıdaki görüntünün kullanılmasından dolayı, iki yıllık sonuçlardakine nispeten daha az sayıda PS noktası daha iyi standart sapma değerleri ile elde edilmiştir. Ayrıca iki yıllık sonuçlara benzer bir biçimde, azalan yörünge üzerinde artan yörüngeye nazaran daha yüksek yoğunlukta PS nokta sayısı elde edilmiştir.

Şekil 33'de üç yıllık azalan yörünge verilerinin değerlendirilmesi sonucunda LOS hız değerleri sırasıyla -9.7 mm/y ile -7.5 mm/y, -7.5 mm/y ile -4.5 mm/y, -4.5 mm/y ile -1.5 mm/y, -1.5 mm/y ile 1.5 mm/y ve 1.5 mm/y ile 3.9 mm/y arasında olan PS noktaları sırasıyla bordo, kırmızı, pembe, sarı ve açık mavi renkleri ile gösterilmişlerdir. Üç yıllık azalan yörünge sonuçlarında artan yörünge sonuçlarında olduğu gibi, – yönlü hareketli nokta sayısının + yönlülerden fazla olduğu ve hem – hem de + yönlü en büyük yer değiştirme hareketlerinin (-9.7 mm/y ile 3.9 mm/y) iki yıllıklardakinden (-12.4 mm/y ile 8.4 mm/y) daha küçük olduğu görülmüştür. Bunun nedenleri ise, artan yörüngede görülen duruma benzer bir biçimde alanın bazı bölgelerindeki PS nokta sayılarının ve yer değiştirme hız büyüklüklerinin üç yıllık sonuçlarda iki yıllıklara nazaran daha az olmasıdır. Bu durum en belirgin olarak stadyumun kuzeydoğu girişindeki, en büyük yer değiştirmelerin görüldüğü kuzeybatısındaki ve batı kısmındaki PS nokta sayılarının daha az ve hız değerlerinin daha küçük olması şeklinde gözlemlenmiştir. Tüm dolgu sahasına bakıldığında ise, üç yıllık veri sonuçlarında iki yıllıklara nazaran küçük farklılıklarla sarı noktaların daha az sayıda, pembe ve kırmızı noktaların ise daha fazla sayıda olduğu görülmüştür. Başka bir deyişle, stadyumun kuzeydoğu, kuzeybatı ve batı kısımları

haricinde kalan dolgu sahasının diğer kısımlarına ya da geneline bakıldığında, son iki yıllık veriler daha küçük olduğundan, azalan yörünge üzerinde tespit edilen yer değiştirme ya da deformasyon hız oranlarının zamanla büyüklük olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Spor kompleksi alanındaki en büyük yüzey değişimleri -4.5 mm/y ile -9.7 mm/y arasında stadyumun batı ve kuzeybatı kısımlarında görülürken, en stabil yüzey değişimleri ise pembe noktaların daha fazla sayıda bulunduğu deniz duvarı üzerinde görülmüştür.

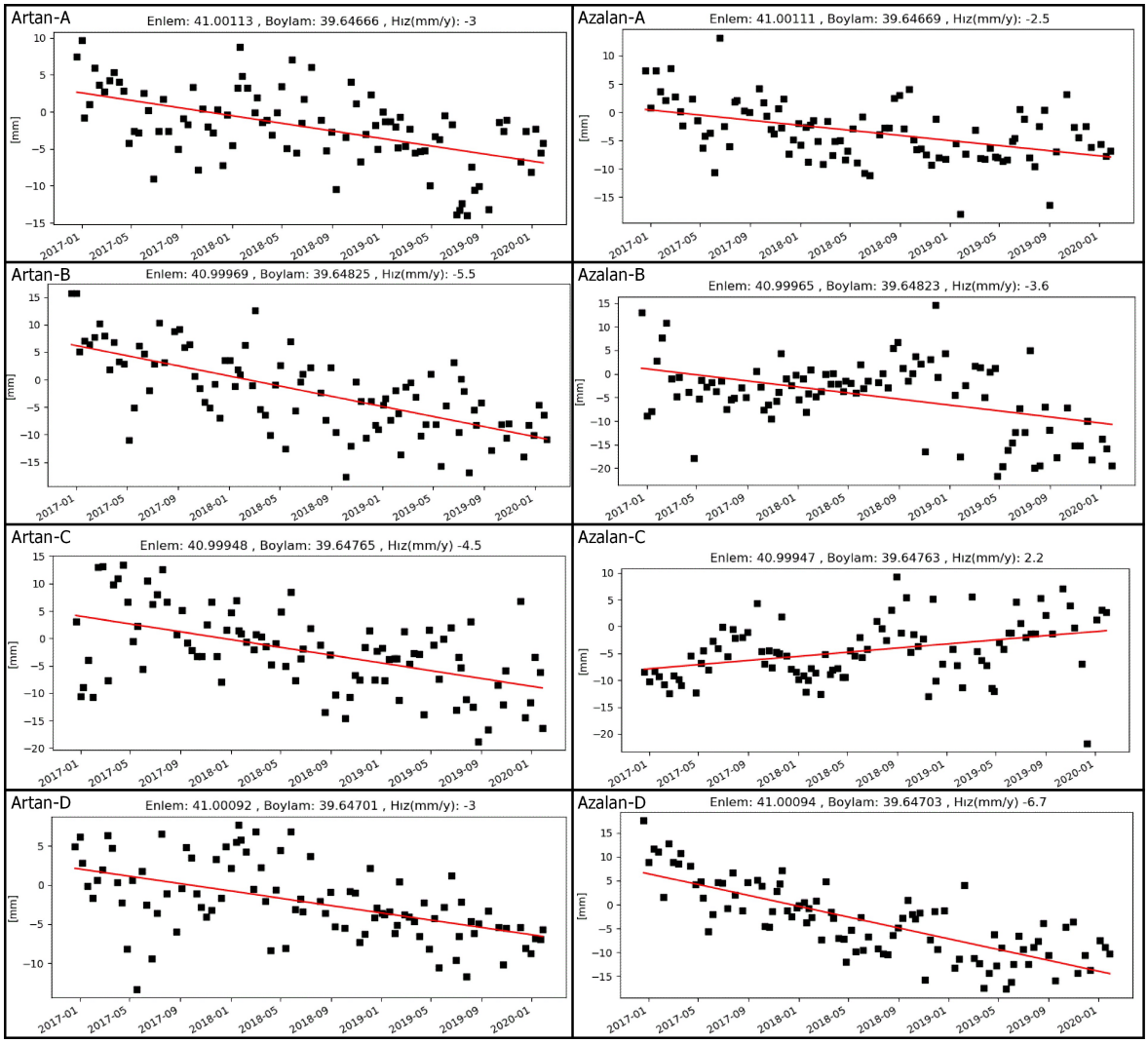
3.2.2.3. Artan ve Azalan Yörünge Verilerinin Karşılaştırılması

Yukarıda artan ve azalan üç yıllık sonuçların irdelenmesinde, iki yıllık sonuçlar ile olan karşılaştırılmalarına aralarındaki benzerlik ve farklılıklara değinilerek yer verilmiştir. Bu bölümde ise her iki yörüngeden elde edilen sonuçlar, hız değerlerinde en büyük farklılıkların ve yer değiştirme oranlarının gözlemlendiği stadyumun yakın çevresinde yer alan önemli bölgelerdeki PS noktalarının hız değerleri ve zaman serileri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Şekil 35 aynı türden yapılar üzerinde birbirine çok yakın mesafelerde (4.7 metreden daha az) bulunan karşılaştırma yapılan artan ve azalan A, B, C, D, E, F, G, H, I, J PS noktalarını, Şekil 36, Şekil 37 ve Şekil 38 ise bu noktalara ait hız değerleri ve zaman serilerini lineer trendleri (kırmızı çizgi) ile birlikte göstermektedir.

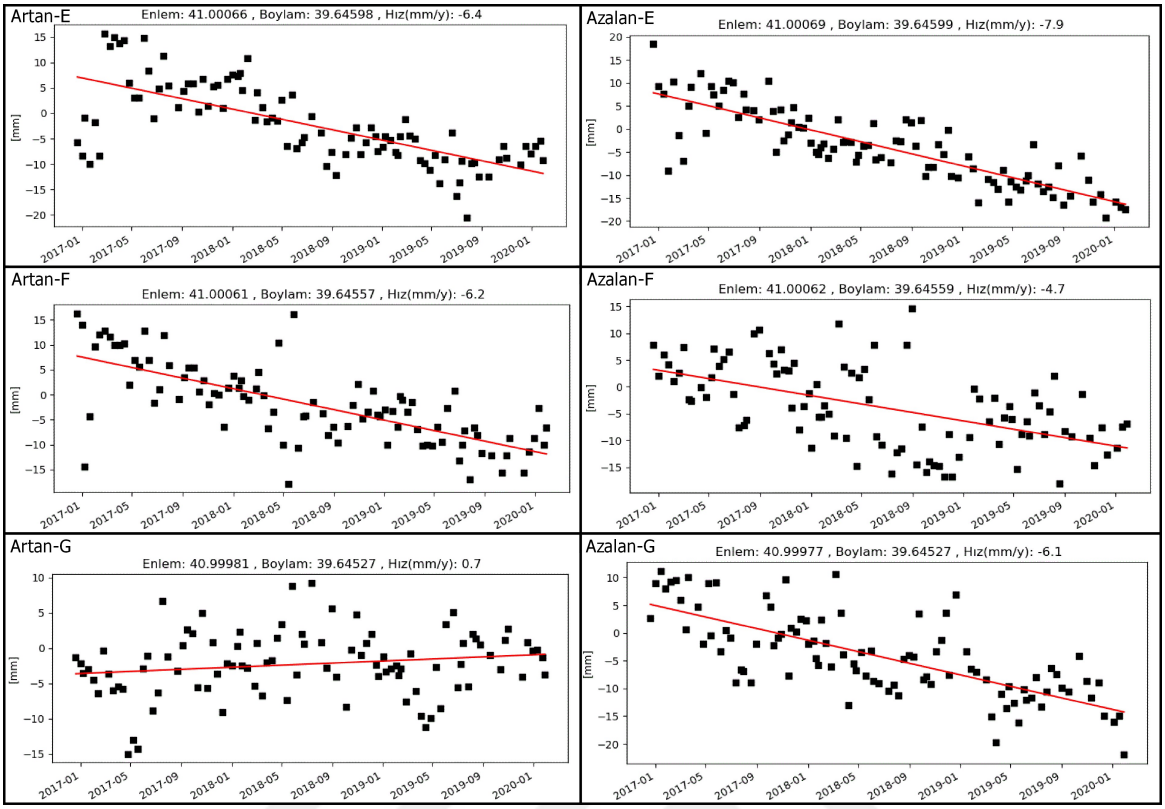


Şekil 35. 20.12.2016–28.01.2020 Artan ve azalan karşılaştırma PS noktaları

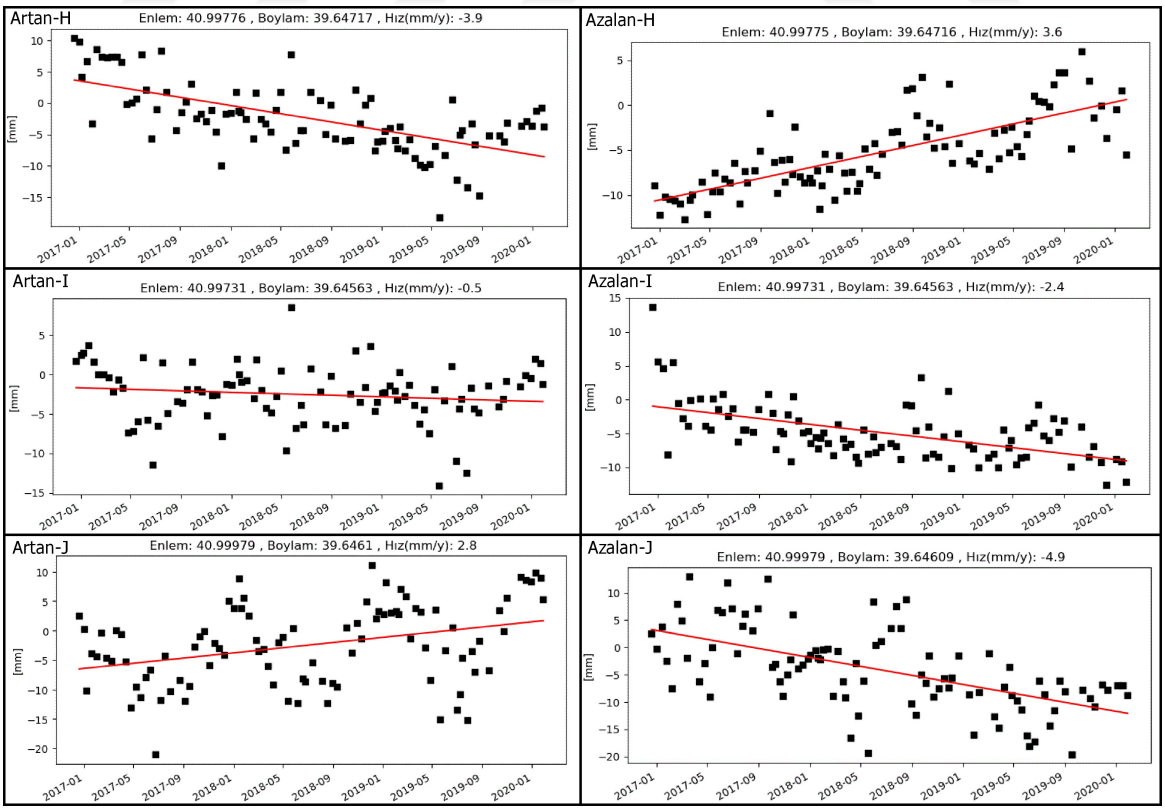
Şekil 35'de spor kompleksi üzerindeki en bariz şekilde gözlemlenebilen çatlak ve çöküntülerin yer aldığı (Şekil 21) ve hem nivelman hem de InSAR ölçülerinden elde edilen en büyük yer değiştirme oranlarının bulunduğu bölgede yer alan Y_{13}, Y_{14} ve Y_{15} numaralı nivelman noktaları yeşil noktalar olarak gösterilmiştir. Şekil 35'de yer alan artan ve azalan yörünge sonuçlarından A, B, C ve D harfleri ile gösterilen PS noktalarına ait zaman serileri Şekil 36'da, spor kompleksi üzerindeki en büyük deformasyonların bulunduğu stadyumun kuzeybatı ve batı tarafında yer alan E, F ve G harfleri ile gösterilen PS noktalarının zaman serileri Şekil 37'de, H, I ve J noktalarının zaman serileri ise Şekil 38'de gösterilmiştir.



