SENTETİK AÇIKLIKLI RADAR GÖRÜNTÜLERİNDE İNTERFEROMETRİ VE RADARGRAMETRİ TEKNİKLERİNİN FÜZYONU

FUSION OF INTERFEROMETRY AND RADARGRAMETRY TECHNIQUES IN SYNTHETIC APERTURE RADAR IMAGES

EMRAH ONAT

DR. ÖĞR. ÜYESİ YAKUP ÖZKAZANÇ

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

DOKTORA TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2020

Anneme,

Babama,

Eşime

ve

Aslan Oğluma…

ETİK

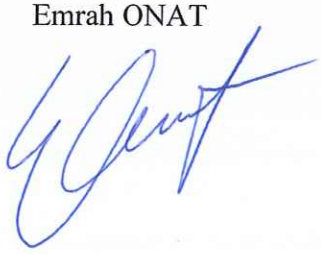
Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

03 / 09 / 2020

Emrah ONAT



YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

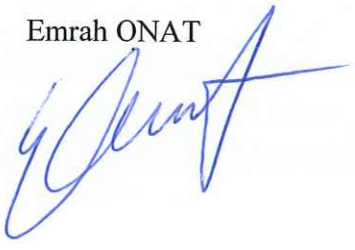
Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan "***Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge***" kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- ☐ Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- ☐ Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren .... ay ertelenmiştir.
- ☐ Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

03 / 09 / 2020

Emrah ONAT



ÖZET

SENTETİK AÇIKLIKLI RADAR GÖRÜNTÜLERİNDE İNTERFEROMETRİ VE RADARGRAMETRİ TEKNİKLERİNİN FÜZYONU

Emrah ONAT

Doktora, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Yakup ÖZKAZANÇ

Eylül 2020, 281 sayfa

Uydu teknolojisinin gelişmesiyle beraber aktif ve pasif uzaktan algılama teknikleri de hızla ilerlemektedir. Uydular üzerindeki optik sensörlerin yanına elektromanyetik görüntüleme yapabilen Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) sensörlerinin de eklenmesiyle beraber gece veya gündüz fark etmeksizin, bulutlu hatta yağışlı hava koşullarında bile görüntüleme imkânı elde edilmiştir. Elde edilen uydu görüntüleri; sınır güvenliği, doğal felaket sonrası değerlendirme, fay hattı takibi, demiryolu ve doğalgaz güvenliği, askeri ve sivil amaçlı haritalama gibi pek çok amaçla kullanılmaktadır.

Kendi sensörü yardımıyla kendi ışın kaynağını üretip aktif uzaktan algılama sistemi olarak çalışan SAR sistemi, optik görüntüleyicilerden farklı olarak içinde faz bilgisini de bulunduran kompleks görüntüler üretebilmektedir. Üretilen SAR görüntülerini kıymetlendirmek için SAR interferometri ve radargrametri gibi birçok teknik geliştirilmiştir.

SAR görüntülerinin genlik bilgisinin yanı sıra faz bilgisini de kullanan yöntemlere SAR İnterferometri (InSAR) denilmektedir. SAR interferometri tekniğinin; Faz Uyumlu Değişiklik Tespiti (FUDT), Faz Uyumlu Arazi Sınıflandırma (FUAS), Deformasyon

Analizi ve Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) oluşturma gibi birçok alanda uygulaması bulunmaktadır.

Radargrametri ise radar görüntülerinden yükseklik bilgisi üretmeyi amaçlayan bir tekniktir. Radargrametri tekniği özetle, radar görüntülerinde fotogrametri tekniğinin uygulanması ve görüntüden geometrik bilginin çıkartılmasıdır. Bu sebeple Stereo SAR olarak da bilinmektedir. Radargrametri tekniğinde SAR interferometri tekniğinden farklı olarak görüntüdeki faz bilgisinden yararlanılmaz ve sadece genlik bilgisi kullanılır. Görüntülenen bölgedeki hedeflerin sensörlere olan uzaklık bilgisi farkından yararlanılır.

Tez kapsamında genel olarak; SAR İnterferometri ve Radargrametri teknikleri ile Sayısal Yükseklik Modellerinin oluşturulması ve bu tekniklerin füzyonu analiz edilmiştir. SAR interferometri tekniğinde yapılan analiz; SAR görüntü çiftinin alınıp, 3 boyutlu yükseklik modeli oluşturana kadar yapılması gereken tüm algoritma adımlarının incelenmesini içermektedir. Adımlar incelenirken, kullanılan algoritmaların teorik arka planı detaylı olarak incelenmiş ve benzetim ortamında modellenmesi yapılmıştır. InSAR tekniği ile SYM oluşturma algoritması, yine InSAR tekniği ile Faz Uyumlu Değişiklik Tespiti algoritmasının tamamını kapsadığı için tez içerisinde bu uygulamaya da kısaca değinilmiştir. Faz Uyumlu Değişiklik Tespitinin çıktısı olan korelasyon haritası, InSAR ile SYM oluşturma uygulamasında iki farklı adımda geri bildirim mekanizması ve rehber harita olarak kullanılmıştır. Korelasyon haritasının yanı sıra, sözde korelasyon, faz türev varyansı ve genlik değişiklik tespiti gibi birçok alternatif versiyonları da modellenmiştir. Benzer senaryolar için hepsi ayrı ayrı denenerek kıyaslamalı analizler yapılmıştır.

Tez çalışmalarında üzerinde en fazla durulan konu ise InSAR tekniği ile SYM oluşturma tekniğinin kalbi niteliğinde olan katlı faz açma adımıdır. Literatürde var olan birçok katlı faz açma algoritması analiz edilmiş ve yine birçoğu benzetim ortamında farklı dillerde kodlamalar yapılarak modellenmiştir. Bazı algoritmaların yavaş çalışması sebebiyle hızlandırma işlemleri uygulanmış, bazıları da birden fazla dilde kodlanarak daha hızlı sonuç verir hale getirilmiştir. Bunların sonucunda modellenen tüm algoritmaların süre ve hata analizleri yapılmıştır. SYM üretirken yapılan hataların ana sebebi olan yanlış faz açma işleminin düzeltilmesi için alternatif çözümler üretilmiştir.

Ayrıca tez kapsamında SAR görüntülerinden bölgeye ait SYM oluşturmanın bir diğer yolu olan Radargrametri tekniği de incelenmiştir. SAR interferometri tekniğindekine

benzer şekilde Radargrametride tekniğinde de algoritma adımları tek tek teorik olarak incelenmiş ve benzetim ortamında modellenmiştir.

Teknikler birbirlerinden farklı geometride toplanmış SAR görüntülerine ihtiyaç duysalar da her iki tekniğe de aynı bölgeye ait istenen geometrideki SAR görüntüleri beslenirse yine aynı bölgeye ait iki farklı SYM üretilmiş olacaktır. Tekniklerin doğası gereği SYM oluştururlarken belli özel durumlarda daha fazla hata oluşmaktadır. Ancak tekniklerin çıktısı olan SYM'ler füzyon işlemine tabi tutularak daha yüksek doğruluk oranına sahip yeni bir SYM elde edilebilecektir. Füzyon, tekniklerin çıktısı olan SYM'lerin belirli bir prosedür izlenerek birleştirilmesi şeklinde yapılabilir. Tez kapsamında bu işleme statik füzyon denilmiştir ve birçok statik füzyon alternatifi denenmiş, sonuçları karşılaştırılmıştır. Ancak her iki tekniğin çıktısında da benzer bölgede yapılan hatalar için statik füzyon çıktısı olan SYM'de doğru sonuç almak imkansızdır. Bunun yerine teknikler eş zamanlı olarak birlikte çalıştırılıp, tekniklerden birisinin çıktısı diğer tekniğe girdi olarak beslendiği yeni bir füzyon algoritması önerilmiştir. Tez kapsamında bu algoritmaya da dinamik füzyon adı verilmiştir.

Tekniklere ait algoritmaların hem teorik hem de benzetim detaylarının anlatıldığı kısımlarda algoritma adımının karakteristiğine uygun farklı uydulara ait gerçek SAR görüntüleri kullanılmıştır. Ayrıca teknikleri ve süre analizlerini daha iyi kıyaslayabilmek için SAR interferometri ve Radargrametri tekniklerine beslenebilecek şekilde sentetik veriler de üretilmiştir.

Tez kapsamında yapılan tüm benzetim çalışmaları bir kullanıcı arayüzü üzerinden kontrol edilebilir olarak geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sentetik Açıklıklı Radar (SAR), SAR İnterferometri (InSAR), Radargrametri, StereoSAR, Sayısal Yükseklik Modeli (SYM), Katlı Faz Açma (KFA), Füzyon

ABSTRACT

FUSION OF INTERFEROMETRY AND RADARGRAMETRY TECHNIQUES IN SYNTHETIC APERTURE RADAR IMAGES

Emrah ONAT

Doctor of Philosophy, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Dr. Yakup ÖZKAZANÇ

September 2020, 281 pages

With the development of satellite technology, advancements in active and passive remote sensing techniques are accelerated. The use of Synthetic Aperture Radar (SAR) sensor, which can perform electromagnetic imaging next to the optical sensors on satellites, makes it possible to obtain SAR images in unfavourable weather conditions (cloudy or even rainy) and in different times of the day (day or night). Satellite images are used for many purposes such as border security, assessments after a natural disaster, fault line tracking, railway and natural gas security, military and civilian mapping.

Unlike optical systems, the SAR system produces its own beam source with its own sensor and operates as an active remote sensing system. This enables SAR system to gather complex images that contain phase information. To refine these images further, many techniques including SAR interferometry and radargrammetry have been developed and used.

Methods that use phase information as well as amplitude information of SAR images are called SAR Interferometry (InSAR). Coherent Change Detection (CCD), Land Classification, Deformation Analysis and Digital Elevation Model (DEM) generation are amongst the numerous applications of SAR Interferometry technique. With the help of these methods, the SAR image can be assessed and enhanced.

Radargrammetry is the first method to generate height information from radar images. The radargrammetry method can, briefly, be described as the extraction of geometric information from the radar images via application of photogrammetry technique on radar images. For this reason, it is also known as Stereo SAR. Unlike SAR interferometry, in the radargrammetry technique uses only the amplitude information and does not need the SAR image phase information. The differences in the distance between the targets in the imaged area and the sensors are used in this technique.

Within the scope of the thesis; we conducted analyses on assessment of SAR images by creating a Digital Elevation Model with SAR Interferometry technique. It involves taking the SAR image pair and examining all steps of the algorithm until it creates a 3D height model. While examining the steps, the theoretical background of the the algorithms were also studied in detail and the simulation models were developed. Since the algorithm for generating DEM with the InSAR technique also covers the entire Coherent Change Detection algorithm with the InSAR technique, this application is also briefly mentioned in the thesis. The correlation map, which is the output of CCD, has been used as a feedback mechanism and guide map in two different steps in the generation of DEM with InSAR. In addition to the correlation map, many alternative versions such as pseudo correlation, phase derivative variance and amplitude change detection are also modelled. For similar scenarios, all of them were tried separately and comparative analyses were made.

The emphasis in thesis is on the step-by-step phase unwrapping step, which is the heart of DEM generation with InSAR technique. Many phase unwrapping algorithms in the literature are analysed and many of them are simulated by employing different software languages. To reduce the required computation time, acceleration processes were applied for some of the algorithms in consideration, while others were developed by taking advantage of multiple programming languages to expedite the rendering. Subsequently, time and error analyses of all the phase unwrapping algorithms were performed and

alternative solutions have been developed to correct the wrong phase unwrapping process, which is the main cause of errors when generating DEM.

In addition, Radargrammetry technique, another technique of generating DEM of the region from SAR images, was also analysed. Similar to the SAR interferometry, the algorithmic steps in Radargrammetry technique were theoretically investigated one by one. Alternative algorithms in the literature were assesed and the best of them is selected. Then the selected technique is modelled in a simulation environment to run all the steps.

Although both techniques require SAR images collected in different geometries, if they are fed with the SAR images of same region from the desired geometry for corresponding technique, they will be able to produce DEMs of the that particular region. Due to the nature of these techniques, they prone to make more mistakes in certain special cases compared to the rest when generating DEM. In this case, it causes erroneous zones to occur in the generated DEM. However, DEMs which are the outputs of the techniques, can be fused into a new DEM with higher accuracy. Fusion process can be performed statically by combining DEMs, by following a certain procedure. In this thesis, many static fusion alternatives have been studied and their results have been presented. However, it is impossible to correct the errors made in the same region in the output of both techniques via using static fusion. Instead, a different fusion algorithm was designed by running several techniques in tandem. A dynamic fusion algorithm is proposed in which the output of one technique is fed as an input to the other.

To facilitate both the theoretical and simulation analysis of the techniques, we used real SAR images of suitable characteristics from different satellites. In addition, synthetic data were produced to feed SAR interferometry and radargrammetry techniques to better compare techniques and time analysis.

All simulation models developed within this work accepts inputs via user-friendly graphical interfaces.

Keywords: Synthetic Aperture Radar (SAR), SAR Interferometry (InSAR), Radargrammetry, Stereo SAR, Digital Elevation Model (DEM), Phase Unwrapping (PU), Fusion

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans ve Doktora süresi boyunca danışmanım olarak akademik çalışmalarıma destek veren, yol gösteren, bu yolda bana rehberlik eden çok değerli ve saygıdeğer hocam Yakup Özkazanç'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitemde yer alan ve tez sürecimde benden yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarım Orhan Arıkan ve Mücahit Üner'e teşekkür ederim.