Şekil 36. Artan ve azalan A, B, C, D noktalarının zaman serileri ve hızları (mm/y)



Şekil 37. Artan ve azalan E, F, G noktalarının zaman serileri ve hızları (mm/y)



Şekil 38. Artan ve azalan H, I, J noktalarının zaman serileri ve hızları (mm/y)

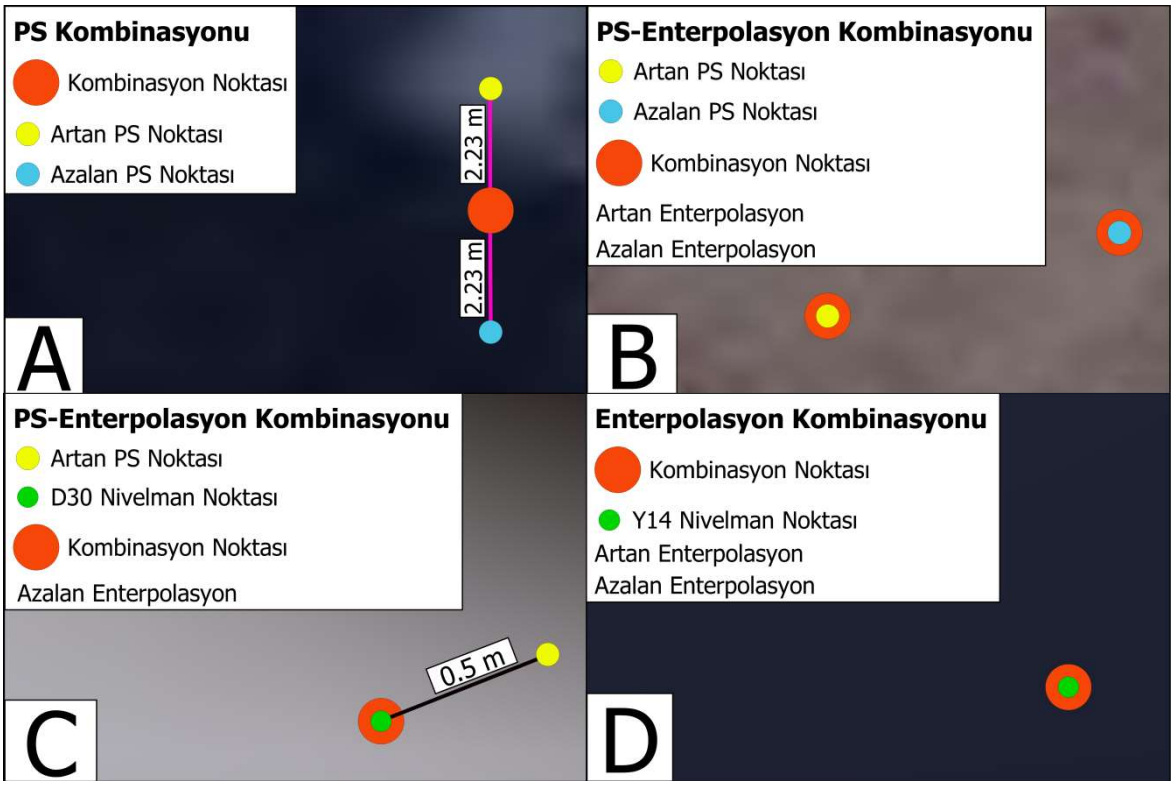
Artan ve Azalan yörüngelerden elde edilen A noktaları aralarında 3.4 m mesafe bulunan deniz duvarı üzerindeki PS noktalarını göstermektedir. Artan ve azalan yörüngelerde birbirine benzer LOS hız oranları (-3 mm/y ve -2.5 mm/y) ile elde edilen bu noktalar genel olarak her iki yörüngede bu yapı üzerinde elde edilen sonuçların tipik bir örneğidir. D noktaları aralarında 2.8 m mesafe bulunan ve deniz duvarının ön tarafındaki kaldırım üzerinde yer alan PS noktalarını göstermektedir. Burada bulunan kaldırım zemin üzerinde artan ve azalan yörüngelerden elde edilen PS noktaları genel olarak incelendiğinde, artan yörünge sonuçlarında -1.5 mm/y ile -4.5 mm/y arasındaki hız değerlerine sahip pembe noktaların, azalan yörünge sonuçlarında ise -4.5 mm/y ile -7.5 mm/y arasındaki hız değerlerine sahip kırmızı noktaların çoğunlukta olduğu görülebilmektedir. Bu nedenle, bu bölgedeki genel olarak görülen yüzey değişimini ve iki yörüngeden elde edilen sonuçlardaki farklılığı gösterebilmek adına, artan ve azalan yörüngelerden sırasıyla -3 mm/y ve -6.7 mm/y yer değiştirme oranlarına sahip birbirine yakın olan iki PS noktası seçilerek karşılaştırılmıştır. Azalan PS noktası üzerinde doğrusal trende daha yakın daha düzgün bir hareket elde edilmiştir. B ve C noktaları ise stadyumun kuzeydoğusunda kaldırım ve giriş bölgesi üzerinde artan yörüngede kırmızı, azalan yörünge sonuçlarında ise pembe ve mavi (1.5 mm/y - 3.9 mm/y) renkleri ile görünen noktalardır. Her iki yörüngeden elde edilen B noktalarının artan ve azalan yörünge LOS hızları -5.5 mm/y ile -3.6 mm/y olmakla birlikte aralarındaki mesafe ise 4.7 metredir. Her iki noktada da uydudan uzaklaşma şeklinde negatif yönlü hareket görülmektedir. C noktalarının artan ve azalan LOS hızları ise -4.5 mm/y ile 2.2 mm/y olmakla birlikte aralarındaki mesafe 2 metredir. Bu noktalarda hız değerlerinin farklı işaretli olması, daha önce de değinildiği üzere, düşey harekete yakın veya düşey hareketten daha büyük yer değişimine sahip olan yatay hareketin bulunduğu noktalarda, bileşke hareketin farklı yörüngelerde farklı LOS yönlerinde algılanmasından kaynaklanmaktadır. Stadyumun kuzeybatı ve batı tarafında, Y_{13}, Y_{14} ve Y_{15} nivelman noktalarının yakınında ve genel olarak en büyük ve en gözle görülebilir deformasyonların bulunduğu bölgede, asfalt ve kaldırım zemini üzerinde yer alan E, F ve G PS noktaları ise artan ve azalan yörünge konumlarında birbirlerine sırasıyla 3.4 m, 2 m ve 4.5 m mesafelerde bulunmaktadır. Bu noktaların artan ve azalan yörünge LOS hızları ise E noktasında -6.4 mm/y ile -7.9 mm/y, F noktasında -6.2 mm/y ile -4.7 mm/y, G noktasında ise 0.7 mm/y ile -6.1 mm/y olarak elde edilmiştir. E ve F noktalarında her iki yörüngede de benzer – yönlü hız oranları elde edilirken, G noktasında ise artan yörüngede 0'a yakın ve azalan yörüngede – yönlü olmak

üzere farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum, ikinci bölümde izah edilen, batı ve aşağı yönlü bileşke hareketinin artan yörüngede iyi bir biçimde algılanamayışının tipik bir örneğidir. Batı yönlü yatay ve aşağı yönlü düşey hareketlerin bileşkesi olarak meydana gelen hareketler, azalan yörünge üzerinde uydu geometrisi uygun olduğu için iyi bir biçimde algılanırken, artan yörünge üzerinde ise yatay hareketin büyüklüğüne de bağlı olarak iyi bir biçimde algılanamamaktadırlar. Daha anlaşılabilir sonuçlar bir sonraki bölümde kombinasyon ile elde edilen yatay yer değişimi hız değerleri ile birlikte açıklanacaktır. H noktaları ise stadyumun dışındaki doğu tarafında yer alan ve genel olarak artan ve azalan yörüngelerde sırasıyla pembe ve mavi renklerle görünen noktalar arasındaki farklılığı göstermektedir. Bu noktaların arasındaki mesafe 1.4 m olmakla birlikte, artan ve azalan LOS hızları ise -3.9 mm/y ve 3.6 mm/y değerlerinde zıt yönlü olarak elde edilmiştir. Farklı yörüngelerde farklı işaretlerde algılanan diğer örneklerdekine benzer bir biçimde, bu noktaların bulunduğu bölgede de yatay hareket söz konusudur. I noktaları stadyumun güney tarafında bulunan ve genel olarak artan yörünge sonuçlarında sarı, azalan yörünge sonuçlarında ise pembe renkli olarak görünen PS noktalarının genel durumunu göstermektedir. Bu noktalar yaklaşık aynı konumda bulunmakla birlikte, artan ve azalan LOS hızları sırasıyla -0.5 mm/y ile -2.4 mm/y olarak elde edilmiştir. J noktaları ise birbirlerine yaklaşık 0.8 m mesafede bulunan ve stadyumun üstünü kaplayan membran malzemesi üzerinde yer alan, artan ve azalan LOS hızları sırasıyla 2.8 mm/y ile -4.9 mm/y olan farklı işaretlerdeki PS noktalarını göstermektedir. Membran rüzgarlı havadan etkilenerek hareket edebilecek kadar hafif bir malzeme olduğundan, genel olarak spor kompleksi üzerindeki birbirine en yakın noktalardaki en değişken hız değerlerine sahip PS noktaları hem artan hem de azalan yörüngeden elde edilen sonuçlarda bu malzeme üzerinde gözlemlenmiştir.

3.2.2.4. Artan ve Azalan Verilerin Kombinasyonu ile Yatay (V_D) ve Düşey (V_Y) Hız Değerlerinin Belirlenmesi

20.12.2016 – 28.01.2020 tarih aralığındaki yaklaşık üç yıllık zaman aralığını içeren artan ve azalan yörünge LOS hız verilerinin kombinasyonu Eşitlik (2.30)'dan faydalanılarak gerçekleştirilmiştir. Kombinasyonda kullanılan artan ve azalan yörüngelerin master görüntüleme geometrilerine ait azimut yönü açıları sırasıyla 350.21033 ve 189.70485 derece ya da 6.1123 ve 3.3110 radyan olarak elde edilmiştir. Kombinasyonda

artan ve azalan LOS hız verilerinin eşleştirilmesinde dört farklı yöntem kullanılmıştır (Şekil 39).



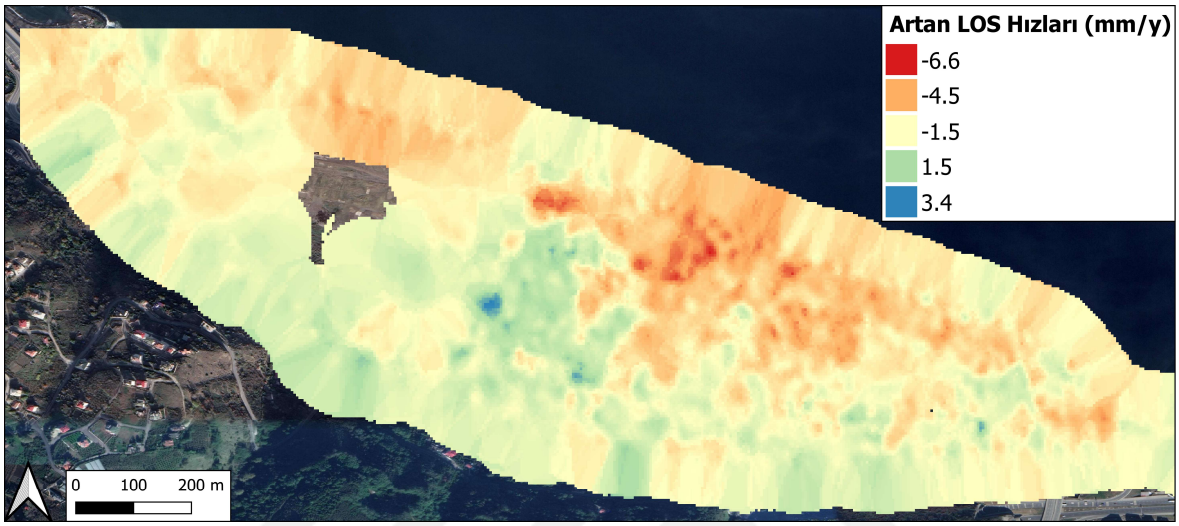
Şekil 39. Artan ve azalan verilerin kombinasyonunda eşleştirme yöntemleri

Şekil 39 kombinasyonda kullanılan artan ve azalan yörüngelere ait LOS hız verilerinin eşleştirilme yöntemlerini göstermektedir. Burada yer alan A, B, C ve D şekillerinde gösterilen dört farklı yöntem ile sırasıyla 1457, 489, 8 ve 57 nokta olmak üzere toplam 2011 adet kombinasyon noktası üretilmiş ve bu noktalardaki yatay (V_D) ve düşey (V_Y) yıllık hız değerleri elde edilmiştir. Spor kompleksi üzerinde 1691 adet kombinasyon noktası üretilirken, spor kompleksinin sol tarafında yer alan yapılaşmamış dolgu sahası üzerinde ise 320 adet kombinasyon noktası üretilmiştir.