Doktora sürecinin en başından beri bilhassa ders ve yeterlilik döneminde aralarına kabul ederek bana yardımcı olan; bilgilerini, tecrübelerini paylaşan bölümdeki tüm araştırma görevlisi arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu süreç boyunca profesyonel olarak çalıştığım şirketlere ve şirketlerdeki çalışma arkadaşlarıma ve bana destek olan tüm yöneticilerime teşekkür ederim.

Tübitak-İltaren'den Mahmut Serin'e, MathWorks'ten Halil Uysal'a, Esen Sistem'den Ekin Nurbaş'a ve mentörüm Fatih Nar'a hem yardımları ve destekleri için hem de doktora boyunca motivasyonumu yüksek tutmama vesile oldukları için teşekkür ederim.

İhtiyacım olduğunda aramaktan hiç çekinmediğim, doktora da özellikle literatürdeki zor bulunan kaynakları temin etmekte bana yardımcı olan yakın arkadaşım hatta kardeşim Burak Gökçe'ye teşekkür ederim.

Sevgili eşim, kader ve dert ortağım Pınar Şimşek Onat'a her zaman olduğu gibi bu süreçte de yanımda yer alarak anlayışını ve desteğini eksik etmediği için çok teşekkür ederim.

Doktora programına kaydolduğum hafta Dünya'ya gözlerini açarak hayatıma daha çok neşe, huzur ve mutluluk getiren aslan oğlum Alparslan Efe Onat'a tüm doktora sürecime tanıklık edip ihtiyacım olan her anda bana verdiği güç, enerji ve neşe için çok teşekkür ederim.

İlk nefesimi aldığım andan itibaren yanımda olan, maddi manevi desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyen, hayatım boyunca yaşadığım tüm başarıların gerçek mimarı olan sevgili annem Dilek Onat ve sevgili babam Zeki Onat'a sonsuz teşekkür ederim.

Sizler olmasaydınız bu tez yazılamazdı.

Doktora çalışmalarımı, 2211/C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programı kapsamında destekleyen TÜBİTAK-BİDEB'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i

ABSTRACT iv

TEŞEKKÜR vii

İÇİNDEKİLER viii

ŞEKİLLER DİZİNİ xiv

ÇİZELGELER DİZİNİ xxiv

SÖZLÜK DİZİNİ xxv

SİMGELER xxviii

KISALTMALAR xxxi

1. GİRİŞ 1

1.1. SAR İnterferometri'nin Tarihsel Gelişimi 2

1.2. Radargrametri'nin Tarihsel Gelişimi 3

1.3. SAR İnterferometri ve Radargrametri Literatürü 4

1.4. Motivasyon 17

1.5. Tez Çalışmasının Literatüre Katkıları 19

1.6. Tez Raporunun İçeriği 22

2. SAR İNTERFEROMETRİ (InSAR) 23

2.1. Sentetik Açıklıklı Radar 23

2.1.1. Temel SAR Görüntü Oluşturma Algoritması 24

2.1.2. SAR Görüntü Modeli Özellikleri 25

2.1.3. SAR Sensörü Taşıyan Uydular 27

2.1.4. SAR Görüntü Kıymetlendirme Geometrisi 28

2.1.5. SAR Görüntüleme Hataları 30

2.2. SAR İnterferometri Prensipleri ve Uygulamaları 31

2.2.1. InSAR Uygulamaları 31

2.2.1.1. Yeryüzü Modeli Oluşturma 31
2.2.1.1.1. Sayısal Yükseklik Modeli Oluşturma 31
2.2.1.1.2. Eğim Analizi 32
2.2.1.2. Faz Uyumlu Değişiklik Tespiti 33
2.2.1.3. Faz Uyumlu Arazi Sınıflandırma 35
2.2.1.4. Yeryüzü Deformasyon Analizi 37
2.2.1.4.1. Kutupsal Araştırmalar 37
2.2.1.4.2. Sismik Olaylar 37
2.2.1.4.3. Volkanik Deformasyon Görüntüleme 37
2.2.2. InSAR Geometrik Modeli 38
2.3. SAR İnterferometri Tekniği ile Sayısal Yükseklik Modeli Oluşturulması 42
2.3.1. Gürültü Temizleme 43
2.3.2. SAR Görüntüleri Arasında Bilinen Açı Farkını Düzeltme 44
2.3.3. Çakıştırma / Hizalama 45
2.3.3.1. Kaba Çakıştırma / Hizalama 47
2.3.3.2. Hassas Çakıştırma / Hizalama 52
2.3.4. İnterferogram 58
2.3.4.1. İnterferogram Oluşturma 58
2.3.4.2. İnterferogram Düzleştirme 58
2.3.4.3. İnterferogram Filtreleme 60
2.3.5. Harita Oluşturma 60
2.3.5.1. Korelasyon Haritası Oluşturma 60
2.3.5.2. Sözde Korelasyon Haritası Oluşturma 66
2.3.5.3. Faz Türev Varyansı Haritası Oluşturma 67
2.3.5.4. En Yüksek Faz Türevi Haritası Oluşturma 68
2.3.5.5. Genlik Değişiklik Tespiti Haritası Oluşturma 69
2.3.6. Harita Belirginleştirme 70
2.3.6.1. Ortalama Seviye Algılayıcı 71
2.3.6.2. Sansürlü Ortalama Seviye Algılayıcı 72
2.3.6.3. Sıralı İstatisik Uyum Algılayıcı 73
2.3.6.4. Sabit Yanlış Alarm Oranı Algılayıcı 75
2.3.7. Katlı Faz Açma 76
2.3.7.1. Katlı Faz Açma Probleminde Genel Kabuller ve Nyquist Teoremi 78

2.3.7.2. Bir Boyutta Katlı Faz Açma 78
2.3.7.3. İki Boyutta Katlı Faz Açma 83
2.3.7.4. İki Boyutta Katlı Faz Açma Algoritmaları 84
2.3.7.4.1. Tek Baz Uzaklıklı Katlı Faz Açma Algoritmaları 85
2.3.7.4.1.1. Yol İzleme Tabanlı Yöntemler 86
2.3.7.4.1.1.1. Goldstein Branch Cut Algoritması 86
2.3.7.4.1.1.2. Kalite Rehberi Algoritması 91
2.3.7.4.1.1.3. Mask Cut Algoritması 92
2.3.7.4.1.1.4. Flynn En Düşük Süreksizlik Yaklaşımı Algoritması 95
2.3.7.4.1.2. Ağ Akışı Tabanlı Yöntemler 98
2.3.7.4.1.3. En Küçük Kareler Tabanlı Yöntemler 98
2.3.7.4.1.4. Entegre Gürültü Filtreleme ve Faz Açma Yöntemleri 98
2.3.7.4.2. Çoklu Baz Uzaklıklı Katlı Faz Açma Algoritmaları 99
2.3.7.4.3. Geniş Alanlar için Katlı Faz Açma Algoritmaları 99
2.3.8. Yükseklik Hesaplama 100
2.3.9. Coğrafi Konumlandırma 100
3. RADARGRAMETRİ 101
3.1. Radargrametri Prensipleri ve Uygulamaları 101
3.1.1. Radargrametri Geometrik Modeli 102
3.2. Radargrametri Algoritması 103
3.2.1. Gürültü Temizleme 104
3.2.2. Bilinen Açı Farkını Düzeltme 104
3.2.3. Azimut Ekseninde Çakıştırma 104
3.2.4. Görüntü Eşleştirme 105
3.2.4.1. Çapraz Korelasyon 107
3.2.4.2. Epipolar Geometri 109
3.2.4.3. Piramit Yaklaşımı 110
3.2.5. Yükseklik Hesaplama 113
3.2.5.1. Radar Stereo Modelin Hesaplanması 113
3.2.5.2. Geometrik Geriçatım 114
3.2.6. Coğrafi Konumlandırma 117
4. SAR İNTERFEROMETRİ – RADARGRAMETRİ FÜZYONU 118

4.1. SAR İnterferometri ve Radargrametri Ortak Geometrik Modeli 119
4.2. Füzyon Algoritmaları 121
4.2.1. Füzyon Algoritmaları Öncesi İşlemler 127
4.2.1.1. Çözünürlük Eşitleme 127
4.2.1.2. Yönelim Düzeltme 128
4.2.2. Statik Füzyon 129
4.2.2.1. Eşik Değerler 130
4.2.2.2. Ağırlıklandırılmış Holder Ortalaması 132
4.2.2.3. Farklı Kalite Metrikleri Kullanılarak Statik Füzyon 135
4.2.3. Dinamik Füzyon 135
4.2.3.1. Yol İzleme Yaklaşımına Dayalı KFA Yöntemleri için Bariyer Belirleme 137
4.2.3.1.1. Radargrametrik SYM'nin Belirginleştirilmesi 138
4.2.3.1.2. Kenar/Köşe Bulma Algoritmaları ve Morfolojik İşlemler 138
4.2.3.2. Tüm KFA Yöntemleri için Referans Özelliği 139
4.3. Statik Füzyon - Dinamik Füzyon Karşılatırması 142
5. BENZETİM ÇALIŞMALARI ve UYGULAMALAR 143
5.1. Tezde Kullanılan SAR Görüntüleri 143
5.1.1. Gerçek SAR Görüntüleri 143
5.1.1.1. AFRL SAR Görüntüleri 143
5.1.1.2. ERS Uydusu SAR Görüntüleri 145
5.1.1.3. TerraSAR-X Uydusu SAR Görüntüleri 146
5.1.1.4. RADARSAT Uydusu SAR Görüntüleri 147
5.1.2. Sentetik Veri Üretimi 150
5.1.2.1. Faz ve Menzil Farkı Üzerinden Oluşturulmuş Veri Seti 150
5.1.2.2. Gölge Etkisi 152
5.1.2.3. İnsan Yapıları 153
5.2. SAR İnterferometri Tekniği ile SYM Oluşturulması İşlem Adımları 154
5.2.1. Gürültü Temizleme 154
5.2.2. SAR Görüntüleri Arasında Bilinen Açı Farkını Düzeltme 156
5.2.3. Çakıştırma / Hizalama 156
5.2.4. İnterferogram 162

5.2.4.1. İnterferogram Oluşturma 162
5.2.4.2. İnterferogram Düzleştirme 162
5.2.4.3. İnterferogram Filtreleme 162
5.2.5. Harita Oluşturma 166
5.2.5.1. Korelasyon Haritası Oluşturma 166
5.2.5.2. Sözde Korelasyon Haritası Oluşturma 169
5.2.5.3. Faz Türev Varyansı Haritası Oluşturma 170
5.2.5.4. En Yüksek Faz Türevi Haritası Oluşturma 170
5.2.5.5. Genlik Değişiklik Tespiti Haritası Oluşturma 171
5.2.6. Harita Belirginleştirme 173
5.2.7. Katlı Faz Açma 176
5.2.7.1. Tek Boyutta Katlı Faz Açma 176
5.2.7.2. İki Boyutta Katlı Faz Açma 180
5.2.7.2.1. Tek Baz Uzaklıklı Katlı Faz Açma Algoritmaları 180
5.2.7.2.1.1. Yol İzleme Metotları 180
5.2.7.2.1.1.1. Goldstein Branch Cut Algoritması 180
5.2.7.2.1.1.2. Kalite Rehberi Algoritması 188
5.2.7.2.1.1.3. Mask Cut Algoritması 193
5.2.7.2.1.1.4. Flynn En Düşük Süreksizlik Yaklaşımı Algoritması 200
5.2.7.3. Katlı Faz Açma Algoritmaları Süre Analizi 205
5.3. Radargrametri İşlem Adımları 210
5.3.1. Gürültü Temizleme 210
5.3.2. SAR Görüntüleri Arasında Bilinen Açı Farkını Düzeltme 212
5.3.3. Azimut Ekseninde Çakıştırma 214
5.3.4. Eşleştirme 216
5.3.5. Geometrik Geriçatım 222
5.4. SAR İnterferometri ve Radargrametri Füzyonu 225
5.4.1. Statik Füzyon 233
5.4.2. Dinamik Füzyon 247
5.4.3. Statik Füzyon - Dinamik Füzyon Karşılaştırması 253
6. YORUM ve GELECEK ÇALIŞMALAR 255
7. KAYNAKLAR 259

EKLER 268
EK 1 – Kullanıcı Arayüzü 268
Kullanıcı Arayüz Özellikleri 272
Histogram Eşitleme 272
İlgi Alanı Seçimi 275
EK 2 - Tezden Türetilmiş Bildiriler 276
EK 3 - Tez Çalışması Orjinallik Raporu 277
ÖZGEÇMİŞ 278

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1-1. İki farklı DTED Seviyesinde Sayısal Yükseklik Modeli [5] 5
Şekil 1-2: TSX SM İstanbul – SAR Görüntü Çifti [32].....6
Şekil 1-3: InSAR Tekniği ile Üretilen SYM ve 3 Boyutlu Gösterimi [32].....6
Şekil 1-4: Farklı zamanlarda Alınmış SAR Görüntü Çifti [39].....8
Şekil 1-5: İkinci SAR Görüntüsü Alınmadan Önce Arazide Yapılan Değişiklikler [39] .9
Şekil 1-6: Faz Uyumlu Değişiklik Tespiti Haritası [39].....9
Şekil 1-7: Radargrametri ve SAR İnterferometri Teknikleri Kullanılarak Üretilen SYM'ler [65], (a): RADARSAT verisi ile radargrametri tekniği kullanılarak üretilen SYM, (b): RADARSAT verisi ile SAR interferometri tekniği kullanılarak üretilen SYM, (c): ERS-2 verisi ile SAR interferometri tekniği kullanılarak üretilen SYM, (d): (a) ve (b) füzyonu [RADARSAT – RADARSAT Füzyonu], (e): (a) ve (c) füzyonu [RADARSAT – ERS-2 Füzyonu].....15
Şekil 2-1. Sentetik Açıklıklı Radar [78] 23
Şekil 2-2: Menzil Doppler Algoritması 24
Şekil 2-3: Tek Bakışlı Kompleks SAR Görüntüsü (a): Gerçel Bileşeni, (b): Sanal Bileşeni, (c): Büyüklüğü, (d): Fazı 26
Şekil 2-4: Stereo Görüntüleme Geometrisi.....28
Şekil 2-5. SAR Görüntüleme Geometri Hataları ([6]'dan Esinlenilmiştir).....30
Şekil 2-6. SAR Görüntülerinden SYM Üretilmesi.....32
Şekil 2-7: InSAR ile Değişiklik Tespiti.....33
Şekil 2-8: Faz Uyumlu Değişiklik Tespiti Haritası Oluşturma.....34
Şekil 2-9: SAR Görüntü Çifti 34
Şekil 2-10: SAR Görüntü Çiftinden Üretilen Faz Uyumlu ve Genlik Değişiklik Tespiti Haritaları.....35
Şekil 2-11: SAR Görüntülerinde Yer Alan Arazileri Sınıflandırma Tekniği 36
Şekil 2-12: Tek-Geçişli (a) ve Çok-Geçişli (b) InSAR Verisi Toplama Senaryoları [5]38
Şekil 2-13: SAR İnterferometri Geometrisi.....39
Şekil 2-14. SAR İnterferometri Tekniği ile SYM Oluşturulması İşlem Adımları 42

Şekil 2-15: Orijinal SAR Görüntüsü 43
Şekil 2-16: Filtrelenmiş SAR Görüntüsü 43
Şekil 2-17: Saat Yönünün Tersine 10º Döndürülmüş SAR Görüntüsü 44
Şekil 2-18: Kaba Çakıştırma Algoritması 47
Şekil 2-19. Standart Sapmanın Katları 51
Şekil 2-20: Hassas Çakıştırma Algoritması 53
Şekil 2-21: Interferogram Düzleştirme 59
Şekil 2-22: Geri Besleme Mekanizması 61
Şekil 2-23: Rehber Harita Olarak Kullanım Mekanizması 62
Şekil 2-24: SAR İnterferometri Tekniği ile FUDT Haritası Oluşturulması Algoritması 63
Şekil 2-25: SAR Görüntüleri ve Değişiklik Tespiti Haritası [36] 64
Şekil 2-26: Korelasyon Haritaları 65
Şekil 2-27: Değişiklik Tespitleri 65
Şekil 2-28: Sözde Korelasyon Haritası 66
Şekil 2-29: Faz Türev Varyansı Haritası 67
Şekil 2-30: En Yüksek Faz Türevi Haritası 68
Şekil 2-31: Genlik Değişiklik Tespiti Haritaları 1 - 2 69
Şekil 2-32: Genlik Değişiklik Tespiti Haritaları 3 - 4 70
Şekil 2-33: Korelasyon Haritası ve MLD ile Belirginleştirilmiş Versiyonu 71
Şekil 2-34: Korelasyon Haritası ve CMLD ile Belirginleştirilmiş Versiyonları 72
Şekil 2-35: Korelasyon Haritasının Histogramı 73
Şekil 2-36: Korelasyon Haritası ve OSCD ile Belirginleştirilmiş Versiyonları 74
Şekil 2-37: İki Radar Antenin Yerdeki Aynı Noktaya Uzaklıkları [43] 76
Şekil 2-38: Süreksizlik – Korelasyan Katsayısı / Görüntüleme Sayısı Grafiği [12] 77
Şekil 2-39: Bir Boyutlu Katlı / Açılmış Faz Örnekleri 78
Şekil 2-40: Eşitlik 2.88 Gerçek (Mavi) ve Katlı (Kırmızı) Faz Değerleri (50 Örnek) 81
Şekil 2-41: Gerçek (Mavi), Katlı (Kırmızı) ve Açılmış (Siyah) Faz Değerleri (50 Örnek) 81
Şekil 2-42: Gerçek (Mavi), Katlı (Kırmızı) ve Açılmış (Siyah) Faz Değerleri (32 Örnek) 82
Şekil 2-43: Gerçek (Mavi), Katlı (Kırmızı) ve Açılmış (Siyah) Faz Değerleri (31 Örnek) 82

Şekil 2-44: Dolamsız Alan [54] 83
Şekil 2-45: Kalıntı Hesabı 87
Şekil 2-46: Örnek (Katlı) Faz Değerleri 87
Şekil 2-47: Branch-cut Oluşturmada En Yakın Kalıntı ve Optimum Oluşum Senaryoları 88
Şekil 2-48: Kalıntı Birleşimleri (a) Yanlış (b) Doğru [124] 90
Şekil 2-49: Katlı Fazı Açılmış Piksel Değerleri 91
Şekil 3-1: Radargrametri Görüntüleme Geometrileri [63], (a): Aynı yükseklikten ve aynı yönden farklı bakış açıları ile oluşturulan geometri, (b): Aynı yükseklikten, farklı yönlerden ve farklı bakış açıları ile oluşturulan geometri, (c): Aynı yönden, farklı yüksekliklerden farklı bakış açıları ile oluşturulan geometri, (d) Yönler, yükseklikle ve bakış açılarının tamamen farklı olduğu geometri 102
Şekil 3-2: Radargrametrik SYM Üretimi İşlem Adımları 103
Şekil 3-3: Görüntü Eşleştirme İşlemi 106
Şekil 3-4: Eşleştirme Algoritması 107
Şekil 3-5: Epipolar Arama Alanı [56] 109
Şekil 3-6: Aynı SAR Görüntüsünün Farklı Çözünürlüklerdeki Versiyonları [58] 110
Şekil 3-7: Piramid Yaklaşımında İyileşen Çözünürlükler 110
Şekil 3-8: Piramit Yaklaşımı Algoritması 111
Şekil 3-9: Piramit Yaklaşımı ve Üretilen Sayısal Yükseklik Modelleri [8] 112
Şekil 3-10: Aynı Taraftan Bakışlı Radargrametri Geometrisi [58] 113
Şekil 3-11: Stereo Görüntüleme Uçuş Geometrisi 115
Şekil 4-1: Stereoskopik ve İnterferometrik Görüntü Geometrisi 119
Şekil 4-2: İnterferometri, Radargrametri ve Füzyon SYM Hata Miktarları [65] 122
Şekil 4-3: İnterferometrik SYM için Uyum – Yükseklik Hatası Grafikleri [65] 123
Şekil 4-4: Radargrametrik SYM için Uyum – Yükseklik Hatası Grafikleri [65] 124
Şekil 4-5. Füzyon SYM için Uyum – Yükseklik Hatası Grafikleri [65] 125
Şekil 4-6. Radargrametri ve SAR İnterfeometri SYM Çıktıları [65], (a): Spot Referans SYM, (b): RADARSAT SAR Görüntülerinden Radargrametri Tekniği ile Üretilen SYM, (c): RADARSAT SAR Görüntülerinden SAR İnterferometri Tekniği ile Üretilen SYM, (d): ERS SAR Görüntülerinden SAR İnterferometri Tekniği ile Üretilen SYM, (e): RADARSAT SAR Görüntülerinden Füzyon Sonucu Üretilen

SYM, (f): RADARSAT ve ERS SAR Görüntülerinden Füzyon Sonucu Üretilen SYM 126
Şekil 4-7: Statik Füzyon Algoritması 129
Şekil 4-8: Dinamik Füzyon Algoritması 136
Şekil 5-1: X-Bant Yatay-Yatay AFRL SAR Görüntüsü 144
Şekil 5-2: X-Bant Yatay-Dikey AFRL SAR Görüntüsü 144
Şekil 5-3: X-Bant Dikey-Dikey AFRL SAR Görüntüsü 144
Şekil 5-4: SAR Görüntü Çifti (Master-Slave) (ERS Uydusu - İtalya/Etna) 145
Şekil 5-5: SAR Görüntüsü (TerraSAR-X - İran/Kum) 146
Şekil 5-6: Radargrametri için SAR Görüntü 1 (RADARSAT - Türkiye/İzmit Körfezi) 148
Şekil 5-7: Radargrametri için SAR Görüntü 2 (RADARSAT - Türkiye/İzmit Körfezi) 148
Şekil 5-8: SAR İnterferometri için SAR Görüntü 1 (RADARSAT - Türkiye/İzmit Körfezi) 149
Şekil 5-9: SAR İnterferometri için SAR Görüntü 2 (RADARSAT - Türkiye/İzmit Körfezi) 149
Şekil 5-10: Sentetik Olarak Oluşturulmuş Sanal Bölge 150
Şekil 5-11: Sentetik Görüntüleme Geometrisi 151
Şekil 5-12: SAR İnterferometri için Sentetik Görüntülerin Faz Bilgileri 151
Şekil 5-13: Radargrametri için Sentetik Görüntülerin Sensörlere olan Uzaklık Bilgisi 152
Şekil 5-14: Gölge Etkisi (Shadow Effect) 152
Şekil 5-15: Bina Benzeri İnsan Yapıları Olan Sentetik Bölge ve Gölge Etkisi 153
Şekil 5-16: Orijinal SAR Görüntüsü (ERS Uydusu – İtalya/Etna) 154
Şekil 5-17: Gürültü Temizlenmiş SAR Görüntüsü (ERS Uydusu – İtalya/Etna) 154
Şekil 5-18: Histogram Eşitlenmiş SAR Görüntüsü (RADARSAT – Türkiye / İzmit) 155
Şekil 5-19: Gürültü Temizlenmiş SAR Görüntüsü (RADARSAT – Türkiye / İzmit) 155
Şekil 5-20: Kaba Çakıştırma Bloğu Çapraz Korelasyon İşlemi 157
Şekil 5-21: Çapraz Korelasyon Çıktıları 158
Şekil 5-22: İlgi Alanı Seçimi Yapılmış SAR Görüntü Çifti (TerraSAR-X - İran/Kum) 159

Şekil 5-23: SAR Görüntü Çifti (ERS Uydusu - İtalya / Etna)..... 163
Şekil 5-24: İnterferogram ve Düzleştirilmiş İnterferogram (ERS Uydusu - İtalya /Etna) 163
Şekil 5-25: Filtrelenmiş Düzleştirilmiş İnterferogram (ERS Uydusu - İtalya /Etna) ... 164
Şekil 5-26: İnterferogram ve Düzleştirilmiş Hali (Gölge Etkisi Yok ve Bina Yok) 165
Şekil 5-27: İnterferogram ve Düzleştirilmiş Hali (Gölge Etkisi Var ve Bina Yok)..... 165
Şekil 5-28: İnterferogram ve Düzleştirilmiş Hali (Gölge Etkisi ve Bina Var)..... 165
Şekil 5-29: Harita Oluşturma..... 166
Şekil 5-30: Çakıştırma Adımı Öncesi ve Sonrası Korelasyon Haritaları..... 167
Şekil 5-31: Çakıştırma Adımı Sonucu Değiştirilerek Üretilen Korelasyon Haritası.... 168
Şekil 5-32: Sözde Korelasyon Haritası (TerraSAR-X - İran/Kum)..... 169
Şekil 5-33: Faz Türev Varyansı Haritası (TerraSAR-X - İran/Kum)..... 170
Şekil 5-34: En Yüksek Faz Türevi Haritası (TerraSAR-X - İran/Kum) 171
Şekil 5-35: Genlik Değişiklik Tespiti Haritaları (TerraSAR-X - İran/Kum)..... 172
Şekil 5-36: (a): Korelasyon Haritası, (b): MLD Yöntemi ile Belirginleştirilmiş Korelasyon Haritası, (c): OSCD Yöntemi ile Belirginleştirilmiş Korelasyon Haritası, (d): CMLD Yöntemi ile Belirginleştirilmiş Korelasyon Haritası, (e): CFAR Yöntemi ile Belirginleştirilmiş Korelasyon Haritası..... 174
Şekil 5-37: (a) Genlik Değişiklik Tespiti Haritası (b): MLD Yöntemi ile Belirginleştirilmiş Genlik Değişiklik Tespiti Haritası, (c): OSCD Yöntemi ile Belirginleştirilmiş Genlik Değişiklik Tespiti Haritası, (d): CMLD Yöntemi ile Belirginleştirilmiş Genlik Değişiklik Tespiti Haritası 175
Şekil 5-38: 1B Katlı Fazı Açma İşlemi ile Oluşturulan Renklendirilmiş SYM..... 177
Şekil 5-39: 1B Katlı Fazı Açma İşlemi ile Oluşturulan SYM..... 177
Şekil 5-40: Sayısal Yükseklik Modelinin Tepeden Görünümü 178
Şekil 5-41: Gölge Etkisi ve Bina Benzeri İnsan Yapıları Olan Sanal Bölge 178
Şekil 5-42: 1B Katlı Fazı Açma İşlemi ile Oluşturulan SYM..... 179
Şekil 5-43: Sayısal Yükseklik Modelinin Tepeden Görünümü 179
Şekil 5-44: Goldstein Kalıntı Haritası (Matlab) 180
Şekil 5-45: Kalıntıların Birleştirilmesi ve Branch-cut'ların Oluşturulması 181
Şekil 5-46: Goldstein Oluşturulan Bariyer (Branch-cut) Haritası (Matlab)..... 182
Şekil 5-47: Goldstein Açılmış Katlı Faz (Matlab)..... 183