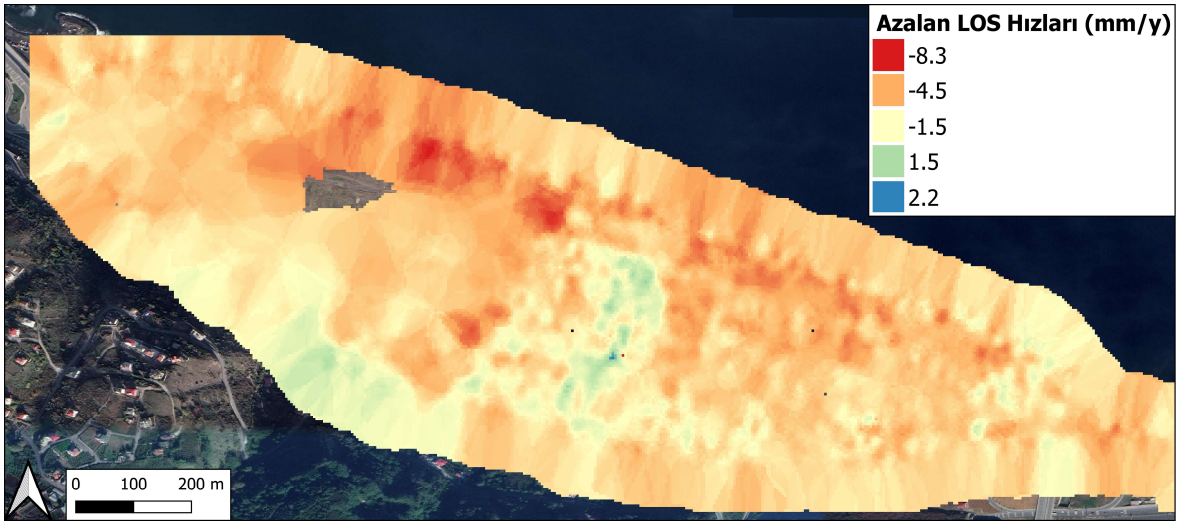
İki yıllık artan ve azalan SAR verilerinin kombinasyonu ile elde edilen düşey hız verilerinin nivelman düşey hız verileri ile karşılaştırılması sonucunda, yakın çevresindeki PS nokta yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerde nokta yoğunluğunun düşük olduğu bölgelere nazaran nivelman hızları ile daha uyumlu sonuçların elde edildiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, bazı noktalarda enterpolasyon LOS değerleri yerine, kombinasyon noktası ile aynı türden yapı üzerinde yer alan ve en yakın mesafede bulunan

artan ya da azalan yörüngeye ait PS noktalarının LOS değerleri kullanıldığında, kombinasyon ile elde edilen sonuçların daha da iyileşerek nivelman değerlerine yaklaştığı görülmüştür. Bu nedenle kombinasyonda en çok kullanılan yöntem, InSAR verilerinden daha yüksek hassasiyetteki nivelman hızları ile daha uyumlu sonuçların elde edildiği Şekil 39-A'da gösterilen yöntem olmuştur. Şekil 39-A'da gösterilen bu örnek aynı zamanda Şekil 35'de gösterilen artan ve azalan G PS noktalarından üretilen kombinasyon noktasını göstermektedir. Yine Şekil 35'de gösterilen aynı işaretli (A, B, D, E, F, I) ve zıt işaretli (C, H, J) PS noktaları ile dolgu sahasında aynı türden yapı üzerinde yer alan birbirine yakın mesafelerdeki artan ve azalan PS noktaları bu şekilde kombine edilmişlerdir. Bu yöntemde artan ve azalan PS noktalarına eşit mesafede bulunan, bunların orta noktasında bir kombinasyon noktası üretilerek, direkt olarak eşleştirilen bu PS noktalarının LOS hız değerleri hesaba katılmaktadır. Bu yöntemde kullanılan artan ve azalan PS noktaları arasındaki mesafeler spor kompleksi üzerinde 0-8 m arasında, dolgu sahasının sol tarafında yer alan yapılaşmamış toprak alan üzerinde ise nokta yoğunluğunun daha düşük olmasından dolayı 0-10 m arasında seçilmiştir. Dolayısı ile oluşturulan kombinasyon noktaları ile en yakınında yer alan PS noktaları arasındaki maksimum mesafeler spor kompleksi ve toprak alan için 4 m ve 5 m olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu yöntemle üretilen kombinasyon noktalarının 393 adeti (%27'si) en yakınındaki artan ve azalan PS noktalarına ≤1 m metre mesafede iken, 906 adeti (%62'si) ≤2 m ve 1313 adeti (%90'ı) ≤3 m mesafededir. Bu mesafeler iki yıllık değerlendirmelerde kullanılan PS noktalarının kombinasyon noktalarına (nivelman noktalarına) olan mesafelerinden genel olarak daha küçüktür. Şekil 39-B'de gösterilen ve kombinasyon nokta üretiminde en çok kullanılan ikinci yöntem ise, genellikle PS nokta yoğunluğunun daha düşük olduğu yapılaşmamış toprak alan ve spor kompleksinin çim alanlarında uygulanmıştır. Bu yöntemle üretilen 489 adet noktanın 264 adeti azalan PS nokta konumlarında azalan PS ile artan enterpolasyon değerleri kullanılarak kombine edilirken, geriye kalan 225 adeti ise artan PS nokta konumlarında artan PS ile azalan enterpolasyon değerleri kullanılarak kombine edilmiştir. Artan ve azalan enterpolasyon LOS hız değerlerini içeren haritalar ise Şekil 40 ve Şekil 41'de gösterilmiştir. Şekil 39-C'de ise iki yıllık değerlendirmelerin devamı niteliğinde olan ve nivelman nokta konumlarında enterpolasyon ve PS değerleri kullanılarak toplam 8 adet üretilen kombinasyon noktalarından, D_{30} numaralı nivelman nokta konumunda artan PS ve azalan enterpolasyon değeri kullanılarak üretilmiş olanı gösterilmiştir. Son olarak Şekil 39-D'de ise artan ve azalan yörüngelere ait yalnızca enterpolasyon değerleri kullanılarak

nivelman nokta konumlarında, artan ya da azalan yörüngeye ait herhangi bir PS noktasının olmadığı bazı bölgelerde ve birden fazla artan ve azalan PS noktasının birbirine yaklaşık aynı mesafelerde yer aldığı bazı bölgelerde oluşturulan 57 adet kombinasyon noktasından Y_{14} numaralı nivelman nokta konumunda üretilen bir tanesi örnek olarak gösterilmiştir.

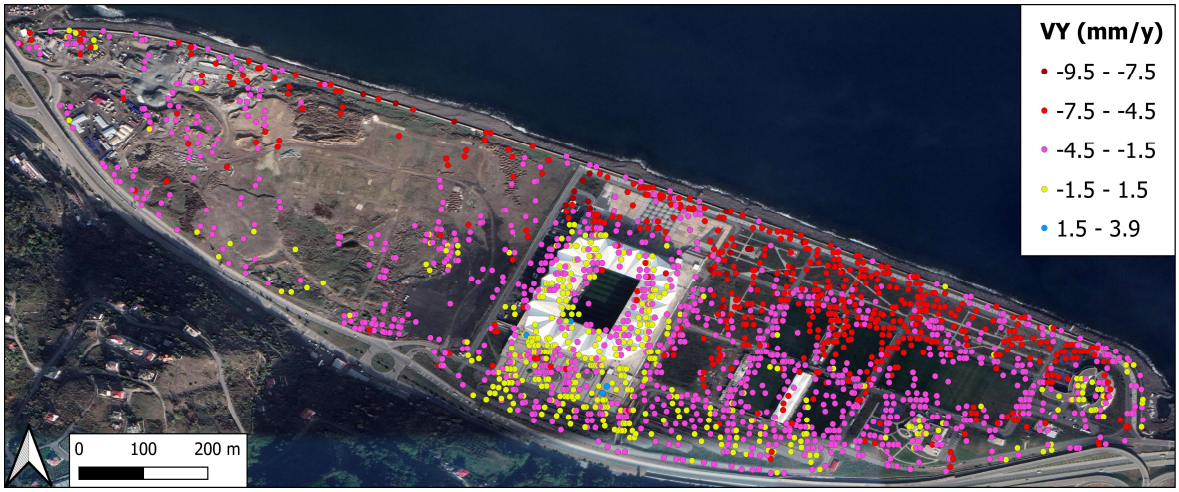


Şekil 40. 20.12.2016–28.01.2020 Artan yörünge LOS enterpolasyon haritası (mm/y)

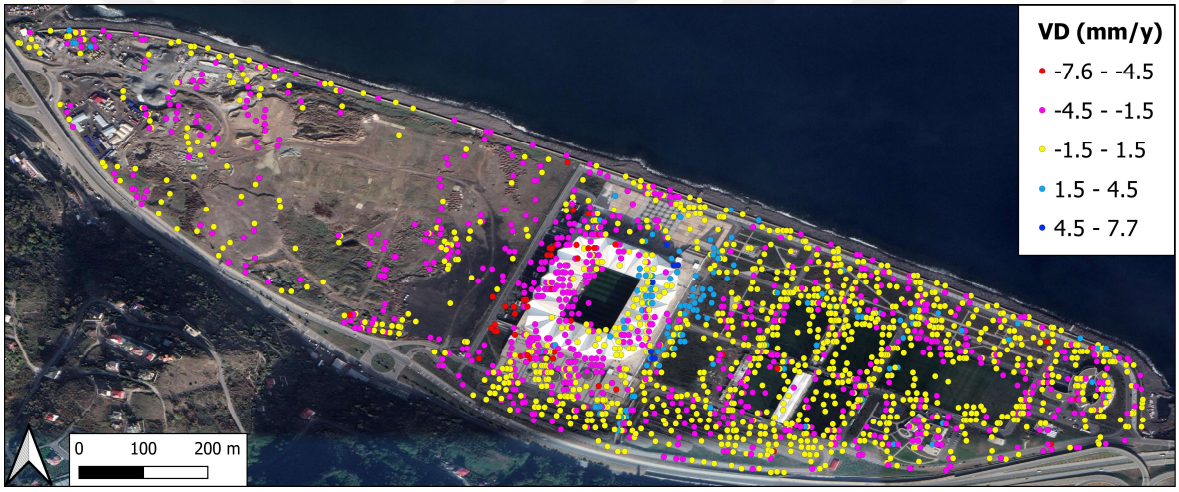


Şekil 41. 20.12.2016–28.01.2020 Azalan yörünge LOS enterpolasyon haritası (mm/y)

Kombinasyon sonucunda üretilen toplam 2011 adet kombinasyon noktasına ait olarak elde edilen yıllık düşey (V_Y) ve yatay (V_D) yer değiştirme oranlarının yer aldığı haritalar ise Şekil 42 ve Şekil 43'de gösterilmiştir.



Şekil 42. 20.12.2016–28.01.2020 Yıllık düşey (V_Y) hız değerleri (mm/y)



Şekil 43. 20.12.2016–28.01.2020 Yıllık yatay (V_D) hız değerleri (mm/y)

Şekil 42'de düşey ya da yukarı eksen üzerindeki yıllık yüzey değişim oranları gösterilmiştir. Negatif değerler çökme ya da aşağı yönlü, pozitif değerler ise yukarı yönlü değişimleri ifade etmektedir. Sırasıyla bordo noktalar -9.5 mm/y ile -7.5 mm/y, kırmızı noktalar -7.5 mm/y ile -4.5 mm/y, pembe noktalar -4.5 mm/y ile -1.5 mm/y, sarı noktalar -1.5 mm/y ile 1.5 mm/y ve mavi noktalar ise 1.5 mm/y ile 3.9 mm/y arasındaki yüzey değişim hız oranlarını ifade etmektedir. Şeklin geneline bakıldığında stadyumun güney tarafında ve membran üzerinde olmak üzere yalnızca 3 adet yükselme hareketi gösteren mavi nokta olduğu, dolgu sahasının genelinin -1.5 mm/y ile -7.5 mm/y arasında çökme hareketi gösteren pembe ve kırmızı noktalar ile çevrili olduğu görülebilmektedir. En büyük çökme oranları -7.5 mm/y ile -9.5 mm/y arasındaki değerler ile Y_{13} nivelman noktasının da

yer aldığı stadyumun kuzeybatı tarafında ve dolgu sahasının batısında yer alan yapılaşmamış alan üzerindeki deniz duvarı üzerinde görülmüştür. Deniz duvarının spor kompleksi tarafında kalan kısmına ve geneline bakıldığında ise, -1.5 mm/y ile -4.5 mm/y arasında çökme oranları gösteren pembe noktaların çoğunlukta olduğu görülmüştür. Ayrıca özellikle dolgu sahasının spor kompleksi tarafında ve genelinde denize yakın olan bölgelerdeki çökme oranlarının, uzak olan bölgelere göre daha fazla olduğu görülebilmektedir. 0'a yakın değerler alan sarı noktaların ise genel olarak dolgu yapılmayan alana yakın olan dolgu sahasının güneyinde ve membran üzerinde yer aldığı görülebilmektedir. Çok küçük bir alan kaplayan membran üzerinde ise, geneli sarı ve pembe noktalardan oluşmak üzere, membranın dengesiz hareketini gösterir nitelikte, birbirine çok yakın mesafelerde değişken değerler alan kırmızı ve sarı noktalar görülmüştür. Artan ve azalan yörünge verilerinin birbirlerinden farklı işarette oldukları stadyumun kuzeydoğu giriş ve batı tarafında yer alan noktaların genel olarak pembe, doğu-güneydoğu tarafında yer alan noktaların ise genel olarak pembe ve sarı renklerde olduğu görülebilmektedir.

Şekil 43'de doğu-batı doğrultusundaki yatay yıllık yüzey değişim oranları gösterilmiştir. Negatif değerler batı yönlü, pozitif değerler ise doğu yönlü hareketi ifade etmektedir. Sırasıyla -7.6 mm/y ile -4.5 mm/y arasındaki değerler kırmızı, -4.5 mm/y ile -1.5 mm/y arasındaki değerler pembe, -1.5 mm/y ile 1.5 mm/y arasındaki değerler sarı, 1.5 mm/y ile 4.5 mm/y arasındaki değerler mavi ve 4.5 mm/y ile 7.7 mm/y arasındaki değerler koyu mavi noktalar ile gösterilmişlerdir. Dolgu sahasındaki noktaların büyük çoğunluğunun 0'a yakın değerler alan sarı noktalar olduğu, bu noktalardan sonra ise en fazla en düşük oranlı batı yönlü hareketi ifade eden pembe noktaların olduğu görülmektedir. En büyük yatay hareket oranları ise, stadyumun yakın çevresinde, özellikle artan ve azalan yörünge verilerinin zıt işaretli ve birbirlerinden en farklı değerleri aldıkları bölgelerde gözlemlenmiştir. Genel olarak stadyumun kuzeydoğu girişi ve doğu tarafında yer alan bölgelerin doğu yönünde hareket ettiği, stadyumun yakın çevresindeki geriye kalan diğer bölgelerin ve de özellikle batısındaki noktaların ise batı yönlü hareket ettiği gözlemlenmiştir. En büyük doğu yönlü hareketler stadyumun kuzeydoğu ve güneydoğu taraflarında 4.5 mm/y ile 7.7 mm/y arasındaki değerler ile küçük alanlar üzerinde gözlemlenirken, stadyumun doğu tarafının genelinin ise 1.5 mm/y ile 4.5 mm/y arasında değişen oranlar ile doğu yönlü hareket ettiği görülmüştür. En büyük batı yönlü hareketler ise özellikle stadyumun batı ve güneybatı taraflarında yoğun bir şekilde ve kuzeybatısında

-1.5 mm/y ile -7.6 mm/y arasında gözlemlenmiştir. Deniz duvarı üzerindeki noktalara bakıldığında ise genel olarak sarı renkli noktaların çoğunlukta olduğu görülebilmektedir. Membran üzerinde ise birbirinden farklı yer değiştirme oranlarına sahip zıt yönlü birçok sayıda noktanın birbirine çok yakın mesafelerde heterojen bir biçimde bulunduğu görülebilmektedir. Bu durum membranın hafif malzemesinden ötürü heterojen ve dengesiz bir biçimde yatay olarak hareket ettiğini göstermektedir. Dolgu sahasının sol tarafında yer alan yapılaşmamış toprak alanda ise -4.5 mm/y ile 1.5 mm/y arasında değerler alan yatay hareketler heterojen bir biçimde gözlemlenmiştir.

Yatay ve düşey yüzey değişim haritaları birlikte değerlendirildiğinde, dolgu sahasında genel olarak yataydan çok çökme şeklinde aşağı yönlü meydana gelen düşey hareketler olduğu anlaşılmaktadır. Düşey hareketi gösteren V_Y haritası ile artan ve azalan PS LOS hız değerlerini gösteren haritalar karşılaştırıldığında, özellikle stadyumun batı tarafında ve aynı zamanda dolgu sahasının genelinde aşağı ve batı yönlü deformasyonları daha iyi algılayan azalan yörünge veri sonuçlarının bölgenin deformasyon oranlarını daha iyi yansıttığı görülmüştür.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Trabzon ilinin Akyazı Beldesinde yer alan Şenol Güneş Spor Kompleksi ve Stadyumu deniz dolgusu üzerine inşa edilen Türkiye'deki ender yapılardan bir tanesidir. Bu türden yüksek maliyetli yapılar üzerindeki yüzey değişimlerinin izlenmesi, bölgede meydana gelebilecek can ve mal kayıplarının önlenmesi ve bölgenin deformasyon davranışları hakkında bilgi sahibi olunması açısından oldukça önemlidir. Dünya genelinde hem dolgu malzemesi hem de üzerindeki yapı çeşitliliğine bağlı olarak, heterojen ve değişken oranlarda deforme olan bu tür yapıların yüzey değişimlerinin doğru ve detaylı bir biçimde ortaya çıkarılabilmesi için noktasal çözünürlüğü yüksek olan ölçme tekniklerinin kullanılması gerekmektedir. Bu bakımdan Sentinel-1 uydu misyonunun kullanıcılara ücretsiz olarak sunduğu kısa zaman aralıklı ve yüksek noktasal çözünürlüğe sahip işlenmiş SAR verileri büyük avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte, çoklu sayıdaki SAR verilerinin değerlendirilmesine dayanan ileri InSAR yöntemlerinden birisi olan StaMPS PSI yöntemi ise, sağladığı yüksek noktasal çözünürlüğü, değişken deformasyonları tespit edebilme becerisi ve diğer ileri InSAR teknikleri gibi kullanılan SAR verilerinin çokluğuna bağlı olarak sağladığı yüksek hassasiyeti ile diğer ölçme yöntemleri içerisinde ön plana çıkmaktadır. StaMPS PSI ya da diğer InSAR teknikleri her ne kadar herhangi bir arazi çalışması gerektirmeyen pratik ve eknomomik yöntemler olsa da, bu yöntemler ile yatay ve düşey hareket bileşenleri direkt olarak elde edilememektedir. Yatay (D-B) ve düşey hareket bileşenlerinin sağlıklı bir biçimde elde edilebilmesi için artan ve azalan uydu yörüngelerine ait LOS hız vektörlerinin kombinasyonunu gerektiren bu yöntemlerde, elde edilen sonuç verilerinin doğruluğu GNSS, nivelman ve doğrultu-kenar ölçüleri gibi diğer jeodezik ölçme yöntemleri ile karşılaştırılarak analiz edilmektedir. Yatay ve düşey hareket bileşenleri içerisinde düşey hareketi tespit edebilme duyarlığı daha yüksek olan bu yöntemlerde, düşey eksen üzerindeki karşılaştırmalar için genel olarak en hassas düşey yüzey değişimi ölçme yöntemi olan nivelman yöntemi kullanılmaktadır. Nivelman ölçüleri aynı zamanda artan ve azalan LOS verileri ile kombine edilerek InSAR ölçülerinin duyarlığının en zayıf olduğu K-G doğrultusundaki hareket bileşenini çözümlemek için de kullanılmaktadır. Bu nedenle bu tez çalışmasında çalışma alanını oluşturan dolgu sahası üzerindeki yatay (D-B, K-G) ve düşey yüzey değişimleri StaMPS PSI yöntemi ve hassas nivelman ölçüleri kullanılarak belirlenmiştir.

Tez çalışması kapsamında yapılan uygulama ve değerlendirmeler iki farklı tarih aralığında gerçekleştirilmiştir. Bunlardan birincisi nivelman ölçüleri ile yapılan karşılaştırma ve kombinasyonları içeren ve yaklaşık olarak iki yıllık süreyi kapsayan 14.01.2018 – 28.01.2020 tarih aralığıdır. İkincisi ise spor kompleksinin açılışından itibaren nivelman ölçülerinin tamamlandığı zamana kadarki yaklaşık üç yıllık süreyi kapsayan 20.12.2016 – 28.01.2020 tarih aralığıdır. Gerçekleştirilen uygulamalarda artan ve azalan yörüngelerden elde edilen toplamda 191 adet Sentinel-1 VV düşey polarizasyonlu IW level-1 SLC SAR görüntüsü kullanılmıştır.

14.01.2018 – 28.01.2020 tarih aralığındaki değerlendirmeler şu sonuçları içermektedir;

- 17.01.2018 ile 28.01.2020 tarihleri arasında yaklaşık altı aylık aralıklar ile 5 periyot olarak gerçekleştirilen hassas nivelman ölçüleri sonucunda periyodik dengeli yükseklikleri 0.1-0.2 mm arasında ortalama hata ile elde edilen dolgu sahasının spor kompleksi üzerinde yer alan nivelman noktaları üzerindeki düşey yüzey değişimleri yıllık hız değerleri olarak belirlenmiştir. Genel olarak alandaki düşey yüzey değişimleri aşağı yönlü çökme şeklinde görülürken, daha fazla dolgu malzemesinin kullanıldığı denize yakın olan nivelman noktalarında daha yüksek, denize uzak olan nivelman noktalarında ise 0'a yakın değerler alan daha küçük oranlarda çökmeler gözlemlenmiştir. Yaklaşık iki yıllık süre içerisinde en büyük düşey yer değiştirme oranları, yakınlarında alandaki en bariz şekilde görülebilen çatlak ve çöküntülerin yer aldığı, Y_{13} ve Y_{14} numaralı nivelman noktalarında -11.1 mm/y ve -9.3 mm/y değerleri ile görülmüştür. Alandaki periyotlar arası en dengeli ya da stabil bir biçimde -0.7 mm/y ile -4.1 mm/y arasında birbirine yakın değerler alarak çöken noktalar deniz duvarı üzerinde bulunan nivelman noktaları olmuştur. En değişken yer değiştirme oranları ile çöken noktalar ise, çatlak ve çöküntülerin yakınlarında yer alan stadyumun batısında bulunan ve kaldırım zemin üzerinde tesis edilen Y_{13}, Y_{14}, Y_{15} ve Y_{16} noktaları olmuştur. Değişken deforme olan bu noktalarda 3-5. Periyot ölçüleri arasındaki ikinci bir yıllık süre için elde edilen çökme oranlarının 1-3. Periyot ölçüleri arasındaki ilk bir yıllık süre için elde edilen çökme oranlarından -2.2 mm/y ile -5 mm/y arasında değişen değerler ile daha büyük olduğu ve zamanla çökme oranlarının arttığı gözlemlenmiştir.
- Sırasıyla 63 ve 62 şer adet SAR görüntülerinin StaMPS PSI yöntemi ile değerlendirilmesi sonucunda üretilen PS noktalarına ait yer değiştirme oranları LOS

yönünde artan yörünge üzerinde -12.5 mm/y ile 7 mm/y ve azalan yörünge üzerinde ise -12.4 mm/y ile 8.4 mm/y arasında elde edilmiştir. Bu yüzey değişimlerinin standart sapma değerleri ise, çoğunluğu 1.5 mm/y değerinin altında olmak üzere, artan yörünge üzerinde 1.2 mm/y ortalama ile 0.5 mm/y ile 2.3 mm/y arasında, azalan yörünge üzerinde ise 1 mm/y ortalama ile 0.4 mm/y ile 2 mm/y arasında elde edilmiştir.

- Büyüklüğü yaklaşık 760000 m^2 (0.76 km^2) olan dolgu sahası üzerinde artan ve azalan yörüngeler üzerinde sırasıyla 5630 ve 5820 adet PS noktası (km^2 başına 7408 ve 7658 adet PS noktası) üretilmiştir. Böylelikle dolgu sahası üzerinde gerçekleştirilen diğer InSAR çalışmaları içerisinde en yüksek PS nokta yoğunluklarından birisi elde edilmiştir. Yüksek nokta yoğunluğuna ulaşılabilmesindeki birinci önemli etken uygulamada dolgu sahasını en fazla sayıda yansıtıcı obje ile temsil eden en iyi görüntülerin seçilmiş olmasıdır. İkinci önemli etken fazla sayıda PS nokta üretiminde başarılı olan StaMPS PSI tekniğinin kullanılması ve üçüncü önemli etken ise başlangıç PS adaylarının seçiminde kullanılan genlik dağılım indeksi eşik değerinin 0.4 yerine 0.6 olarak seçilerek yaklaşık 3 kat fazla PS noktası üretilmesi olmuştur.
- StaMPS PSI tekniği kullanılarak elde edilen artan ve azalan yıllık LOS hız verilerinin ve bunların enterpolasyon değerlerinin kombinasyonu ile nivelman nokta konumlarındaki yatay (D-B) (V_D) ve düşey (V_Y) yıllık yüzey değişimi hız değerleri sırasıyla -3.2 mm/y ile 3.7 mm/y ve -9.1 mm/y ile 0.9 mm/y arasında elde edilmiştir. StaMPS PSI tekniği ile üretilen düşey hız verilerinin, milimetre altı hassasiyetteki hassas nivelman ölçülerinden elde edilen düşey hız verileri (V_y) ile yapılan karşılaştırmaları sonucunda 0.3 mm/y ortalama fark ve 1.2 mm/y standart sapma değerleri ile dünya genelinde dolgu sahası üzerinde yapılan InSAR çalışmaları içerisinde en uyumlu sonuçlardan birisi elde edilmiştir. Bu derecede iyi uyumlu ve hassas sonuçların elde edilmesi genel olarak üç nedene bağlanmıştır. Bunlardan ilki ve en önemlisi artan veya azalan yörünge verilerinden yalnızca birinin düşeye çevrilmesiyle yapılan değerlendirmeler yerine yatay hareketin de hesaba katıldığı her iki yörünge verilerinin kombinasyonundan yararlanılmasıdır. İkincisi, StaMPS PSI tekniğinin yüksek yoğunlukta PS nokta üretiminde başarılı olması ve genlik dağılım indeks değerinin daha yüksek alınmasıyla ($D_A \leq 0.6$), her iki yörüngede de oldukça yüksek yoğunlukta PS nokta kümelerinin ve bu sayede yüksek doğruluktaki

enterpolasyon haritalarının üretilmesidir. Üçüncü nedeni ise her iki yörüngede de fazla sayıda görüntüden oluşan veri setlerinin kullanılması sayesinde yüksek hassasiyetteki LOS hız verilerinin elde edilmesi olarak açıklanmıştır.