Şekil 5-48: Goldstein Branch Cut Yöntemi ile Üretilen Renklendirilmiş SYM (Matlab) 183
Şekil 5-49: Goldstein Branch Cut Yöntemi ile Üretilen SYM (Matlab) 184
Şekil 5-50: Goldstein Kalıntı Haritası (C/C++) 184
Şekil 5-51: Goldstein Oluşturulan Bariyer (Branch-cut) Haritası (C/C++) 185
Şekil 5-52: Goldstein Açılmış Katlı Faz (C/C++) 185
Şekil 5-53: Goldstein Branch Cut Yöntemi ile Üretilen SYM (C/C++) 185
Şekil 5-54: Goldstein Branch Cut Algoritması Çıktıları (Matlab) 187
Şekil 5-55: Goldstein Branch Cut Algoritması Çıktıları (C/C++) 187
Şekil 5-56: Kalite Rehberi Yönteminde Katlı Faz Açılmasında İzlenen Yol 188
Şekil 5-57: Korelasyon Haritası (ERS – İtalya/Etna) 189
Şekil 5-58: Kalite Rehberi (Korelasyon Haritası) Yöntemi ile Açılmış Faz (C/C++) ..189
Şekil 5-59: Kalite Rehberi (Korelasyon Haritası) Yöntemi ile Üretilen SYM (C/C++) 189
Şekil 5-60: Sözde Korelasyon Haritası (ERS – İtalya/Etna) 190
Şekil 5-61: Kalite Rehberi (Sözde Korelasyon Haritası) Yöntemi ile Açılmış Faz (C/C++) 190
Şekil 5-62: Kalite Rehberi (Sözde Korelasyon Haritası) Yöntemi ile Üretilen SYM (C/C++) 190
Şekil 5-63: Genlik Değişiklik Tespiti Haritası (ERS – İtalya/Etna) 191
Şekil 5-64: Kalite Rehberi (Genlik Değişiklik Tespiti Haritası) Yöntemi ile Açılmış Faz (C/C++) 191
Şekil 5-65: Kalite Rehberi (Genlik Değişiklik Tespiti Haritası) Yöntemi ile Üretilen SYM (C/C++) 191
Şekil 5-66: Sentetik Üretilen Faz Türev Varyansı ve Sözde Korelasyon Haritaları 192
Şekil 5-67: Kalite Rehberi (Faz Türev Varyansı Haritası) Yöntemi ile Üretilen SYM (Matlab) 192
Şekil 5-68: Kalite Rehberi (Sözde Korelasyon Haritası) Yöntemi ile Üretilen SYM (C/C++) 192
Şekil 5-69: Mask-cut Algoritmasında Bariyerlerin (Mask-cut'ların) Oluşturulması 193
Şekil 5-70: Korelasyon Haritası (ERS – İtalya/Etna) 194
Şekil 5-71: Mask-cut Kalıntı Haritası (C/C++) 194

Şekil 5-72: Oluşturulan Kalın Bariyer (Mask-cut) Haritası (C/C++) 194
Şekil 5-73: Oluşturulan İnce Bariyer (Mask-cut) Haritası (C/C++) 195
Şekil 5-74: Mask-cut Algoritması Açılmış Katlı Faz (C/C++) 195
Şekil 5-75: Mask Cut Yöntemi ile Üretilen SYM (C/C++) 195
Şekil 5-76: Sözde Korelasyon Haritası (ERS – İtalya/Etna) 196
Şekil 5-77: Mask-cut Kalıntı Haritası (C/C++) 196
Şekil 5-78: Oluşturulan Kalın Bariyer (Mask-cut) Haritası (C/C++) 196
Şekil 5-79: Oluşturulan İnce Bariyer (Mask-cut) Haritası (C/C++) 197
Şekil 5-80: Mask-cut Algoritması Açılmış Katlı Faz (C/C++) 197
Şekil 5-81: Mask Cut Yöntemi ile Üretilen SYM (C/C++) 197
Şekil 5-82: Mask-cut Kalıntı Haritası 198
Şekil 5-83: Korelasyon Haritasıyla Üretilen Bariyer Haritası ve Açılmış Katlı Faz 198
Şekil 5-84: Sözde Korelasyon Haritasıyla Üretilen Bariyer Haritası ve Açılmış Katlı Faz 198
Şekil 5-85: Genlik Değişiklik Tespiti Haritasıyla Üretilen Bariyer Haritası ve Açılmış Katlı Faz 199
Şekil 5-86: Faz Türev Varyansı Haritası ile Üretilen Bariyer Haritası ve Açılmış Katlı Faz 199
Şekil 5-87: Faz Türev Varyans Haritası kullanarak Mask Cut Yöntemiyle Üretilen SYM 199
Şekil 5-88: Flynn Algoritması ile Açılmış Katlı Faz Hatası 200
Şekil 5-89: Flynn Algoritma Çıktılarının Birleştirilmesi 201
Şekil 5-90: Korelasyon Haritası (ERS – İtalya/Etna) 202
Şekil 5-91: Flynn Algoritması Açılmış Katlı Faz (C/C++) 202
Şekil 5-92: Flynn Algoritması ile Üretilen SYM (C/C++) 202
Şekil 5-93: Sözde Korelasyon Haritası (ERS – İtalya/Etna) 203
Şekil 5-94: Flynn Algoritması Açılmış Katlı Faz (C/C++) 203
Şekil 5-95: Flynn Algoritması ile Üretilen SYM (C/C++) 203
Şekil 5-96: Rehber Harita Olmadan Flynn Algoritması ile Üretilen SYM 204
Şekil 5-97: Korelasyon Haritası Kullanılarak Flynn Algoritması ile Üretilen SYM 204
Şekil 5-98: Goldstein Branch-Cut Algoritması Farklı Parça - İzlek Sayısı için *"O2"* Optimizasyon Seviyesi Süreleri 207

Şekil 5-99: Flynn Algoritması Farklı Parça - İzlek Sayısı için Algoritma Süreleri.....207
Şekil 5-100: Flynn Algoritması Farklı Parça - İzlek Sayısı için *"O1"* Optimizasyon Seviyesi Süreleri.....208
Şekil 5-101: Flynn Algoritması Farklı Yığın Sayıları için Döngü Planlama Yöntemleri Algoritma Süreleri.....208
Şekil 5-102: Orijinal SAR Görüntüsü - 1 (RADARSAT – Türkiye / İzmit).....210
Şekil 5-103: Filtrelenmiş SAR Görüntüsü - 1 (RADARSAT – Türkiye / İzmit).....211
Şekil 5-104: Orijinal SAR Görüntüsü - 2 (RADARSAT – Türkiye / İzmit).....211
Şekil 5-105: Filtrelenmiş SAR Görüntüsü - 2 (RADARSAT – Türkiye / İzmit).....211
Şekil 5-106: Çizelge 5-11'in Siyah Beyaz Görseli.....213
Şekil 5-107: Çizelge 5-12'un Siyah Beyaz Görseli.....213
Şekil 5-108: Yönelimleri Aynı ve Azimut Ekseninde Çakıştırılmış Görüntü Çifti.....215
Şekil 5-109: Eşleştirme Hesaplama Algoritması.....217
Şekil 5-110: Radargrametri Tekniği İçin Üretilen Sanal Bölge Geometrisi (Örnek-1)218
Şekil 5-111: Gerçek Değer ve Pikselaltı Seviye Aykırılık Haritaları (Baz Uzaklık 5km), (a): Doğru SYM Oluşturmak için Gerekli Paralaks Değerleri, (b): 1/10 Üst Örnekleme Yapılarak Görüntü Çifti Üzerinden Hesaplanan Paralaks Değerleri..219
Şekil 5-112: Radargrametri Tekniği İçin Üretilen Sanal Bölge Geometrisi (Örnek-2)220
Şekil 5-113: Gerçek Değer ve Pikselaltı Seviye Aykırılık Haritaları (Baz Uzaklık 25km) (a): Doğru SYM Oluşturmak için Gerekli Paralaks Değerleri, (b): 1/10 Üst Örnekleme Yapılarak Görüntü Çifti Üzerinden Hesaplanan Paralaks Değerleri..220
Şekil 5-114: Alınan Görüntülerdeki Gölge Etkileri (Baz Uzaklık 5km).....221
Şekil 5-115: Gölge Etkisi Varken Aykırılık Haritası (Baz Uzaklık 5km).....221
Şekil 5-116: Alınan Görüntülerdeki Gölge Etkileri (Baz Uzaklık 25km).....222
Şekil 5-117: Gölge Etkisi Varken Aykırılık Haritası (Baz Uzaklık 25km).....222
Şekil 5-118: Gölge Etkisi Yokken Üretilen SYM ve Hata Görseli (Baz Uzaklık 5km).....223
Şekil 5-119: Gölge Etkisi Yokken Üretilen SYM ve Hata Görseli (Baz Uzaklık 25km).....223
Şekil 5-120: Gölge Etkisi Varken Üretilen SYM ve Hata Görseli (Baz Uzaklık 5km).....224

Şekil 5-121: Gölge Etkisi Varken Üretilen SYM ve Hata Görseli (Baz Uzaklık 25km) 224
Şekil 5-122: Füzyon Algoritmaları İçin Üretilen Sanal Bölge Geometrisi 225
Şekil 5-123: Görüntülenen Bölge 226
Şekil 5-124: Düzleştirilmiş İnterferogram 227
Şekil 5-125: 1B Katlı Fazı Açma Algoritması (Itoh) ile Oluşturulan SYM 227
Şekil 5-126: Goldstein Branch Cut (Matlab) Algoritması ile Oluşturulan SYM 227
Şekil 5-127: Kalite Rehberi (Matlab) Algoritması ile Oluşturulan SYM'ler, (a): Korelasyon Haritası ile, (b): Sözde Korelasyon Haritası ile, (c): Faz Türev Varyansı Haritası ile, (d): En Yüksek Faz Türevi Haritası ile, (e): Genlik Değişiklik Tespiti Haritası ile 228
Şekil 5-128: Mask-Cut (C/C++) Algoritması ile Oluşturulan SYM'ler, (a): Korelasyon Haritası ile, (b): Sözde Korelasyon Haritası ile, (c): Faz Türev Varyansı Haritası ile, (d): En Yüksek Faz Türevi Haritası ile, (e): Genlik Değişiklik Tespiti Haritası ile 229
Şekil 5-129: Flynn (C/C++) Algoritması ile Oluşturulan SYM'ler, (a): Korelasyon Haritası ile, (b): Sözde Korelasyon Haritası ile, (c): Faz Türev Varyansı Haritası ile, (d): En Yüksek Faz Türevi Haritası ile, (e): Genlik Değişiklik Tespiti Haritası ile, (f): Harita Kullanmadan Üretilen SYM 230
Şekil 5-130: Radargrametri Tekniği ile Oluşturulan SYM 231
Şekil 5-131: Statik Füzyon Algoritmasına Beslenen SAR İnterferometrik SYM 233
Şekil 5-132: Statik Füzyon Algoritmasına Beslenen Radargrametrik SYM 234
Şekil 5-133: Korelasyon Haritası Kullanarak Statik Füzyon (Eşik Değer) 235
Şekil 5-134: Korelasyon Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p \to -\infty$) 235
Şekil 5-135: Korelasyon Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = -1$) 235
Şekil 5-136: Korelasyon Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 0$) 236
Şekil 5-137: Korelasyon Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 1$) 236
Şekil 5-138: Korelasyon Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 2$) 236
Şekil 5-139: Korelasyon Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p \to +\infty$) 237
Şekil 5-140: Sözde Korelasyon Haritası Kullanarak Statik Füzyon (Eşik Değer) 237
Şekil 5-141: Sözde Korelasyon Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = -1$) 237
Şekil 5-142: Sözde Korelasyon Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 0$) 238

Şekil 5-143: Sözde Korelasyon Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 1$) 238
Şekil 5-144: Sözde Korelasyon Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 2$) 238
Şekil 5-145: Faz Türev Varyansı Haritası Kullanarak Statik Füzyon (Eşik Değer).....239
Şekil 5-146: Faz Türev Varyansı Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = -1$).....239
Şekil 5-147: Faz Türev Varyansı Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 0$) 240
Şekil 5-148: Faz Türev Varyansı Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 1$) 240
Şekil 5-149: Faz Türev Varyansı Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 2$) 240
Şekil 5-150: En Yüksek Faz Türevi Haritası Kullanarak Statik Füzyon (Eşik Değer).241
Şekil 5-151: En Yüksek Faz Türevi Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = -1$).....241
Şekil 5-152: En Yüksek Faz Türevi Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 0$) 241
Şekil 5-153: En Yüksek Faz Türevi Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 1$) 242
Şekil 5-154: En Yüksek Faz Türevi Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 2$) 242
Şekil 5-155: Genlik Değişiklik Tespiti Haritası Kullanarak Statik Füzyon (Eşik Değer) 243
Şekil 5-156: Genlik Değişiklik Tespiti Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = -1$) .243
Şekil 5-157: Genlik Değişiklik Tespiti Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 0$).....243
Şekil 5-158: Genlik Değişiklik Tespiti Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 1$).....244
Şekil 5-159: Genlik Değişiklik Tespiti Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 2$).....244
Şekil 5-160: Goldstein Branch Cut KFA Algoritması Kalıntı ve Bariyer Haritası.....248
Şekil 5-161: Radargrametrik SYM'nin Sobel Kenar Bulma Filtesi Çıktısı.....249
Şekil 5-162: Radargrametrik SYM'nin Bariyer Haritası Olarak Kullanıldığı Dinamik Füzyon 250
Şekil 5-163: Radargrametrik SYM'nin Referans Olarak Kullanıldığı Dinamik Füzyon 1 251
Şekil 5-164: Radargrametrik SYM'nin Referans Olarak Kullanıldığı Dinamik Füzyon 2 252
Şekil 7-1: Benzetim Programı Kullanıcı Arayüzü.....268
Şekil 7-2: ERS Uydusuna ait Orijinal SAR Görüntüsü ve Histogramı 272
Şekil 7-3: Histogram Eşitlenmiş SAR Görüntüsü ve Aykırı Büyük Değerler Küçük Değere Sabitlenmiş Histogram.....274
Şekil 7-4: İlgi Alanı Seçimi 275