- Artan, azalan LOS hız verileri ve nivelman düşey hız verilerinin üçlü kombinasyonu ile nivelman nokta konumlarındaki son iki yıllık K-G doğrultusundaki V_K yatay hız bileşenleri -28.2 mm/y ile 14.6 mm/y arasında elde edilmiştir. Genel olarak -5 mm/y ile 5 mm/y arasındaki 0'a yakın değerler alan ve 5 mm/y ile 14.6 mm/y arasında değerler alarak kuzey yönünde hareket eden noktaların çoğunlukta olduğu görülmüştür. Bununla birlikte en yüksek hız değerleri ise güney yönlü olarak stadyumun yakın çevresinde çatlak ve çöküntülerin bulunduğu batı ve kuzey batı tarafında yer alan Y_{14} (-28.2 mm/y) ve Y_{13} (-13.4mm/y) noktaları ile doğusunda bulunan Y_{32} (-17.8 mm/y) noktalarında görülmüştür. InSAR ölçülerinin yakın kutupsal yörüngeleri nedeni ile K-G doğrultusundaki hareketi ölçme hassasiyetinin düşük olmasından dolayı elde edilen V_K hız değerlerinin V_Y ve V_D değerlerine kıyasla hassasiyetlerinin daha düşük olduğu ifade edilmiştir. En düşük hassasiyetli V_K değerlerinin ise, nivelman hız değerleri ile en düşük uyumluluğun ve en yüksek V_K hız oranlarının görüldüğü Y_{14}, Y_{32} ve B_2 noktalarında olduğu değerlendirmesinde bulunulmuştur.

20.12.2016 – 28.01.2020 tarih aralığındaki değerlendirmeler şu sonuçları içermektedir;

- Sırasıyla 95 ve 96 şar adet SAR görüntülerinin StaMPS PSI yöntemi ile değerlendirilmesi sonucunda üretilen PS noktalarına ait yer değiştirme oranları LOS yönünde artan yörünge üzerinde -7.6 mm/y ile 4.6 mm/y ve azalan yörünge üzerinde ise -9.7 mm/y ile 3.9 mm/y arasında elde edilmiştir. Bu yüzey değişimlerinin standart sapma değerleri ise, çoğunluğu 1 mm/y değerinin altında olmak üzere, artan yörünge üzerinde 0.7 mm/y ortalama ile 0.4 mm/y ile 1.3 mm/y arasında, azalan yörünge üzerinde ise 0.6 mm/y ortalama ile 0.3 mm/y ile 1.3 mm/y arasında elde edilmiştir.
- Hem artan hem de azalan yörünge üzerinde elde edilen üç yıllık sonuçlarda iki yıllık sonuçlara nazaran PS nokta yoğunluğunun daha düşük fakat standart sapma değerlerinin ise daha iyi olduğu görülmüştür. Bunun nedeni; daha geniş zaman aralığını ve görüntü sayısını içeren uygulamalarda, bir yandan daimi yansıtıcı

özelliğini koruyabilen PS noktası üretmenin zorlaşırken, diğer yandan ise veri sayısının artması ile hassasiyetin de artması olarak açıklanmıştır.

- Artan ve azalan yörüngelerin PS noktalarına ve enterpolasyon haritalarına ait LOS yönündeki hız verileri kullanılarak ve toplamda 2011 adet kombinasyon noktası (km^2 başına 2646 nokta) üretilerek dolgu sahasındaki üç yıllık yatay (D-B) ve düşey yüzey değişimi yıllık hız verileri belirlenmiştir. Düşey ve yatay yıllık hız değerleri sırasıyla -9.5 mm/y ile 3.9 mm/y ve -7.6 mm/y ile 7.7 mm/y arasında elde edilmiştir.
- Düşey yıllık hız değerlerine bakıldığında dolgu sahasının genelinde -1.5 mm/y ile -7.5 mm/y arasında değişen oranlarla çökme hareketinin olduğu görülmüştür. En büyük çökme oranları -7.5 mm/y ile -9.5 mm/y arasındaki değerler ile Y_{13} nivelman noktasının ve gözle görülebilen çatlak ve çöküntülerin bulunduğu stadyumun kuzeybatı tarafında ve dolgu sahasının batısında yer alan yapılaşmamış alan üzerindeki deniz duvarı üzerinde görülmüştür. Nivelman noktalarındaki düşey nivelman hız değerlerine benzer bir biçimde, dolgu sahasının özellikle spor kompleksi tarafında ve genelinde denize yakın olan bölgelerdeki çökme oranlarının, uzak olan bölgelere göre daha fazla olduğu ve 0'a yakın değerler alan noktaların genel olarak dolgu sahasının güneyinde yer aldığı görülmüştür. Genel olarak alandaki en homojen ve dengeli çökme oranları deniz duvarının spor kompleksi tarafında -1.5 mm/y ile -4.5 mm/y arasında gözlemlenirken, en heterojen ve değişken oranlar ise stadymun üzerini kaplayan ve hafif malzemesinden dolayı dengesiz bir biçimde hareket eden membran üzerinde gözlemlenmiştir. Hafif malzemesinden dolayı rüzgarın etkisiyle bile hareket edebilen membranın hareketi stadyumun hareketi olarak değerlendirilmemiştir.
- Yatay (D-B) yıllık hız değerlerine bakıldığında dolgu sahasının genelinde -1.5 mm/y ile 1.5 mm/y arasında 0'a yakın yatay hareketlerin olduğu görülmüştür. 0'a yakın değerler haricinde ise en fazla en düşük oranlı batı yönlü hareketi ifade eden -1.5 mm/y ile -4.5 mm/y arasındaki değerler görülmüştür. En büyük yatay hareket oranları ise stadyumun yakın çevresinde özellikle artan ve azalan yörünge verilerinin zıt işaretli ve birbirlerinden en farklı değerleri aldıkları bölgelerde gözlemlenmiştir. Bu hareketler stadyumun kuzeydoğu girişi ve güney doğu taraflarında 4.5 mm/y ile 7.7 mm/y arasındaki değerler ile doğu yönünde ve stadyumun batı ve güneybatı taraflarında ise -4.5 mm/y ile -7.6 mm/y arasındaki değerler ile batı yönünde gözlemlenmiştir. Genel olarak stadyumun doğu tarafının 1.5 mm/y ile 4.5 mm/y

arasında doğu yönünde, batı tarafının ve yakın çevresinde yer alan diğer bölgelerin ise -1.5 mm/y ile -4.5 mm/y arasındaki değerler ile batı yönünde hareket ettiği gözlemlenmiştir. Deniz duvarı üzerindeki noktaların yatay hareketlerinin ise çoğunlukla 0'a yakın değerler aldığı görülmüştür. En heterojen ve dengesiz yatay hareketler ise birbirine çok yakın noktalarda batı ve doğu yönlü hareketlerin görülebildiği membran üzerinde gözlemlenmiştir. Dolgu sahasının sol tarafında yer alan yapılaşmamış toprak alanda ise -4.5 mm/y ile 1.5 mm/y arasında değerler alan yatay hareketler gözlemlenmiştir.

- Yatay (D-B) ve düşey hız değerleri birlikte değerlendirildiğinde, stadyumun yakın çevresi haricinde, dolgu sahasının genelinde yatay hareketten çok çökme şeklinde düşey hareketler olduğu görülmüştür.
- Dolgu sahasının genelinde ve özellikle en büyük çöküntü ve çatlakların bulunduğu stadyumun batı tarafında, batı ve aşağı yönlü hareketlerin bileşkesi olan hareketler azalan yörünge ile daha iyi algılanabildiğinden, azalan yörüngeye ait LOS hız değerlerinin artan yörüngeye nazaran bölgedeki yüzey değişimlerini daha iyi bir biçimde yansıttığı görülmüştür.

InSAR yöntemleri diğer jeodezik yöntemlere nazaran çok daha fazla sayıda nokta üreterek çalışma alanında meydana gelen yüzey değişimlerinin daha detaylı bir biçimde ortaya çıkarılmasını sağlayan, daha pratik ve daha ekonomik yöntemlerdir. Fakat bu yöntemler ile yatay ve düşey hareketler direkt olarak belirlenemez. Yatay (D-B) ve düşey hareket bileşenlerinin doğru tahmin edilebilmesi artan ve azalan yörüngelerden elde edilen LOS hız vektörlerinin doğruluğuna ve PS noktalarının yoğunluğuna bağlıdır. Ayrıca yalnızca tek bir uydu misyonunun artan ve azalan yörüngelerine ait verilerin kullanılması ile K-G doğrultusundaki yatay hareket bileşeninin belirlenmesi genellikle mümkün değildir. Bu nedenle InSAR yöntemlerinin tek başına kullanılması, diğer jeodezik ölçme yöntemlerine duyulan ihtiyacı ortadan kaldırmaz. Hem InSAR yöntemleri ile elde edilen yatay ve düşey hareket verilerinin doğruluğunun analiz edilmesi, hem de K-G doğrultusundaki hareket bileşenlerinin çözümlenmesi için, nivelman, GNSS veya doğrultu-kenar ölçüleri gibi diğer jeodezik yöntemler ile eş zamanlı olarak elde edilecek verilerin kullanılması gerekmektedir.

Dünya genelindeki InSAR çalışmalarının büyük çoğunluğu artan ya da azalan yörüngelerden yalnızca birisine ait verilerin değerlendirilmesi şeklinde gerçekleştirilen

çalışmalardır. Yalnızca tek bir yörünge verilerinin kullanılarak LOS yönündeki değişimlerin izleneceği çalışmalarda, çalışma alanındaki genel olarak ortaya çıkarılmak istenen hareketin yönü bilinmeli ve bu hareketi daha iyi ortaya çıkartabilecek yörünge verileri seçilmelidir. Örnek vermek gerekirse; aşağı ve batı yönlü veya yukarı ve doğu yönlü bir hareket bekleniyorsa azalan yörünge verileri, aşağı ve doğu yönlü veya yukarı ve batı yönlü bir hareket bekleniyorsa artan yörünge verileri kullanılmalıdır. Hareket yalnızca düşey yönlü ise bu durumda artan ya da azalan verilerin kullanılması fark etmeyecektir. Bölgedeki hareket yönlerinin ve de özellikle yatay hareket yönünün genel olarak bilinebilmesi için bölgede yapılan gözlemlerden ve diğer jeodezik ölçme yöntemleri ile elde edilen bulgulardan faydalanılabilineceği gibi, her iki yörünge için belirlenen LOS yönündeki hız verilerinin karşılaştırılmasından da faydalanılabilinir. Böylelikle tek bir yörüngeye ait verilerin değerlendirileceği çalışmalarda, uygun olan yörünge verileri kullanılarak alandaki yüzey değişim oranları daha iyi bir şekilde yansıtılmalıdır.

5. KAYNAKLAR

Abdikan, S., 2007. SAR Görüntülerinden Üretilen İnterferometrik ve Stereo Sayısal Yükseklik Modellerinin Kalitesinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi (yayımlanmamış), Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Abdikan, S., 2012. Monitoring Of Land Surface Subsidence in Zonguldak Coal Mining Field in The Northern Turkey Using Multi Temporal Sar Interferometry, PhD. Thesıs, Yıldız Technical Unıversity, Graduate School Of Natural And Applied Scıences, İstanbul.

Adam, N., Kampes, B. ve Eineder, M., 2005. Development of a scienti_c permanent scatterer system: Modi_cations for mixed ERS/ENVISAT time series, European Space Agency, (Special Publication) ESA SP, 572, 457-465.

Akçın, H., Deguchi, T., Kutoğlu, H. S., Kemaldere, H., Oruç, M., Karakıs, S. ve Görmüs, K. S., 2007. Interforemetrik SAR ve GPS Kombinasyonu ile Madencilikten Kaynaklanan Yüzey Deformasyonlarının Belirlenmesi. 11. Türkiye Bilimsel Harita ve Teknik Kurultayı, Nisan, Ankara, Bildiriler Kitabı: 34.

Altıntaş, F., 2014. Gümüşhane – Trabzon Hattı Boyunca Yerkabuğu Hareketlerinin GNSS Verileri ile İzlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gümüşhane.

Altintas, F. ve Gokalp, E., 2021. Monitoring surface deformations of the reclamation site using PS interferometry: Senol Gunes sport complex (Turkey), Geocarto International, 1-15. DOI: 10.1080/10106049.2021.1967466.

Antonielli, B., Monserrat, O., Bonini, M., Cenni, N., Devanthéry, N., Righini, G. ve Sani, F., 2016. Persistent Scatterer Interferometry analysis of ground deformation in the Po Plain (Piacenza-Reggio Emilia sector, Northern Italy): seismo-tectonic implications. Geophysical Journal International. 206, 2, 1440–1455.

Aobpaet, A., Cuenca, M. C., Hooper, A. ve Trisirisatayawong, I., 2013. InSAR time-series analysis of land subsidence in Bangkok, Thailand, International Journal of Remote Sensing, 34, 8, 2969–2982.

Aydöner, C. ve Maktav, D., 2006. Uydu ve Yersel Veri Entegrasyonu ile Deprem Sonrası Arazi Örtüsü/Kullanımı Analizi. İTÜ Dergisi, 5, 2.

Aslan, G., Cakir, Z., Lasserre, C. ve Renard, F., 2019. Investigating Subsidence in the Bursa Plain, Turkey, Using Ascending and Descending Sentinel-1 Satellite Data, Remote Sensing, 11, 1, 85.

Aslan, G., Foumelis, M., Raucoules, D., Michele, M. D., Bernardie, S. ve Cakir, Z., 2020. Landslide Mapping and Monitoring Using Persistent Scatterer Interferometry (PSI) Technique in the French Alps, Remote Sensing, 12, 8, 1305.

Awasthi, S., Jain, K., Mishra, V. ve Kumar, A., 2022. An approach for multi-dimensional land subsidence velocity estimation using time-series Sentinel-1 SAR datasets by applying persistent scatterer interferometry technique, Geocarto International, 37, 9, 2647-2678.

Aygar, E. B. ve Gokceoglu, C., 2021. An assessment on the inner lining need for a large-span tunnel (a case from Turkey, Akyazı Tunnel, Trabzon), SN Applied Sciences, 3, 457.

Balık, S. F., 2004. Elektro-Optik ve Sar Uydu Görüntüleri ile Arazi Bitki Örtüsünün Belirlenmesi, Doktora tezi (yayımlanmamış), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Bamler, R. ve Hartl, P., 1998. Synthetic aperture radar interferometry., Inverse Problems, 14, R1-R54.

Bayik, C. ve Abdikan, S., 2021. Monitoring of small-scale deformation at sea-filled Ordu-Giresun Airport, Turkey from multi-temporal SAR data, Engineering Failure Analysis, 130, 105738.

Bayrak, T., 2003. Heyelanlar İçin Bir Dinamik Deformasyon ve Bir Dinamik Hareket Yüzeyi Modelinin Oluşturulması, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Bekaert, D. P. S., Walters, R. J., Wright, T. J., Hooper, A. ve Parker, D. J., 2015. Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques. Remote Sensing of Environment, 170, 40-47.

Bektaş, O., 2019. Düşük Performanslı Akyazı Dolgusu ve Deforme Olan Akyazı Spor Tesisi, Haber61. https://www.haber61.net/dusuk-performansli-akyazi-dolgusu-ve-deforme-olan-akyazi-spor-tesisi-makale,3965.html 2 Mart 2019.

Berardino P., Fornaro G., Lanari R. ve Sansosti, E., 2002. A new Algorithm for Surface Deformation Monitoring based on Small Baseline Differential SAR Interferograms, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40, 2375-2383.

Blanco-Sanchez, P., Mallorquí, J. J., Duque, S. ve Monells, D., 2008. The Coherent Pixels Technique (CPT): An Advanced Dinsar Technique For Nonlinear Deformation Monitoring, Pure and Applied Geophysics, 165, 6, 1167–1193.

Blasco, J. M. D., Foumelis, M., Stewart, C. ve Hooper, A., 2019. Measuring Urban Subsidence in the Rome Metropolitan Area (Italy) with Sentinel-1 SNAP-StaMPS Persistent Scatterer Interferometry, Remote Sensing, 11, 2, 129.

Borgia, A., Tizzani, P., Solaro, G., Manzo, M., Casu, F., Luongo, G., Pepe, A., Berardino, P., Fornaro, G., Sansosti, E., Ricciardi, G. P., Fusi, N., Di Donna, G. ve Lanari, R., 2005. Volcanic spreading of Vesuvius, a new paradigm for interpreting its volcanic activity. Geophysıcal Research Letters, 32, 3, 1-4.

Burgmann, R., Rosen, P. A. ve Fielding, E. J., 2000. Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earths Surface Topography and Its Deformation, Annual Review of Earth &Planetary Sciences, 28, 169–209.

Cagatay, N., D. ve Datcu, M., 2015. FrFT-Based Scene Classification of Phase-Gradient InSAR Images and Effective Baseline Dependence, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 12, 5, 1131-1135.

Calabro, M. D., Schmidt, D. A. ve Roering, J. J., 2010. An examination of seasonal deformation at the Portuguese Bend landslide, southern California, using radar interferometry, Journal Of Geophysıcal Research, 115, F02020, 1-10.

Canaslan, F., 2010. Insar Yöntemiyle Düşey Yönlü Yüzey Deformasyonlarının Belirlenmesi: Konya Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Canaslan, F., 2016. Farklı Yeryüzü Özelliklerinde İleri Insar Teknikleri Kullanılarak Yüzey Deformasyonlarının Belirlenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Caro Cuenca, M., Hanssen, R. F., Hooper, A. ve Arikan, M., 2011. Surface Deformation of the Whole Netherlands After PSI Analysis, In Proceedings of the Fringe 2011 Workshop, September, Frascati, Italy, Bildiri Kitabı: 1–8.

Casu F., Manzo, M., ve Lanari, R., 2006. A Quantitative Assessment of the SBAS Algorithm Performance For Surface Deformation Retrieval From DInSAR Data, Remote Sensing of Environment, 102, 195-210.

Catalao, J., Nico, G., Hanssen, R. ve Catita, C., 2011. Merging GPS and Atmospherically Corrected InSAR Data to Map 3-D Terrain Displacement Velocity, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 49, 2354–2360.

Chaussard, E., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E. ve Amelung, F., 2014. Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series. Remote Sensing of Environment, 140, 94–106.

Chen, M., Tomás, R., Li, Z., Motagh, M., Li, T., Hu, L., Gong, H., Li, X., Yu, J. ve Gong, X., 2016. Imaging Land Subsidence Induced by Ground Water Extraction in Beijing (China) Using Satellite Radar Interferometry. Remote Sensing, 8, 6, 468–489.

Costantini, M., Falco, S., Malvarosa, F. ve Minati, F., 2008. A New Method For Identification and Analysis of Persistent Scatterers in Series of SAR İmages,

IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Bildiriler Kitabı II: 449-452.

Costantini, M., Malvarosa, F. ve Minati, F., 2012. A general formulation for redundant integration of finite differences and phase unwrapping on a sparse multidimensional domain, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 50, 3, 758–768.

Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C. ve Rocca, F., 2003. Monitoring Landslides and Tectonic Motions with Permanent Scatterers Technique. Engineering Geology, 68, 1, 3-14.

Colesanti, C. ve Wasowksi, J., 2006. Investigating Landslides with Satellite Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry. Engineering Geology, 88, 3-4, 173-199.

Crosetto, M., Arnaud, A., Duro, J., Biescas, E. ve Agudo, M., 2003. Deformation Monitoring Using Remotely Sensed Radar Interferometric Data, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Mayıs, Santorini, Greece, Bildiri Kitabı:1-8.

Crosetto, M., Biescas, E., Duro, J., Closa, J. ve Arnaud, A., 2008. Generation of Advanced ERS And Envisat Interferometric SAR Products Using The Stable Point Network Technique, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 74, 4, 443–450.

Çakır, Z., 2003. Analysis Of The Crustal Deformation Caused By The 1999 Marmara Earthquake Sequence Using Synthetic Aperture Radar Interferometry. PhD Thesis (unpublished), ITU Instıtute of Scıence and Technology and Instıtut De Physıque DuGlobe De Paris.

De Zan, F. ve Guarnieri, A. M., 2006. TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44, 9, 2352-2360.

Du, W., Ji, W., Xu, L. ve Wang, S., 2020. Deformation Time Series and Driving-Force Analysis of Glaciers in the Eastern Tienshan Mountains Using the SBAS InSAR Method, Int. J. Environ. Res. Public Health, 17, 8, 2836.

Dirscherl, M. ve Rossi, C., 2018. Geomorphometric Analysis of the 2014–2015 Barbarbunga Volcanic Eruption, Iceland, Remote Sensing of Environment, 204, 244–259.

Dong, S., Samsonov, S., Yin, H., Ye, S. ve Cao, Y., 2014. Time-series Analysis of Subsidence Associated with Rapid Urbanization in Shanghai, China Measured with SBAS InSAR Method, Environmental Earth Sciences, 72, 3, 677–691.

Doğru A. ve Özener H., 2011. GPS ve InSAR İle Yer Değiştirmelerin Belirlenmesi, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 13. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Nisan, Ankara, Bildiri Kitabı: 1-5.

Erol, S., Erol, B. ve Ayan, T., 2005. Analyzing the Deformations of a Bridge Using GPS and Levelling Data, Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles: IAG Symposium, March, Jaén, Spain, 131, 244-253.

Eriksen, H. O., Lauknes, T. R., Larsen, Y., Corner, G. D., Bergh, S.G., Dehls, J. ve Kierulf, H. P., 2017. Visualizing and Interpreting Surface Displacement Patterns on Unstable Slopes Using Multi-Geometry Satellite SAR Interferometry (2D InSAR), Remote Sensing of Environment, 191, 297–312.

Erten, E., Reigber, A. ve Hellwich, O., 2010. Generation of three-dimensional deformation maps from InSAR data using spectral diversity techniques, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65, 4, 388–394.

Erten, E., 2013. Glacier Velocity Estimation by Means of a Polarimetric Similarity Measure, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 51, 6, 3319–3327.

Erten, E. ve Rossi, C., 2019. The worsening impacts of land reclamation assessed with Sentinel-1: The Rize (Turkey) test case, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 74, 57-64.

ESA Sentinel-1 Team, 2013. Sentinel-1 User Handbook, GMES-S1OP-EOPG-TN-13-0001. https://sentinel.esa.int/.

Eshagh, M. ve Zoghi, S., 2016. Local error calibration of EGM08 geoid using GNSS/levelling data, Journal of Applied Geophysics, 130, 209-217.

Farina, P., Colombo, D., Fumagalli, A., Marks, F. ve Moretti, S., 2006. Permanent Scatterers for Landslides Investigations: Outcomes from the ESA-SLAM Project, Engineering Geology, 88, 3-4, 200-217.

Feng, W., Li, Z., Hoey, T., Zhang, Y., Wang, R., Samsonov, S., Li, Y. ve Xu, Z., 2014. Patterns and Mechanisms of Coseismic and Postseismic Slips of the 2011 MW 7.1 Van (Turkey) Earthquake Revealed by Multiplatform Synthetic Aperture Radar Interferometry, Tectonophysics, 632, 188–198.

Ferretti, A., Prati, C., ve Rocca, F., 1999. Non-Uniform Motion Monitoring Using The Permanent Scatterers Technique, in Proc. 2nd Int. Workshop ERS SAR Interferometry, FRINGE, Kasım, Liège, Belgium, Bildiri Kitabı: 1–6.

Ferretti, A., Prati, C. ve Rocca, F., 2000. Non-linear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38, 5, 2202- 2212.

Ferretti, A., Prati, C. ve Rocca, F., 2001. Permanent Scatterers in SAR Interferometry, IEEE Trans.on Geoscience and Remote Sensing, 39, 1, 8-20.

Ferretti, A., Novali, F., Bürgmann, R., Hilley, G., ve Prati, C., 2004. InSAR Permanent Scatterer Analysis Reveals Ups and Downs in the San Francisco Bay Area, Eos Transactions American Geophysical Union, 85, 34, 317-324.

Ferretti, A., Savio, G., Barzaghi, R., Borghi, A., Musazzi, S., Novali, F., Prati, C. ve Rocca, F., 2007a. Submillimeter Accuracy of InSAR Time Series: Experimental Validation, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 45, 5, 1142.

Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C. ve Rocca, F., 2007b. InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation, ESA Publications, Noordwijk, The Netherlands.

Ferretti, A., Novali, F., Fumagalli, A., Prati, C., Rocca, F. ve Rucci, A., 2009. Beyond PSInSAR: the SqueeSAR approach, in AGU Fall. Meet., Abstracts, 1, 02.

Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F. ve Rucci, A., 2011. A New Algorithm For Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR, Geosci. Remote Sens. IEEE Trans., 49, 9, 3460–3470.

Fialko, Y., Simons, M. ve Agnew, D., 2001. The Complete (3-D) Surface Displacement Field in the Epicentral Area of the 1999 MW 7.1 Hector Mine Earthquake, California, from space geodetic observations. Geophys Res Lett., 28, 3063–3066.

Fugro Sial Yerbilimleri Müşavirlik ve Mühendislik, 2012. Akyazı Tüneli Proje Raporu, Fugro Sial Şti. (yayınlanmamış), 384s.