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2-1: SAR Sistemleri Bantları ve Dalgaboyları 27
Çizelge 2-2: SAR Sensörleri 27
Çizelge 2-3: Katlı Faz Açma Yöntemleri Tasnifi [123] 85
Çizelge 5-1: SAR Görüntü Çiftlerinin Özellikleri 147
Çizelge 5-2: Kaba Çakıştırma Çapraz Korelasyon Sonucu (Menzil Yönü) 159
Çizelge 5-3: Kaba Çakıştırma Çapraz Korelasyon Sonucu (Azimut Yönü) 160
Çizelge 5-4: Hatalı Çapraz Korelasyon Sonuçları 160
Çizelge 5-5: Kaba Çakıştırma Çapraz Korelasyon Sonucu (Menzil Yönü) 161
Çizelge 5-6: Kaba Çakıştırma Çapraz Korelasyon Sonucu (Azimut Yönü) 161
Çizelge 5-7: Aralarında Açısal Ofset Bulunan SAR Görüntü Çiftinin Sonuçları 161
Çizelge 5-8: ERS Uydusu Tüm İnterferogramı için KFA Algoritmaları Süre Analizi 205
Çizelge 5-9: ERS Uydusu Kısmi İnterferogramı için KFA Algoritmaları Süre Analizi 205
Çizelge 5-10: Sentetik Veri İçin Katlı Faz Açma Algoritmaları Süre Analizi 206
Çizelge 5-11: Pencerelerden Gelen Çapraz Korelasyon Sonucu (Menzil) 213
Çizelge 5-12: Pencerelerden Gelen Çapraz Korelasyon Sonucu (Çapraz Menzil) 213
Çizelge 5-13: Pencerelerden Gelen Çapraz Korelasyon Sonucu (Menzil) 214
Çizelge 5-14: Pencerelerden Gelen Çapraz Korelasyon Sonucu (Çapraz Menzil) 214
Çizelge 5-15: İnterferometri ve Radargrametri Teknikleriyle Üretilen SYM'lerin Hataları 232
Çizelge 5-16: Statik Füzyon Haritaları Oluşturma Yöntemleri ve RMSE Değerleri ... 245
Çizelge 5-17: Statik Füzyon Haritaları Oluşturma Yöntemleri ve RMSE Değerleri ... 246
Çizelge 5-18: Dinamik Füzyon Sonucu Üretilen SYM'lerin Hataları 252

SÖZLÜK DİZİNİ

Alıcı	Receiver
Alt Örnekleme	Undersampling
Aykırı	Outlier
Aykırılık Haritası	Disparity Map
Bağlantı Noktası	Tie-Point
Benek	Speckle
Büyüklük	Magnitude
Coğrafi Konumlandırma	Geolocation
Çözünürlük	Resolution
Çakıştırma / Hizalama	Coregistration
Çapraz Menzil / Azimut	Cross Range / Azimuth
Çoklu Bakış	Multi-Look
Darbe	Pulse
Dar Bant	Narrow Band
Darbe Çözme	Pulse Decompression
Darbe Sıkıştırma	Pulse Compression
Dolam	Curl
Düğüm	Node
Düzleştirme	Flattening
Eğrilme	Skew
En Küçük Kareler	Least Squares
En Yakın Komşu	Nearest Neighbor
Eşleştirme	Matching
Faz	Phase
Faz Uyumu	Coherence
Fazdaki Örtüşme	Phase Aliasing
Füzyon	Fusion
Genlik	Intensity
Genlik Değişiklik Tespiti	Amplitude Change Detection
Gerçel	Real
Geri Çatım	Reconstruction

Gölge	Shadow
Gürültü Azaltma	Denoising
Hareket Telafisi	Motion Compensation
Imaginary	Sanal
İlintisizlik	Decorrelation
İzlek	Thread
Kalıntı	Residue
Kaplama	Layover
Katlı Faz Açma	Phase Unwrapping
Kaynak	Transmitter
Kutupsal	Polar
Kübik Evrişim	Cubic Convolution
Küçük Gösterme	Foreshortening
Küme	Clump
Menzil	Range
Noktasal Işık	Spotlight
Odaklı	Focused
Odaksız	Unfocused
Ok	Arrow
Ortalama Hata Karelerinin Karekökü	Root Mean Square Error
Ölçek	Scale
Öne Çıkma / Ters Görüntüleme	Layover
Örge / Saçak	Fringe
Örtüşme	Overlap
Ötüş Sinyali	Chirp Signal
Paralaks	Parallax
Pürüzsüzlük	Smoothness
Sayısal Yükseklik Modeli / Haritası	Digital Elevation Model / Map
Spektral Katlanma	Aliasing
Sözde	Pseudo
Süreksizlik	Discontinuity
Şerit Haritalama	Stripmap
Taban Bant	Baseband

Uyarlanır	Adaptive
Uyumlu Filtre	Matched Filter
Uzaktan Algılama	Remote Sensing
Uzama	Stretch
Uzaysal	Spatial
Üst Örnekleme	Oversampling
Yeniden Örnekleme	Resampling
Yer Kontrol Noktası	Ground Control Point
Yığın	Chunk
Yol İzleme	Path Following
Zirve	Peak

SİMGELER

Simgeler

A_{G1}	SAR Görüntü - 1 Büyüklük Değeri
A_{G2}	SAR Görüntü - 2 Büyüklük Değeri
B	SAR sensörleri arası Baz Uzaklık (*Baseline*)
$B_{\parallel}$	Baz Uzaklığın R doğrusuna paralel bileşeni
$B_{\perp}$	Baz Uzaklığın R doğrusuna dik bileşeni
d_{M1}	Kaba Çakıştırma – Baz Uzaklık Hesabına Göre Menzilde Öteleme
d_{M2}	Kaba Çakıştırma – Tüm Görüntü Korelasyon Hesabına Göre Menzilde Öteleme
d_{A2}	Kaba Çakıştırma – Tüm Görüntü Korelasyon Hesabına Göre Azimutta Öteleme
d_{M3}	Kaba Çakıştırma – Görüntü Parçaları Korelasyon Hesabına Göre Menzilde Öteleme
d_{A3}	Kaba Çakıştırma – Görüntü Parçaları Korelasyon Hesabına Göre Azimutta Öteleme
d_A	Radargrametri – Azimut Ekseninde Çakıştırma İşlemi Çıktısı - Azimutta Öteleme Miktarı
G_1	Tek Bakışlı Kompleks SAR Görüntüsü - 1 (*Master*)
G_2	Tek Bakışlı Kompleks SAR Görüntüsü - 2 (*Slave*)
G_3	Tek Bakışlı Kompleks SAR Görüntüsü - 3 (*Radargrametrik*)
G_4	Tek Bakışlı Kompleks SAR Görüntüsü - 4 (*Radargrametrik*)
H_{GD}	Genlik Değişiklik Tespiti Haritası
H_x	Haritaların Genel Gösterimi
H	SAR sensörünün yerden yüksekliği
h	P noktasının yerden yüksekliği
Im	Sanal Bileşen
N_M	SAR Görüntü Çiftinin Menzil Yönünde Boyutu
N_A	SAR Görüntü Çiftinin Azimut Yönünde Boyutu

p_M	Kaba Çakıştırma Adımında Pencerenin Menzil Yönünde Boyutu
p_A	Kaba Çakıştırma Adımında Pencerenin Azimut Yönünde Boyutu
p_{CFAR}	CFAR'da Gezdirilen Kare Pencerenin Kenar Boyutu
p_{FA}	Yanlış Alarm Oranı (*Probability of False Alarm*)
$\#cp$	Hassas Çakıştırma Adımında Toplam Kontrol Noktası Sayısı
$\#P_M$	Kaba Çakıştırma Adımında Menzildeki Pencere Adeti
$\#P_A$	Kaba Çakıştırma Adımında Azimuttaki Pencere Adeti
$\#P$	Kaba Çakıştırma Adımında Toplam Pencere Adeti
R	P noktasının SAR sensörüne uzaklığı
ΔR	P noktasının SAR sensörlerine uzaklık farkı
Re	Gerçel Bileşen
S	Hassas Çakıştırma – Sinc Fonksiyonunu Uzunluğu (Tek Sayı)
S_M	Hassas Çakıştırma – Slave Görüntüdeki Bağlantı Noktaları Menzil Yönü Koordinatları
S_A	Hassas Çakıştırma – Slave Görüntüdeki Bağlantı Noktaları Azimut Yönü Koordinatları
λ	Dalgaboyu
φ	Faz
γ	Harita Metrik Sembolü (FUDT Haritası için Uyum (*Coherence*))
θ	Bakış Açısı
α	Yükseklik Kaynaklı Açı Farkı
β	Baz Uzaklık Açısı
ψ	Eğim Açısı
ω	Örtüşme Oranı (*Overlap Ratio*)
π	Pi
φ^{uw}	Katlı Fazı Açılmış Kesin Faz Değeri
φ^{w}	Katlı Faz Değeri

$\Delta_{i,j}^{M}$	Fazın Menzil Yönündeki Ayrık Türevi
$\Delta_{i,j}^{A}$	Fazın Azimut Yönündeki Ayrık Türevi
ζ_{MLD}	Ortalama Seviye Detektör (*MLD*) Eşiği
ζ_{CMLD}	Sansürlü Ortalama Seviye Detektör (*CMLD*) Eşiği
ζ_{OSCD}	Sıralı İstatistik Uyum Dedektör (*OSCD*) Eşiği
ζ_{CFAR}	Sabit Yanlış Alarm Oranı (*CFAR*) Detektör Eşiği
μ_{CFAR}	CFAR'da Pencere İçindeki Değerlerin Ortalaması (*Mean*)
σ_{CFAR}	CFAR'da Pencere İçindeki Değerlerin Standart Sapması (*Std Dev*)
$k_{p_{FA}}$	CFAR'da eşik ölçek katsayısı

KISALTMALAR

Kısaltmalar

ACD	Amplitude Change Detection
AFRL	Air Force Research Laboratory
ALOS	Advanced Land Observing Satellite
CCD	Coherent Change Detection
CFAR	Constant False Alarm Rate
CMLD	Censored Mean Level Detector
CSR	Circularly Scanning Radar
DCT	Discrete Cosine Transform
DEM	Digital Elevation Model / Map
DTED	Digital Terrain Elevation Data
DTF	Darbe Tekrarlama Frekansı
EOS	Earth Observation System
ERS	European Remote Sensing
ESA	European Space Agency
FUAS	Faz Uyumlu Arazi Sınıflandırma (*Coherent Land-Cover Classification*)
FUDT	Faz Uyumlu Değişiklik Tespiti (*Coherent Change Detection*)
GCP	Ground Control Point
GDT	Genlik Değişiklik Tespiti (*Amplitude Change Detection*)
InSAR	İnterferometrik Sentetik Açıklıklı Radar
J-ERS	Earth Resources Satellite (Japan)
KFA	Katlı Faz Açma (*Phase Unwrapping*)
LFM	Linear Frequency Modulation
LS	Large Scale / Least Squares
MB	Multi Baseline
MLD	Mean Level Detector
OSCH	Ordered Statistic Coherence Detector
PRF	Pulse Repetition Frequency
PU	Phase Unwrapping
RCMC	Range Cell Migration Correction
RDA	Range Doppler Algorithm

RMSE	Root Mean Square Error
ROI	Range of Interest
SAR	Synthetic Aperture Radar / Sentetik Açıklıklı Radar
SB	Single Baseline
SGF	SAR Georeferenced Fine Resolution Product (Path Image)
SIR	Shuttle Imaging Radar
SLR	Single Look Radar
SLC	Single Look Complex
SNR	Signal to Noise Ratio
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SYH	Sayısal Yükseklik Haritası
SYM	Sayısal Yükseklik Modeli

1. GİRİŞ

Radar sistemleri, milimetreden metreye kadar değişebilen dalgaboylarında elektromanyetik dalgalar göndererek hedefleri tespit edebilmek için bu dalgaların yansımalarını geri alırlar [1]. Görüntüleme radarları, gönderdikleri ve yeryüzünden geri yansıyan radar sinyallerini geri toplayıp işleyerek görüntü oluştururlar. Optik sistemlerde olduğu gibi radar görüntü çözünürlüğü de açıklık boyutuna bağlıdır. Yüksek bir çözünürlük için büyük bir açıklık gerekmektedir. Platformun boyutları ve diğer limitlerden ötürü fiziksel olarak büyük bir açıklık oluşturmak çoğu zaman mümkün değildir.

Sentetik Açıklıklı Radar (SAR), üzerinde bulunduğu platform hareket ederken anteninden saniyede binlerce darbe sinyali gönderip görüntülemek istediği bölgeden yansıyanları geri toplayarak büyük bir açıklık oluşturmakta ve böylelikle büyük boyutlu bir anteni varmış gibi çapraz menzilde yüksek çözünürlük sağlamaktadır [2]. İki boyutlu (2B) radar görüntüsü, menzil ve çapraz menzilde dağınık halde bulunan birden fazla ham sinyalin odaklanması ile oluşturulmaktadır [1]. SAR görüntüleri, genlik ve faz bilgisinin olduğu kompleks verilerden oluşmaktadır. Buradaki genlik bilgisi yansıma ile ilintili iken, faz ise anten ve hedef arasındaki uzaklık ile alakalıdır.