Fuhrmann, T. ve Garthwaite, M. C., 2019. Resolving Three-Dimensional Surface Motion with InSAR: Constraints from Multi-Geometry Data Fusion, Remote sensing, 11, 3, 241.

Fuhrmann, T., Caro Cuenca, M., Knöpfler, A., Van Leijen, F. J., Mayer, M., Westerhaus, M., Hanssen, R. F. ve Heck, B., 2015. Estimation of Small Surface Displacements in the Upper Rhine Graben Area From a Combined Analysis of PS-InSAR, levelling and GNSS data, Geophys. J. Int., 2015, 203, 614–631.

Foumelis, M., 2018. Vector-based approach for combining ascending and descending persistent scatterers interferometric point measurements, Geocarto International, 33, 1, 38-52.

Gabriel, A. K., Goldstein, R. M. ve Zebker, H. A., 1989. Mapping Small Elevation Changes Over Large Areas: Differential Radar Interferometry, Journal of Geophysical Research, 94, B7, 9183-9191.

Gao, M., Gong, H., Chen, B., Zhou, C., Chen, W., Liang, Y., Shi, M. ve Si, Y., 2016. InSAR time-series investigation of long-term ground displacement at Beijing Capital International Airport, China, Tectonophysics, 691, 271-281.

Ge, L., Cheng, E., Li, X. ve Rizos, C., 2003. Quantitative subsidence monitoring: the integrated InSAR, GPS and GIS approach. The 6th International Symposium on Satellite Navigation Technology Including Mobil Positioning & Location Services, Temmuz, Melbourne, Australia, Bildiri Kitabı: 1-13.

Gens, R. ve Van Genderen, J. L., 1996. SAR Interferometry: Issues, Techniques, Applications, International Journal of Remote Sensing, 17, 1803–1835.

Goldstein, R. M. ve Werner, C. L., 1998. Radar interferogram filtering for geophysical applications, Geophys. Res. Lett., 25, 21, 4035-4038.

Gourmelen, N., Amelung, F. ve Lanari, R., 2010. Interferometric Synthetic Aperture Radar–GPS Integration: Interseismic Strain Accumulation Across the Hunter Mountain Fault in the Eastern California shear zone, J Geophys Res., 115, B9.

Graham, L. C., 1974. Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping, Proceedings of IEEE, 62, 6, 763-768.

Grenerczy, G. ve Wegmüller, U., 2013. Deformation Analysis of a Burst Red Mud Reservoir Using Combined Descending and Ascending Pass ENVISAT ASAR Data, Nat Hazards, 65, 2205–2214.

Guneriussen, T., Høgda, K. A., Johnsen, H. ve Lauknes, I., 2001. InSAR for Estimation of Changes in Snow Water Equivalent of Dry Snow, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39, 10, 2101–2108.

Güllü, M., 1998. GPS ve Yersel Gözlemlerin Birlikte Dengelenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Güven, H., 1993. Doğu Karedeniz Bölgesi'nin 1/100.000 ölçekli Harita ve Jeoloji Raporu, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.

Hanssen, R., 2001. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Springer, New York.

Hastaoglu, K. O., 2016. Comparing the results of PSInSAR and GNSS on slow motion landslides, Koyulhisar, Turkey, Geomatics, Natural Hazards and Risk, 7, 2, 786-803.

Hilley, G. E., Burgmann, R., Ferretti, A., Novali, F. ve Rocca, F., 2004. Dynamics of Slow-Moving Landslides from Permanent Scatterer Analysis, Science, 304, 5679, 1952-1955.

Hooper, A., Zebker, H., Segall, P. ve Kampes, B., 2004. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers, Geophysical Research Letters, 31, 23, 1-5.

Hooper, A. J., 2006. Persistent Scatterer Radar Interferometry for Crustal Deformation Studies And Modeling of Volcanic Deformation, PhD Thesis, Stanford University, Stanford, CA.

Hooper, A. ve Zebker, H. A., 2007. Phase unwrapping in three dimensions with application to InSAR time series, Journal of the Optical Society of America A, 24, 9, 2737–2747.

Hooper, A., Segall, P. ve Zebker, H., 2007. Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcan Alcedo, Galapagos, Journal of Geophysical Research, 112, B7, 1-21.

Hooper, A., 2008. A multitemporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches, Geophysıcal Research Letters, 35, 16, 1-5.

Hooper, A., 2010. A statistical-cost approach to unwrapping the phase of insar time series, European Space Agency (Special Publication) ESA, SP-677.

Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K. ve Arıkan, M., 2012. Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation, Tectonophysics, 514, 1–13.

Hooper, A., Bekaert, D. ve Spaans, K., 2013. StaMPS/MTI Manual, (Version 3.3b1), School of Earth and Environment, University of Leeds, Leeds.

Hooper, A. J., Bekaert, D., Hussain, E. ve Spaans, K., 2018. StaMPS/MTI Manual, (Version 4.1b), School of Earth and Environment, University of Leeds, UK.

Höser, T., 2018. Analysing the Capabilities and Limitations of InSAR Using Sentinel-1 Data for Landslide Detection and Monitoring, MSc Thesis, Bonn University, Bonn.

Hu, J., Zhu, J. J., Li, Z. W., Ding, X. L., Wang, C. C. ve Sun, Q., 2011. Robust Estimating Three-Dimensional Ground Motions from Fusion of InSAR and GPS Measurements. In Proceedings of the 2011 International Symposium on Image and Data Fusion, Ağustos, Tengchong, China, Bildiri Kitabı: 1–4.

Hu, J., Li, Z. W., Ding, X. L., Zhu, J. J., Zhang, L. ve Sun, Q., 2014. Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements, Earth-Science Reviews, 133, 1–17.

Hu, B., Wang, H. S., Sun, Y. L., Hou, J. G. ve Liang, J., 2014. Long-Term Land Subsidence Monitoring of Beijing (China) Using The Small Baseline Subset (SBAS) Technique. Remote Sensing, 6, 5, 3648–3661.

Hu, B., Chen, J. ve Zhang, X., 2019. Monitoring the Land Subsidence Area in a Coastal Urban Area with InSAR and GNSS, Sensors, 19, 14, 3181.

Janssen, V., 2003. GPS-derived tropospheric delay corrections to differential InSAR results. Proceedings ION GPS/GNSS, September, Portland, Oregon, USA, 2692-2704.

Jiang, L. ve Lin, H., 2010. Integrated analysis of SAR interferometric and geological data for investigating long-term reclamation settlement of Chek Lap Kok Airport, Hong Kong, Engineering Geology, 110, 77–92.

Jiang, L., Lin, H. ve Cheng, S., 2011. Monitoring and assessing reclamation settlement in coastal areas with advanced InSAR techniques: Macao city (China) case study, International Journal of Remote Sensing, 32, 13, 3565-3588.

Juan, A. S., Pujades, E., Sune, E.V., Crosetto, M. ve Gonzalez, M. C., 2017. Leveling vs. InSAR in urban underground construction monitoring: Pros and cons. Case of la sagrera railway station (Barcelona, Spain), Engineering Geology, 218, 1–11.

Kampes, B. M., 2005. Displacement Parameter Estimation Using Permanent Scatterer Interferometry, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Delft, Holland.

Kampes, B. M., 2006. Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique, Remote Sensing and Digital Image Processing, vol. 12, 232p, Springer.

Kara, H. H., 1998. İteratif Uyuşumsuz Ölçü Belirleme Yöntemleri ve Kararlı Yapıdaki Jeodezik Ağlarda Davranışları, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Kemaldere, H., 2011. Sehir Altı Madenciliği ve Tasman Etkilerinin Diferansiyel Insar Tekniği ile Belirlenmesi: Zonguldak Metropolitan Alanı Örneği, Doktora Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.

Konak, H., 1994. Yüzey Ağlarının Optimizasyonu, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Köksal, E., 2011. Yüzey Deformasyonlarının Diferansiyel Insar Tekniği İleBelirlenmesi: İsmetpaşa Örneği, Doktora Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.

Kuang, S., 1996. Geodetic Network Analysis and Optimal Design, Ann Arbor Press, Inc., ISBN 1-57504-044-1.

Kuehn, F., Albiol, D., Cooksley, G., Duro, J., Granda, J., Haas, S., Hoffmann-Rothe, A. ve Murdohardono, D., 2010. Detection of land subsidence in Semarang, Indonesia, using stable points network (SPN) technique, Environmental Earth Sciences, 60, 5, 909–921.

Kurt, O., 1996. GPS Ölçülerinin Değerlendirildiği Üç Boyutlu Jeodezik Ağlarda Duyarlık ve Güven Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Lanari, R., Casu, F., Manzo, M., Zeni, G., Berardino, P., Manunta, M. ve Pepe, A., 2007a. An Overview of the Small BaselineSubsetAlgorithm: A DInSAR Technique for Surface Deformation Analysis, Pure and Applied Geophysics, 164, 4, 637–661.

Lanari, R., Casu, F., Manzo, M., Zeni, G., Berardino, P., Manunta, M. ve Pepe, A. 2007b. An Overview of the Small BAseline Subset Algorithm: A DInSAR Technique for Surface Deformation Analysis. In Deformation and Gravity Change: Indicators of Isostasy, Tectonics, Volcanism, and Climate Change, Birkhäuser, Basel, Switherlands, 637–661.

Lauknes, T. R., 2004. Long-term surface deformation mapping using small-baseline differential SAR interferograms, MSc Thesis, University of Tromsø, Tromsø.

Liu, D., Shao, Y., Liu, Z., Riedel, B., Sowter, A., Niemeier, W. ve Bian, Z., 2014. Evaluation of InSAR and TomoSAR for Monitoring Deformations Caused by Mining in a Mountainous Area with High Resolution Satellite-Based SAR, Remote Sensing, 6, 2, 1476–1495.

Lundgren, P., Casu, F., Manzo, M., Pepe, A., Berardino, P., Sansosti, E. ve Lanari, R., 2004. Gravity and magma induced spreading of Mount Etna volcano revealed by satellite radar interferometry, Geophysical Research Letters, 31, 4, 1-4.

Luo, Q., Perissin, D., Lin, H., Zhang, Y. ve Wang, W., 2014. Subsidence Monitoring of Tianjin Suburbs by TerraSAR-X Persistent Scatterers Interferometry, in IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, May, 7, 5, 1642–1650.

Lyons, S. ve Sandwell, D., 2003. Fault Creep Along the Southern San Andreas from Interferometric Synthetic Aperture Radar, Permanent Scatterers, and Stacking, Journal Of Geophysıcal Research, 108, B1, 2047-2070.

Madsen, S. N. ve Zebker, H. A., 1998. Imaging Radar Interferometry, JPL Manual of Remote Sensing, New York, 359-380.

Maghsoudi, Y., Van Der Meer, F. D., Hecker, C., Perissin, D. ve Saepuloh, A., 2018. Using PS-InSAR to Detect Surface Deformation in Geothermal Areas of West Java in Indonesia, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 64, 386-396.

Manzo, M., Ricciardi, G. P., Casu, F., Ventura, G., Zeni, G., Borgström, S., Berardino, P., Del Gaudio, C. ve Lanari, R., 2006. Surface Deformation Analysis in the Ischia Island (Italy) Based on Spaceborne Radar Interferometry, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 151, 4, 399–416.

Massonnet, D. ve Feigl, K. L., 1998. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface, Reviews of Geophysics, 36, 4, 441-500.

Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K. ve Rabaute, T., 1993. The Displacement Field of Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry, Nature, 364, 138-142.

Milillo, P., Giardina, G., De Jong, M. J., Perissin, D. ve Milillo, G., 2018. Multi-Temporal InSAR Structural Damage Assessment: the London Crossrail Case Study, Remote Sensing, 10, 2, 287.

Motagh, M., Shamshiri, R., Haghighi, M. H., Wetzel, H-U., Akbari, B., Nahavandchi, H., Roessner, S. ve Arabi, S., 2017. Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements, Engineering Geology, 218, 134–151.

Nas, M., 2013. Trabzon Akyazı Sahil Dolgu Alanı Zeminlerinde Sismik Kaynaklı Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Niemeier, W., 1992. Potential of Global Positioning System (GPS) for Local Deformation Studies, 6th FIG Symposium on Deformation Measurements, Hannover, Germany.

Ng, A. H-M., Ge, L., Zhang, K. ve Li, X., 2012a. Estimating horizontal and vertical movements due to underground mining using ALOS PALSAR, Engineering Geology, 143, 18–27.

Ng, A. H-M., Ge, L., Li, X., Abidin, H. Z., Andreas, H. ve Zhang, K., 2012b. Mapping land subsidence in Jakarta, Indonesia using persistent scatterer interferometry (PSI) technique with ALOS PALSAR, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 18, 232–242.

Osmanoğlu, B., Dixon, T. H., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E. ve Jiang, Y., 2011. Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 13, 1, 1-12.

Osmanoğlu, B., Sunar, F., Wdowinski, S. ve Cabral-Cano, E., 2016. Time series analysis of InSAR data: Methods and trends, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 115, 90–102.

Öztürk, E. ve Şerbetçi, M., 1992. Dengeleme Hesabı, K.T.Ü. Basımevi, Cilt III, Trabzon.

Perissin, D. ve Wang, T., 2012. Repeat-pass SAR Interferometry With Partially Coherent Targets, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 50, 1, 271–280.

Pinel, V., Poland, M. ve Hooper, A., 2014.Volcanology: Lessons learned from Synthetic Aperture Radar Imagery, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 289, 81 – 113.