Bir bölgenin görüntülemesi yapılırken optik veya elektromanyetik sistemler kullanılabilir. Radar gibi elektromanyetik sistemler görüntülemek istenen bölgeyi güneşten bağımsız olarak kendi ürettikleri elektromanyetik ışınımlar ile aydınlattıkları için gece ve gündüz operasyonel olarak kullanılabilmektedir. Ayrıca, görüntüleme mesafesinden bağımsız olarak istenen çözünürlüğü elde edebilmesi, Sentetik Açıklıklı Radarın optik sensörlerin yetersiz kaldığı durumlarda bile kullanılabilmesini sağlamaktadır [3]. Kullanım alanları olarak SAR, hem keşif amaçlı olarak yeryüzünün coğrafik özelliklerinin çıkarılması ve yerküredeki yapısal değişikliklerin takip edilmesi gibi sivil alanlarda önemli bir yere sahipken, hem de yer hedeflerinin takibi gibi askeri alanda birçok uygulamada kullanılmaktadır [4].

Yeryüzüne ait görüntülerin farklı yöntemler kullanılarak kıymetlendirilmesi, sivil ve askeri amaçlar açısından kritik bir öneme sahiptir. Fotogrametrik yöntemler kullanılarak optik görüntülerin, radargrametrik ve interferometrik yöntemler kullanılarak ise radar

vasıtasıyla oluşturulmuş kompleks SAR görüntülerinin kıymetlendirilmesi sağlanmaktadır.

İnterferometrik Sentetik Açıklıklı Radar (InSAR / IFSAR) tekniği, faz interferometri yöntemi kullanarak yüksek çözünürlüklü SAR görüntü ikililerinden görüntüdeki bölgenin yüksek kalitede Sayısal Yükseklik Modelinin (DEM) veya topoğrafyasının çıkarılmasıdır [5]. SAR interferometri tekniğinde, iki SAR görüntüsü arasında piksel bazında faz farklılığı bilgisi kullanılarak ilgili piksele ait yükseklik bilgisi hesaplanabilmektedir [6].

Radargrametri, radar görüntülerinden geometrik bilginin çıkartılması teknolojisine verilen genel isimdir [7]. Ancak, literatürde yer alan birçok kaynakta radargrametri özellikle stereo yöntemine karşılık gelmekte ve interferometriden oldukça farklı bir yöntem olarak göze çarpmaktadır. Kısacası radargrametri, SAR görüntüleri üzerinde fotogrametrik yöntemlerin kullanılması işlemidir.

Özetle; kıymetlendirme teknikleri ile aynı bölgenin birden fazla optik veya SAR görüntüleri kullanılarak o bölgenin yükseklik modelleri oluşturulabilmektedir. Bu yükseklik modelleri ve değişim haritaları [8];

- Fotogrametrik yöntem ile optik görüntü çiftleri kullanılarak,
- Radargrametrik / Stereo yöntemler ile SAR görüntü çiftlerinin sadece genlik bilgisi kullanılarak,
- Interferometrik yöntemler ile ise SAR görüntülerinin hem genlik hem de faz bilgisi kullanılarak oluşturulmaktadır.

1.1. SAR İnterferometri'nin Tarihsel Gelişimi

SAR interferometri ilk defa 1969 yılında Rogers ve Ingalls tarafından ay ve Venüs'ün yüzeyini gözlemlemek amacıyla kullanılmıştır. 3,8 cm dalga boyu olan bir radar kullanılmıştır. Kuzey ve güney için menzil belirsizliği interferometri işlemi ile çözülmüştür [9].

1974 yılında Graham, hava aracındaki geleneksel sentetik açıklıklı radar düzenine ikinci bir anten ekleyerek üç boyutlu bilgiye ulaşmış ve interferometrik yöntemle yeryüzünün topoğrafya haritasının çıkarımı için bir başlangıç yapmıştır [10].

İlk pratik InSAR sistemi sonuçları, 1986 yılında Zebker ve Goldstein tarafından hava aracından yan bakışlı sistem kullanarak elde edilmiştir. İki SAR görüntüsünden Sayısal

Yükseklik Haritası/Modeli (SYH/SYM – DEM : Digital Elevation Map/Model) elde edilmiştir [11]. Daha sonra 1988 yılında Goldstein, L bantta çalışan SAR sistemine sahip SEASAT-A uzay aracından InSAR tekniği kullanarak yüksek doğrulukta sayısal yükseklik modeli üretmeyi başarmıştır [12]. Bu çalışmadan sonra ERS-1 (1991), JERS-1 (1992), ve RADARSAT (1995) ile uzay araçlarının interferometri çalışmalarında kullanılması hızla artmıştır.

Ayrıca, üçüncü bir SAR görüntüsü kullanarak yeryüzündeki hareketin tespitinin yapıldığı yeni bir InSAR tekniği olan diferansiyel InSAR (Differetial InSAR: DInSAR) 1989 yılında Gabriel, Goldstein ve Zebker tarafından geliştirilmiştir [13].

1995 yılından Avrupa Uzay Ajansı (ESA: European Space Agency) tarafından ERS-2'nin fırlatılması InSAR araştırmaları için bir dönüm noktasıdır. ERS-1 ve ERS-2 uyduları, tandem modunda birer gün arayla uyumlu InSAR girdileri oluşturarak interferometrik SAR uygulamasını çok daha kolay ve başarılı hale getirmişlerdir [14].

2000 yılının şubat ayında ilk global tek geçişli uydu interferometrik SAR, Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Servis aracı (shuttle) uzay aracına bağlı bir anten taşırken, bir de uzay aracının sonundaki 60 metrelik direğe bağlı başka bir anten bulunmaktadır. On bir günlük uçuş boyunca SRTM, C ve X bantlarında yeryüzünün %80'ine ait InSAR verisini toplamıştır. Bu veri, NASA ve DLR (German Aerospace Center) tarafından işlenmiş ve Amerika için 30 metre, diğer bölgeler için 90 metre çözünürlüklü sayısal yükseklik modelleri elde edilmiştir [15].

InSAR tekniği uygulanmaya başlandığından beri; topoğrafya haritalarının oluşturulmasında [15]-[16], yeryüzü deformasyon analizinde [17]-[18], heyelanlarda [19], çökmelerde [20], buzul hareketlerinin gözleminde [21]-[22], volkanik araştırmalarda [23]-[24], okyanus dalgaları araştırmalarında [25] ve arazi sınıflandırmada [26] kullanılmıştır ve günümüzde de halen kullanılmaya devam edilmektedir.

1.2. Radargrametri'nin Tarihsel Gelişimi

İlk rardargrametri projesi, 1967 yılında Panama'nın Dairen şehrindeki RAMP haritalama projesidir [27]. Ancak radargrametri kelimesi ise biraz daha eskiye dayanır. 1960 yılında D. Levine tarafından yazılmış olan "Radargrammetry" isimli kitap ile ilk defa kullanılmıştır. Kitapta, şu sıralar uzaktan algılama alanında önemini kaybetmiş olan çok spesifik bir radar görüntüleme gerçeklemesi anlatılmaktadır [7]. Levine radargrametriyi,

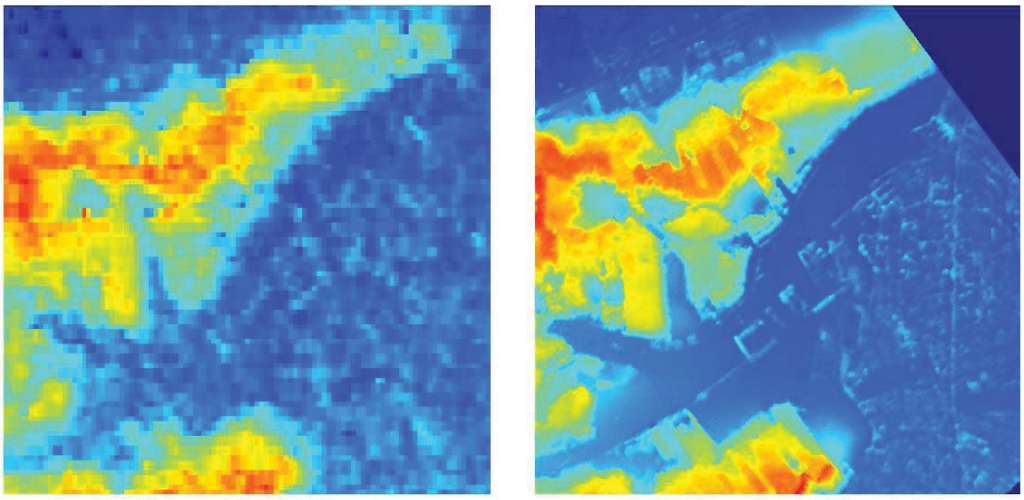
"Radar yardımıyla güvenilir ölçümlere ulaşma bilimi" olarak tanımlamıştır. Ancak bu tanımlama hem görüntüleme radarlarını hem de diğer radarları kapsadığı için fotogrametri analojisinden uzaktır. Bu sebeple Leberl radargrametriyi, radar görüntülerinden geometrik bilginin çıkartılması teknolojisi olarak tanımlamıştır [7]. Fotogrametri optik kamera fotoğraflarını işlemeye verilen isim iken, radargrametri tekniği radar görüntüleri kullanmaktadır. Fotogrametri ile birçok benzer yönü olmasına karşın, sensör modelinden uygulama farklılıklarına kadar birçok ayırt edici farkları da bulunmaktadır.

Radar görüntüleme ve radargrametri askeri alanda da öne çıkmıştır. 1950 ve 1960'larda tek bakışlı radarlar (SLR) ve dairesel taramalı radarlar (CSR) görüntüleme için kullanılmışlardır. Tek bakışlı radarlar kıtaların keşfedilmemiş bölgelerini görüntülemede ve okyanuslarla ilgili çalışmalarda yoğun olarak kullanılmıştır. Tek bakışlı radarlardaki mikrodalgaların bulutlara ve yağmura nüfuz edebilmesi, bu tip radarların hava durumundan bağımsız çalışabilmesine imkân sağlamaktadır. Radar görüntülemenin gece-gündüz fark etmeksizin çalıştırılabilmesi, hava koşullarından bağımsız olması ve çok geniş alanların görüntülemesini yapabilmesi pasif görüntülemeye göre bazı avantajlarıdır. Tüm bu sebeplerle; NASA'da SIR ve EOS, Avrupa Uzay Ajansında (ESA) ERS-1, Japonya'da JERS-1, Kanada'da RADARSAT gibi birçok görüntüleme radarına sahip uydu çalışması başlamış ve tüm dünyada uydu görüntüleme trendi hâkim olmuştur [7].

Aktif mikrodalga görüntüleme ile ilgili olarak NASA ciddi bir motivasyona sahiptir. İlk olarak 1972'de Apollo-17 projesi [28] ile başlayan çalışmalar 1978'de SEASAT uydusu ile devam etmiştir [29]. Uçak üzerinden ilk sayısal radar görüntüleme 1970'lerde başlasa da GPS ile birlikte kombine çalışan görüntüleme sistemleri 1989 yılında Amerika Silahlı Kuvvetleri için 1,5 metre çözünürlükte bir sistem olarak geliştirilmiştir [30].

1.3. SAR İnterferometri ve Radargrametri Literatürü

Mark Richards'ın interferometri konusuna başlayanlar için rehber niteliğinde 2007 yılında yayımladığı çalışmasında [5], InSAR teorisi ve uygulamaları temel adımlarıyla beraber anlatılmıştır. Yayınında ilk olarak daha önceki çalışmalara değinerek bir giriş yapmıştır. Sayısal yüzey modellerinden ve buradaki DTED (Digital Terrain Elevation Data) standartlarından bahsetmiştir. Şekil 1-1'de SRTM kullanarak oluşturulmuş DTED seviye 2 SYM ve E-SAR verisi kullanarak üretilmiş DTED seviye 3 SYM görülmektedir.



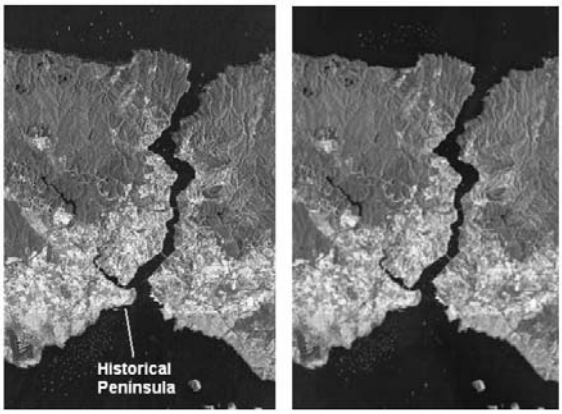
Şekil 1-1. İki farklı DTED Seviyesinde Sayısal Yükseklik Modeli [5]

Temel InSAR denklemini vererek interferometrik faz yardımıyla yükseklik tespitini uçuş geometrisi ile harmanlayarak özetlemiştir. Çalışmasının ilerleyen bölümünde uydu ve uçak SAR interferometrisinden, tekli ve çoklu geçiş farkından bahsedip SAR ve InSAR ilişkisini matematiksel olarak açıklamıştır. InSAR'daki faz farkının yüksekliğe olan etkisi ve interferometrik faz farkının ölçümü detaylı olarak anlatılmıştır [5].