Plank, S., 2014. Rapid Damage Assessment by Means of Multi-Temporal SAR: A Comprehensive Review and Outlook to Sentinel-1, Remote Sensing, 6, 4870–4906.

Quarzeddine, M., 2002. Generation of Digital Terrain Models Using Polarimetric SAR Interferometry, Master Thesis, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Enschede, Netherlands.

Rodriguez, E., ve Martin, J. M., 1992. Theory and design of interferometric synthetic aperture radars, IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing), 139, 2, 147–159.

Rogers, A. E. E. ve Ingalls, R. P. 1969. Venus: Mapping the Surface Reflectivity by Radar Interferometry, Science, 165, 797-799.

Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F. K., Madsen, S. N., Rodriguez, E. ve Goldstein, R. M., 2000. Synthetic Aperture Radar Interferometry, Proceedings of the IEEE, 88, 3, 333-382.

Ruch, J., Manconi, A., Zeni, G., Solaro, G., Pepe, A., Shirzaei, M., Walter, T. R. ve Lanari, R., 2009. Stress transfer in the Lazufre volcanic area, central Andes, Geophysical Research Letters, 36, 22, 303.

Samsonov, S. ve Tiampo, K., 2006. Analytical optimization of a DInSAR and GPS dataset for derivation of three-dimensional surface motion, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 3, 1, 107–111.

Schunert, A. ve Soergel, U., 2016. Assignment of persistent scatters to buildings, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 54, 6, 3116–3127.

Serco Italia SPA, Land Subsidence with Sentinel-1 using SNAP (version 1.2), RUS Lectures at https://rus-copernicus.eu/portal/the-rus-library/learn-by-yourself/ Haziran 2018.

Shugar, D. H., Rabus, B. T., Clague, J. J., ve Capps, D. M., 2012. The response of Black Rapids Glacier, Alaska, to the Denali earthquake rock avalanches, Journal of Geophysical Research, 117, F1.

Solari, L., Ciampalini, A., Raspini, F., Bianchini, S. ve Moretti, S., 2016. PSInSAR Analysis in the Pisa Urban Area (Italy): A Case Study of Subsidence Related to Stratigraphical Factors and Urbanization, Remote Sensing, 8, 2, 120.

Sousa, J. J., Ruiz, A. M., Hanssen, R. F., Bastos, L., Gil, A. J., Galindo-Zaldivar, J. ve De Galdeano, C. S., 2010. PS-InSAR processing methodologies in the detection of field surface deformation—Study of the Granada basin (Central Betic Cordilleras, southern Spain), Journal of Geodynamics, 49, 3-4, 181–189.

Sousa, J. J., Hooper, A. J., Hanssen, R. F., Bastos, L. C. ve Ruiz, A. M., 2011. Persistent Scatterer InSAR: A comparison of methodologies based on a model of temporal

deformation vs. spatial correlation selection criteria, Remote Sensing of Environment, 115, 10, 2652–2663.

Sowter, A., Amat, M. B. C., Cigna, F., Marsh, S., Athab, A. ve Alshammari, L., 2016. Mexico City land subsidence in 2014–2015 with Sentinel-1 IW TOPS: Results using the Intermittent SBAS (ISBAS) technique, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 52, 230–242.

Stramondo, S., Saroli, M., Tolomei, C., Moro, M., Doumaz, F., Pesci, A., Loddo, F., Baldi, P. ve Boschi, E., 2007. Surface movements in Bologna (Po Plain—Italy) detected by multitemporal DInSAR, Remote Sensing of Environment, 110, 3, 304–316.

Stramondo, S., Bozzano, F., Marra, F., Wegmuller, U., Cinti, F. R., Moro, M. ve Saroli, M., 2008. Subsidence induced by urbanisation in the city of Rome detected by advanced InSAR technique and geotechnical investigations, Remote Sensing of Environment, 112, 6, 3160–3172.

Strozzi, T., Dammert, P., Wegmuller, U., Martinez, J. M., Askne, J., Beaudoin A. ve Hallikainen, M., 2000. Landuse mapping with ERS SAR Interferometry, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38, 2, 766–775.

Strozzi, T., Wegmuller, U., Werner, C. L., Wiesmann, A. ve Spreckels, V., 2003. JERS SAR interferometry for land subsidence monitoring, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41, 7, 1702–1708.

Sun, Q., Jiang, L., Jiang, M., Lin, H., Ma, P. ve Wang, H., 2018. Monitoring Coastal Reclamation Subsidence in Hong Kong with Distributed Scatterer Interferometry, Remote Sensing, 10, 11, 1738.

Şengün, Y. S. ve Kılıçoğlu, A., 2005. İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar Tekniğinin Jeodezide Kullanılması, Harita Genel Komutanlığı Harita Dergisi,133, 53-62.

Şengün, Y. S., 2010. InSAR Ölçülerinin Doğruluk Araştırması, Harita Genel Komutanlığı Harita Dergisi,143, 19-25.

Şimşek, M., 1992. Jeodezik Ağlarda Uyuşumsuz Ölçülerin Belirlenmesi, Harita Dergisi, 108, 18-33.

Tanır, E., 2000. Deformasyon Analizinde Statik Değerlendirme Yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Terranova, C., Ventura, G. ve Vilardo, G., 2015. Multiple causes of ground deformation in the Napoli metropolitan area (Italy) from integrated Persistent Scatterers DinSAR, geological, hydrological and urban infrastructure data. Earth-Science Reviews, 146, 105–119.

Thomas, R., Romero, R., Mulas, J., Marturia, J. J., Mallorqui, J. J., Lopez-Sanchez, J. M., Herrera, G., Gutierrez, F., Gonzalez, P. J., Fernandez, J. ve Duque, S., 2014.

Radar interferometry techniques for the study of ground subsidence phenomena: a review of practical issues through cases in Spain, Environmental Earth Sciences, 71, 163–181.

Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Potin, P., Rommen, B., Floury, N., Brown, M., Traver, I. N., Deghaye, P., Duesmann, B., Rosich, B., Miranda, N., Bruno, C., L'Abbate, M., Croci, R., Pietropaolo, A., Huchler, M. ve Rostan, F., 2012. GMES Sentinel-1 mission, Remote Sensing of Environment, 120, 9–24.

Tural, S., 2011. Gerçek Zamanlı Meteoroloji Verilerinin Toplanması, Analizi ve Haritalanması, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

URL-1, https://sentinel.esa.int/web/sentinel. 10 Haziran 2021.

URL-2, https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/interferometric-wide-swath. 10 Haziran 2021.

URL-3, https://earth.esa.int/documents/10174/2700124/sar_land_apps_1_theory.pdf. 1 Eylül 2021.

URL-4, https://esdynamics.geo.unituebingen.de/wiki/files/remote_sensing/pdf/GEO_users_guide.pdf. 20 Eylül 2021.

Veci, L., 2016a. TOPS Interferometry Tutorial, Sentinel-1 Toolbox, ESA.

Veci, L., 2016b. Interferometry Tutorial, Sentinel-1 Toolbox, ESA.

Wang, X., Liu, G., Yu, B., Dai, K., Zhang, R., Chen, Q. ve Li, Z., 2014. 3D coseismic deformations and source parameters of the 2010 Yushu earthquake (China) inferred from DInSAR and multiple-aperture InSAR measurements, Remote Sensing of Environment, 152, 174–189.

Wang, S., Zhang, Y., Wang, Y., Jiao, J., Ji, Z. ve Han, M., 2020. Post-seismic deformation mechanism of the July 2015 MW 6.5 Pishan earthquake revealed by Sentinel-1A InSAR observation, Scientific Reports, 10, 18536.

Werner, C., Wegmuller, U., Strozzi, T. ve Wiesmann, A., 2003. Interferometric point target analysis for deformation mapping, IGARSS 2003, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 7, 4362–4364.

Wolf, P. R. ve Ghilani, C. D., 1997. Ghilani: Adjustment Computation: Statistics and Least Squares in Surveying and GIS, John Wiley and Sons, Inc., ISBN 0-471-16833-5.

Wright, T. J., Parsons, B. E. ve Zhong, L., 2004. Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR, Geophys. Res. Lett., 31, L01607.

Yang, C., Zhang, Q., Zhao, C., Wang, Q. ve Ji, L., 2014. Monitoring land subsidence and fault deformation using the small baseline subset InSAR technique: A case study in the Datong Basin, China, Journal of Geodynamics, 75, 4, 34–40.

Yang, K., Yan, L., Huang, G., Chen, C. ve Wu, Z., 2016. Monitoring Building Deformation with InSAR: Experiments and Validation, Sensors, 16, 12, 2182.

Yang, M., Yang, T., Zhang, L., Lin, J., Qin, X. ve Liao, M., 2018. Spatio-Temporal Characterization of a Reclamation Settlement in the Shanghai Coastal Area with Time Series Analyses of X-, C-, and L-band SAR Datasets, Remote Sensing, 10, 2, 329.

Yalçınkaya, M., Teke, K. ve Bayrak, T., 2003. Jeodezik GPS Ağlarında Duyarlık ve Güven Analizi, I. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, Ekim, İstanbul, Bildiri Kitabı:1-17.

Yalçınkaya (Ünver), M., 1994. Düşey Yöndeki Yerkabuğu Deformasyonlarının Kinematik Model İle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Yaprak, S. ve Arslan, E., 2008. Kriging Yöntemi ve Geoit Yüksekliklerinin Enterpolasyonu, Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi, 98, 36–42.

Yazıcı, B. V., 2019. Daimi Yansıtıcı Insar (Psınsar) Tekniği ile Heyelanların Tespit Edilmesi ve İzlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Yazici, B. V. ve Gormus, E. T., 2022. Investigating persistent scatterer InSAR (PSInSAR) technique efficiency for landslides mapping: a case study in Artvin dam area, in Turkey, Geocarto International, 37, 8, 2293-2311.

Yılmaztürk, S., 2015. SBAS-InSAR Yöntemiyle Düşey Yönlü Yüzey Deformasyonlarının Belirlenmesi: Bursa-Orhaneli Linyit Madeni Örneği, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Yu, C., Li, Z., Penna, N. T. ve Crippa, P., 2018a. Generic Atmospheric Correction Model for Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123, 9202-9222.

Yu, C., Li, Z., ve Penna, N. T., 2018b. Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction using a GPS-based iterative tropospheric decomposition model, Remote Sensing of Environment, 204, 109-121.

Yu, C., Penna, N. T. ve Li, Z., 2017. Generation of real-time mode high-resolution water vapor fields from GPS observations, J. Geophys. Res. Atmos., 122, 2008–2025.

Zebker, H. A. ve Goldstein, R. M., 1986. Topographic mapping from interferometric SAR observations, Journal of Geophysical Research, 91, 4993-4999.

Zebker, H. A. ve Villasenor, J., 1992. Decorrelation in interferometric radar echoes, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30, 950–959.

Zebker, H. A., Rosen, P. A., Goldstein, R. M., Gabriel, A. ve Werner, C., 1994. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: the Landers earthquake, Journal of Geophysical Research, 99, B10, 19617-19634.

Zhou, C., Gong, H., Zhang, Y., Warner, T. A. ve Wang, C., 2018. Spatiotemporal Evolution of Land Subsidence in the Beijing Plain 2003–2015 Using Persistent Scatterer Interferometry (PSI) with Multi-Source SAR Data, Remote Sensing, 10, 4, 552.

Zisk, S. H., 1972a. Lunar Topography: First Radar Interferometer Measurements Of The Alphonsus-Ptolemaeus-Arzachel Region, Science, 178, 4064, 977-980.

Zisk, S. H., 1972b. A New, Earth-Based radar technique for measurements of Lunar Topography, The Moon, 4, 296-306.

Zyl, J. V. ve Kim, Y., 2010. Synthetic Aperture Radar Polarimetry, JPL Space Science and Technology Series, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, Pasadena, California, 333s.

ÖZGEÇMİŞ

Fırat ALTINTAŞ, Lise Öğrenimini 2003 yılında Trabzon Lisesinde tamamladı. 2010 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Harita Mühendisliği veya o günkü adıyla "Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği" Bölümünden "3.01/4" okul ortalaması ile onur öğrencisi olarak mezun oldu. 2011 yılı içerisinde aynı bölümde Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2012 yılında Gümüşhane Üniversitesi'nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Aynı yıl içersinde Yüksek Lisans eğitimini Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı'na aldırarak, 2014 yılında "4.00/4" ortalama ile Yüksek Lisans eğitimini tamamladı. Yüksek Lisans eğitimini tamamladıktan sonra, 2014 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora eğitimine başladı. Doktora eğitimi sırasında 02.2016-07.2016 tarihleri arasında Erasmus+ öğrenim hareketliliği kapsamında Polonya'nın Wroclaw University of Environmental Life Sciences Üniversitesi'nde eğitim gördü. 2020 yılında Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Yatağan Meslek Yüksekokulu Tapu ve Kadastro Programı'nda Öğretim Görevlisi olarak yeni görevine başladı. 2021 yılında Doktora Tez çalışmalarının bir bölümünü kapsayan ve tez danışman hocası Prof. Dr. Ertan GÖKALP ile birlikte hazırladıkları, "Monitoring surface deformations of the reclamation site using PS interferometry: Senol Gunes sport complex (Turkey)" adlı çalışması SCI-Expanded kapsamında yer alan "Geocarto International" adlı dergide yayınlanmıştır. Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi'ndeki görevi ve Karadeniz Teknik Üniversitesi'ndeki doktora eğitimi halen devam etmektedir. Bildiği yabancı dil İngilizcedir.