Son olarak InSAR işleme adımlarından bahsetmiştir. Burada adımlar, tek tek detaylı olarak anlatılmıştır. Ayrıca SAR interferometri tekniğiyle sayısal yükseklik modeli oluşturmak için en önemli ve en problemli adım olan katlı fazın açılması basamağı üzerinde oldukça fazla durulmuştur. Katlı interferometrik faz farkının tahmini ile başlayıp iki boyutlu fazın açılması dört farklı yaklaşım ile anlatmıştır. Daha sonra açılmış faz ile yüzey modelinin kestiriminden bahsetmiş ve bunun hassasiyeti ile ilgili bazı matematiksek çözümlemeler yapmıştır. Son bölümde ise diğer interferometrik uygulamalardan kısaca bahsetmiş ve sayısal yükseklik modeli oluşturma gibi bir diğer önemli SAR İnterferometri tekniği uygulaması olan Faz Uyumlu Değişiklik Tespitine değinmiştir.

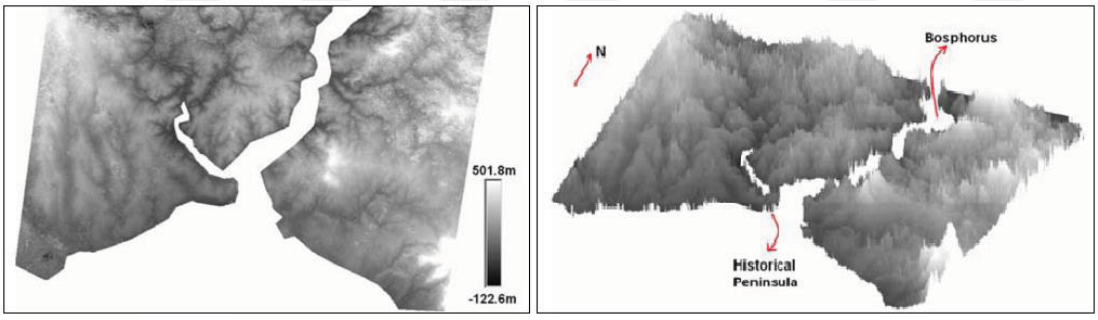
Andon Dimitrov Lazarov 2010 yılında yaptığı yayınında [31], temel InSAR prensiplerinden, InSAR geometrisinden matematiksel çıkarımlarını da paylaşarak bahsetmiştir. Çakıştırma ve katlı fazın açılması gibi bazı adımlara da kısaca değinmiştir. Algoritmalardan çok detaylı olarak bahsedilmemiş olsa bile bu bildiri, genel InSAR bilgisi adına yararlı bir giriş kaynağı niteliğindedir.

Sefercik'in 2011 yılındaki çalışmasında [32], spot ve şerit SAR modlarında elde edilmiş görüntüler üzerinden InSAR işlem adımları ve bu adımlardaki önemli kriterler anlatılmaktadır. InSAR tekniğine girdi görüntü olarak Şekil 1-2'deki görüntü çifti verilmiştir.



Şekil 1-2: TSX SM İstanbul – SAR Görüntü Çifti [32]

Baz uzaklık kestirimi, çakıştırma, interferogram oluşturma, düzleştirme ve filtreleme, katlı fazın açılması, yörünge düzeltmesi, fazdan yükseklik çıkarımı ve coğrafi konumlandırma bildiri boyunca üzerinde durulan adımlardır. InSAR adımları sırasıyla uygulandıktan sonra üretilen Sayısal Yükseklik Modeli Şekil 1-3'te paylaşılmıştır.



Şekil 1-3: InSAR Tekniği ile Üretilen SYM ve 3 Boyutlu Gösterimi [32]

Son olarak üretilen Sayısal Yükseklik Modellerinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Burada dikkat çeken noktalardan bir tanesi girdi görüntülerin Türkiye'den İstanbul Boğazı olmasıdır. Bir diğer dikkat çeken ayrıntı ise bildiri boyunca bahsi geçen tüm adımların rafta hazır ticari ürünler kullanılarak sonuçların paylaşılması olmuştur. Yani burada herhangi bir algoritma geliştirme işlemi yapılmamış ENCI'nın SARscape modülü ve ERDAS gibi hazır araçlar kullanılarak sonuçlara ulaşılmıştır.

Li ve Bethel 2008 yılındaki çalışmalarında [33] SYM üretimi ve diğer interferometrik uygulamalar için son derece önemli bir adım olan çakıştırma/hizalama adımı üzerinde

durmuşlardır. İlk olarak kaba çakıştırma daha sonra da hassas çakıştırma detaylı olarak anlatılmıştır. Bildiri içerisinde çakıştırma algoritmalarının teorik arka planı da detaylı olarak verilmiştir. Yazarlar, birçok farklı parametre kullanarak ERS-1/2 tandem modu görüntülerini çakıştırmaya çalışmışlar ve bu çalışma sonucundaki analizleri detaylı olarak paylaşmışlardır. Analizleri yaparken çakıştırma doğruluk kriteri olarak tüm görüntünün ortalama faz uyum değerini ve katlı fazı açtıktan sonra üretilen SYM'nin doğruluğunu dikkate almışlardır. Böylelikle bir görüntü çifti için hangi doğrulukta çakıştırma yapabildiklerini ölçebilmişlerdir. Bildiri, daha önceki yapılmış çalışmaları da her bölümde ayrı olarak karşılaştırmalı analiz ederek çakıştırma işlemi ile ilgili yazılmış birçok yayın ve kitap bölümü içerisinde en faydalı ve anlaşılır kaynak olma özelliğini taşımaktadır.

Li doktora tezinde [1], 2008 yılında tez hocası Bethel ile yapmış olduğu yayına benzer konularda çalışmıştır. Genel SAR interferometri konusunda bilgiler verdikten sonra çakıştırma adımını doktora tezinde tüm detayları ile irdelemiştir. Makalelerinde değinmediği hassas çakıştırma adımının başarı düzeyini artırmak için yaptığı ekstra adımları tezinde detaylı olarak anlatmaktadır. Doktora tezinde ayrıca sayısal yükseklik modelinin oluşturulduğu kısımdan da bahsetmektedir. Doktora tez çalışmasında interferometrik SAR adımlarının kalbi niteliğinde olan katlı faz açma adımı için ERDAS aracını kullanmıştır.

Hanssen, "Radar Interferometry" isimli 2001 yılı basımlı kitabında [34] interferometrik SAR uygulamalarından bahsetmiştir. Daha sonra genel radar prensiplerini ve interferometri algoritmasını anlatan yazar radar interferometrinin fonksiyonel modelini ve stokastik modelini ayrı birer bölüm halinde ele almıştır. Sonraki iki bölümün birinde deformasyon analizi yaparken, son bölümde ise atmosferik görüntüleme üzerinde durmuştur.

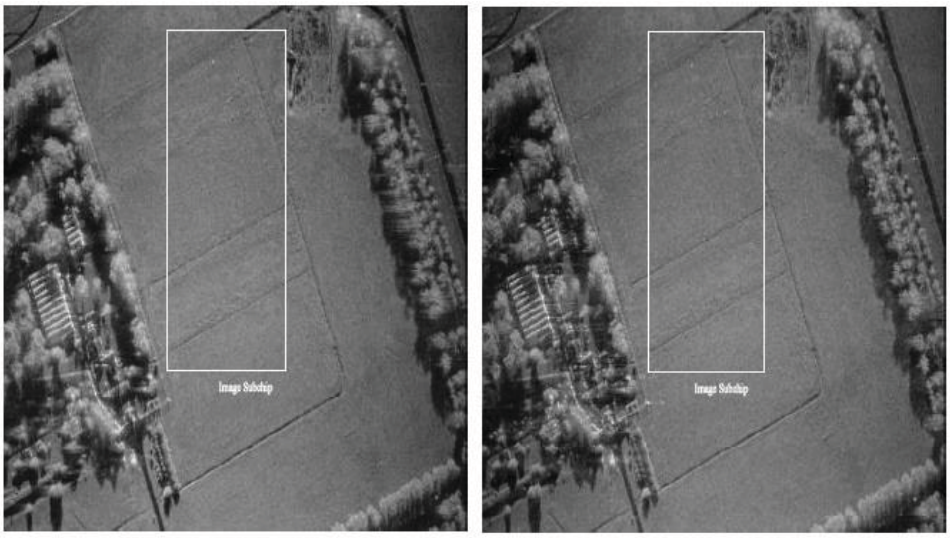
Hein, "Processing of SAR Data" isimli kitabında [35] genel SAR teorisi ve SAR sinyal işleme adımlarını anlatmıştır. Son bölümde ise SAR interferometri kısmına girmiş ve sayısal yükseklik modeli oluşturma ile ilgili blok şemaları ve her bir bloğun özetini görsel olarak açıklayıcı bir şekilde paylaşmıştır. Çakıştırma adımı üzerinde yoğun bir şekilde durmuş ve bu adım ile ilgili faydalı bilgiler sunmuştur.

Madsen, 2010 yılında yaptığı yüksek lisans çalışmasında [36] interferometrik SAR uygulamalarından faz uyumlu değişiklik tespiti üzerine araştırmalar yapmıştır. Çoklu

açıklık faz uyumlu değişiklik tespiti yaparak faz uyum haritaları oluşturmuştur ve açıklık sayısının etkisini analiz etmiştir. Tezin büyük bir kısmında interferometrik SAR uygulamaları için hayati bir öneme sahip olan çakıştırma adımı üzerinde durmuştur. Burada Jakowatz'ın da kitabında yer alan "thin plate spline" metodunu kullanarak çakıştırma işlemini yapmaya çalışmıştır [37].

Singh, SAR interferometri uygulaması olarak toprak kaymaları ile ilgili yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında [38] diğer tüm SAR interferometri uygulamalarından özet olarak bahsetmiştir. Sayısal yükseklik modeli oluşturmak için olmazsa olmaz adım olan katlı faz açma adımına ayrıca değinmiştir. Tezinde üzerinde durduğu toprak kaymaları için İsviçre Alplerini ve Moğolistan Altay dağlarını örnek olarak incelemiştir.

Preiss'in 2004 yılında yazdığı doktora tezinde [39] SAR interferometri kullanarak değişikliklerin tespit edilmesi detaylı olarak anlatılmıştır. Tezinde ilk olarak spot SAR görüntüsü ile ilgili bilgiler vererek başlamış ve spot SAR görüntüsü için çok önemli bir adım olan otomatik odaklama algoritmasını bir bölüm halinde anlatmıştır. Sonraki adımda SAR interferometri üzerinde durmuş ve ilerleyen bölümde interferometrik değişiklik tespitinden bahsetmiştir. Son bölümde ise uçak ile spot modunda alınmış SAR görüntüleri için değişimin log likelihood istatistiği ile modellenmesi, teorisi ve değişim tespiti için örnek bir uygulama anlatmıştır [40]. Yaptıkları çalışmaların sonuçları interferometrik SAR uygulaması olan faz uyumlu değişiklik tespiti çalışmaları açısından görülmeye değerdir.



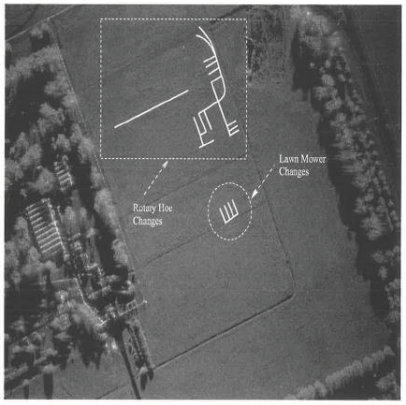
(a) (b)

Şekil 1-4: Farklı zamanlarda Alınmış SAR Görüntü Çifti [39]

İlk olarak uçak ile (a) (b)

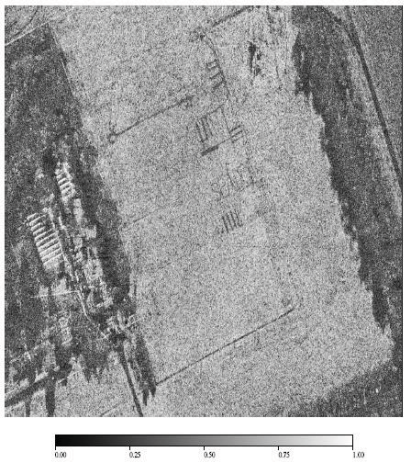
Şekil 1-4'teki alan aydınlatılmış ve (a) görüntüsünün oluşturulduğu ham veri toplanmıştır. Daha sonra görüntülenmek istenen alanda Şekil 1-5'deki gibi arazi üzerinde birtakım değişiklikler yapılmış ve aynı alan çok benzer bir güzergâh izlenerek tekrar aydınlatılmış ve ham veri toplanıp(a) (b)

Şekil 1-4'te sağ tarafta yer alan (b) SAR görüntüsü oluşturulmuştur.



Şekil 1-5: İkinci SAR Görüntüsü Alınmadan Önce Arazide Yapılan Değişiklikler [39]

Elde edilen SAR görüntü çifti interferometrik SAR işlemlerinden faz uyumlu değişiklik tespiti yapmak için gayet uygun bir SAR görüntü çiftidir ve standart adımlar uygulanıp faz uyumluluk haritası oluşturulduğunda iki görüntü arasında yapılmış değişiklikler Şekil 1-6'daki gibi gayet net bir şekilde ortaya çıkmıştır.



Şekil 1-6: Faz Uyumlu Değişiklik Tespiti Haritası [39]

Hoonyol doktora çalışmasında [41] SAR, İnterferometri ve Faz uyumlu görüntüleme ile ilgili genel bilgiler vererek bir giriş yaptıktan sonra SAR ve InSAR veri işleme algoritmasının prensiplerini anlatmıştır. Daha sonra InSAR yeryüzeyi uygulaması olarak

faz uyumluluk teorisi ve yansız faz uyumluluk kestirimi için topoğrafik etkilerin çıkartılması ile diferansiyel faz uyumluluk elde edilmesini hedeflemiştir. Sahra çölünde olan değişiklik tespitine yönelik olarak interferometrik SAR teknikleri yardımıyla faz uyumlu görüntüler çıkarmıştır. Aynı şekilde İspanya'da olan toprak değişimleri ve erozyonlara ilişkin çalışmalar yapmıştır.

SAR İnterferometri ile ilintili en kapsamlı dokümanlardan bir tanesi de Avrupa Uzay Ajansı'ndan (ESA) Massonnet ve Ferretti'nin birlikte yazdıkları ve üç ayrı bölümden oluşan InSAR prensipleri isimli rehberdir [42]. Dokümanda matematiksel analizleriyle beraber tüm interferometrik SAR işlem adımları detaylı olarak anlatılmıştır.

Katlı Faz Açma algoritmaları literatürde yoğun olarak incelenmiş ve halen de çalışma yapılmaya devam edilen bir alandır. SAR interferometrinin kalbi niteliğinde olan bu adım yüksek doğrulukta sayısal yükseklik modeli üretebilmek için kritik öneme sahiptir. Bugüne kadar birbirinden farklı yaklaşımlar kullanılarak katlı faz açılmaya çalışılmıştır. 2019 yılında Çin'de yazılan bir değerlendirme yayınında [43] bilinen tüm katlı faz açma algoritmaları analiz edilmiş ve algoritmalar en genel haliyle tasnif edilmiştir. Yıllara göre yapılmış çalışmaların istatistikleri çıkarılmış ve genel eğilimin hangi yönde olduğuna dair ipuçları paylaşılmıştır.

Katlı faz açma algoritmaları ile ilgili yapılmış tüm çalışmaların ve tüm yayınların tek ortak referansı olan "Two Dimensional Phase Unwrapping Theory, Algorithms and Software" isimli kitap Dennis C. Ghiglia ve Mark D. Pritt tarafından yazılmıştır [44]. Kitap, doktora çalışmalarıma temel kaynak teşkil etmesi sebebiyle tamamen etüt edilmiştir. İlk bölümünde katlı faza giriş yapılmakta, ikinci bölümde yol izleme metoduna dayalı katlı faz açmada kullanılan kalıntı kavramı ve iki boyutlu katlı faz açma anlatılmaktadır. Üçüncü bölümde faz verisi, rehber haritalar, maskeler ve filtreler detaylandırılmaktadır. Dördüncü bölüm yol izleme metoduna dayalı katlı faz açma algoritmalarını, beşinci bölüm ise en küçük norm metoduna dayalı katlı faz açma algoritmalarını anlatmaktadır. Altıncı ve son bölümde ise dört ve beşinci bölümde yer alan algoritmalar kıyaslanmaktadır. Kitabın oldukça büyük bir bölümü de eklerden oluşmaktadır. Ek kısımda teorik altyapısını anlattığı birçok katlı faz açma algoritmasının kodları paylaşılmıştır.

Kitabın yazarlarından Mark D. Pritt'in yaptığı yayında [45], Yol İzleme metoduna dayalı katlı faz açma yöntemleri ile En Küçük Kareler metoduna dayalı yöntemleri kıyasladığı

görülmektedir. Sekiz farklı algoritma çok kısa olarak özetlenmiş ve aynı boyuttaki sekiz farklı veri seti için algoritmalar çalıştırılarak süre, bellek ihtiyacı, rehber harita ve kalıntı gereksinimi yönleriyle kıyaslanmıştır. Karşılaştırma olarak oldukça faydalı bir yayın olmakla beraber alternatif algoritmaların performans kıyaslamasını yapmak için referans niteliği de taşımaktadır.

Kitabın yazarlarından Dennis C. Ghiglia'nın Louis A. Romero ile yazdığı makalede [46] ise ölçülen orijinal katlı faz ile katlı fazın gradienti arasındaki farkların ortalama hata kareleri kare kökünü en küçük yapmaya çalışan gerçek faz değerini bulmaya çalışmaktadır. Bu problemi çözerken iki boyutlu ayrık kosinüs dönüşümü (Discrete Cosine Transform – DCT) kullanmaktadır. Algoritmanın basit versiyonu ağırlıklandırılmamış en küçük kareler algoritmasıdır. Ağırlıklandırma yapılarak ve iteratif yöntemler kullanılarak da katlı faz açılmıştır. Makalede bazı sentetik veriler üzerinden örnek sonuçlar da paylaşılmıştır.

Yol İzleme Metoduna dayalı katlı faz açma algoritmalarının en bilineni Goldstein-Zebker-Werner (GZW) algoritmasıdır [12]. Algoritmada ilk olarak interferogramdaki kalıntılar belirlenir ve kalıntıların nasıl birleştirileceğine dair bir sistematik oluşturulur. Birleştirilen kalıntılar artık Branch-Cut adı verilen bariyerleri oluşturmuştur ve bu katlı faz açılırken bu bariyerler üzerinden geçmeyecek şekilde bir yol izlenecektir. Algoritmaya ait detaylar bildiride paylaşılmıştır. Kalıntı sayısını azaltmaya yönelik bazı iyileştirmeler de mümkündür. Alternatif katlı faz açma algoritmaları için referans niteliği taşımaktadır. Bu sebeple oldukça fazla atıf yapılmış bir yayın özelliği taşımaktadır.

Goldstein ve Yanping Lu'nun çıkardıkları yayında [47] bilinen katlı faz açma algoritmalarının Mark Richards'ın da deyimiyle güzel bir kıyaslamasını yapmışlardır. Sentetik veriler dışında gerçek veriler de kullanarak çizelgeler ile algoritmaların kıyaslamasını gerçekleştirmişlerdir. Farklı SNR seviyesi için algoritmaların başarımlarını, sürelerini ve doğruluk yüzdelerini çıkarmışlardır.

Goldstein ve Werner çalışmalarında [48], uyarlanır (adaptive) filtreleme algoritması ile interferogramın katlı faz açma adımının iyileştirmesi ve ölçüm doğruluğunun arttırılması anlatılmaktadır.

Sayısal yükseklik modeli üretimi ile ilgili olarak Qing ve arkadaşları 2004 yılında yazdıkları makalelerinde [49] InSAR tekniğiyle yüksek çözünürlüklü Sayısal Yükseklik

Modeli elde edilirken katlı fazı açma basamağından önce farklı filtreleme yöntemleri uygulanmasının bu işlem basamağının başarımına etkileri incelemektedirler.

Zebker ve Lu yaptıkları çalışmalarında [50] radar interferometri için katlı faz açmada kullanılan bazı bilinen algoritmaları kıyaslamışlardır. Mark Richards bu çalışma için yapılmış en iyi karşılaştırmalardan biri diye bahsetmektedir [5]. Ayrıca çalışmada yol izleme yöntemine dayalı algoritmaların interferogramdan hesaplanan kalıntı sayısının çok fazla olduğu durumda üretilen branch-cut veya mask-cut fazlalığı sebebiyle fazı açılamayan bölgeler kalacağını ve 3 boyutlu yükseklik modelinde hatalı çukurlar oluşacağını söylemektedir. Bu durum da kalıntıların bir kısmının bariyerler oluşturulmadan önce elenmesi gerektiğini doğrulamaktadır.

Constantini ağ programlama veya ağ akış yöntemi isminde yeni bir katlı faz açma yaklaşımı tanımlamıştır [51]. Bu yaklaşım katlı fazın gradientini kısıtlı ağlarda benzetmiş ve hataların 2π'nin tamsayı katları şeklinde olmasından yararlanmıştır. Bu aşamadan sonra problem tam sayı değişkenlerinden oluşan bir global en küçükleme (minimizasyon) problemine dönüşmüştür. Bu temel yaklaşım; Chen ve Zebker'in çalışmalarında [52] enine boyuna detaylandırılmış, genişletilmiş ve güzel bir şekilde tanımlanmıştır. Chen istatistiksel maliyet ağ akış yaklaşımı ile radar interferometri için iki boyutlu katlı faz açma çözümü ile doktora çalışmaları yapmıştır [53].

Naresh Soni yüksek lisans tez çalışmasında [54] katlı faz açmada kenar bulma ve istatistiksel maliyet fonksiyonu kullanan bir algoritma üzerine çalışmalar yapmıştır. Tezinde; yol izleme metoduna dayalı yöntemleri, L^p-Norm en iyilemeyi ve ağ-akışı algoritmalarını kısaca özetlemiş ve daha sonra Pencereli Fourier Dönüşümü'nü kullanarak kenar bulma algoritması geliştirerek maliyet hesabı yapmış ve SNAPHU çözümleyicisini kullanarak katlı faz açma işlemini gerçekleştirmiştir.

Radargrametri denilince akla gelen ilk isim Leberl olmaktadır. Çünkü konu ile ilgili rehber kabul edilen kitabın [7] tek yazarıdır. Kitapta yan bakışlı radar görüntüsü oluşturmaktan başlayarak, SAR görüntüleme tiplerini, SAR görüntü kalite metriklerini, geometrik problemleri, SAR görüntü karakteristiğini anlatmaktadır. Ayrıca SAR görüntü düzeltmesini, eşleştirmesini, çakıştırmasını detaylandırmıştır. Radargrametri tekniğinin tüm teorik altyapısı kitapta verilmektedir. Kitapta, Radargrametri için SAR görüntülerinden geometrik bilginin çıkarılması teknolojisi olarak bahsedilmektedir.

Leberl'in, Fullerton ve Marque ile yaptığı çalışma [55] radargrametri ile ilgili yapılan ilk ciddi çalışmalardan biridir. Çalışmada aynı bölgenin farklı yönlerden bakarak alınmış (Opposite-Side) SAR görüntüleri kullanarak yükseklik bilgisinin elde edilmesi anlatılmaktadır. Stereo görüntüleme konusunun SAR görüntülerinde uygulandığı ilk çalışmalardan biridir. Paralaks denklemleri ve yükseklik bilgisinin çıkartılmasını sağlayan formüller çalışma içerisinde paylaşılmıştır.

Fayard, Meric ve Pottier çalışmalarında [56] radargrametri prensiplerini anlatmışlardır. Radargrametrinin işlem adımlarını kısaca anlattıktan sonra klasik eşleştirme algoritmalarının iyileştirilmesine yönelik öneriler sunmuşlardır. Eşleştirme yöntemi olan epipolar geometri ve piramit yaklaşımını teorik altyapılarıyla birlikte sunmuş ve karşılaştırmalı analizlerini yapmışlardır. Ham veri olarak Endeavour uydusunun 1994 yılına ait verilerini kullanmışlar ve radargrametri tekniğini kullanarak ürettikleri yükseklik modelini kıyaslarken referans olarak SRTM Sayısal Yükseklik Modellerini kullanmışlardır.

Fayard, Meric ve Pottier radargrametrinin en önemli adımı sayılabilecek eşleştirme adımına daha detaylı baktıkları bir diğer çalışmada [57] ise hem sentetik hem de gerçek ham veriler kullanmışlardır. Farklı eşleştirme algoritmaları kullanarak piksel altı eşleştirme denemeleri yapmışlardır. Ayrıca HH, VV, HV, VH olmak üzere polarizasyon değişikliğinin etkisini de incelemişlerdir.

Fayard, Meric ve Pottier radargrametri konusuna tüm detayları ile baktıkları "Geosicence and Remote Sensing" isimli kitabın 20. Bölümünde [58] ilk olarak radar görüntülemenin detaylarını, SAR görüntü oluşturmayı, çözünürlükleri ve SAR görüntülerinde karşılaşılan genel problemlerin teorik arka planını anlatmışlardır. Radargrametri algoritmasının tüm işlem adımlarını derinlemesine incelemişler ve yine Endeavour uydusunun ham SAR görüntüleri üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlardır. Son bölümde de ürettikleri Sayısal Yükseklik Modellerini referans modeller ile karşılaştırarak hata analizleri çıkarmışlardır.

Lu ve Kiang çalışmalarında referans bir nokta kullanarak stereo tekniği ile yükseklik bilgisini çıkarmışlardır. Yayınlarına SAR görüntü oluşturma akış diyagramını vererek başlamışlar stereo tekniğini özetlemişler ve daha sonra gerçek SAR görüntüleri kullanarak deneysel çalışmalar yapmışlardır. TerraSAR-X uydusuna ait parametreleri vermişler ve üç farklı konum için stereo tekniğini uygulamışlardır. Çıkardıkları yükseklik modellerinde 1 metre altında hata ortalamasına sahip sonuçlar elde etmişlerdir.

Chen, danışman hocası Dowman ile yaptığı ilk çalışmada [60] topoğrafya haritası çıkarmadan InSAR tekniğine alternatif olan stereo / radargrametri tekniğini incelemiş ve RADARSAT verisi kullanarak sonuçlar üretmiştir. Sonraki yayınlarında [61] otomatik üretilen yer kontrol noktaları ve Stereo-SAR tekniği ile üretilmiş sayısal yükseklik modeli kullanarak SAR görüntülerinin coğrafik konunlandırmasını yapmışlardır. Bu çalışmada da RADARSAT verileri kullanmışlardır. Chen, doktora tezinde de [62], Stereo-SAR görüntülerinden uzaysal bilginin çıkarılmasını içeren geniş kapsamlı bir çalışma yapmıştır.

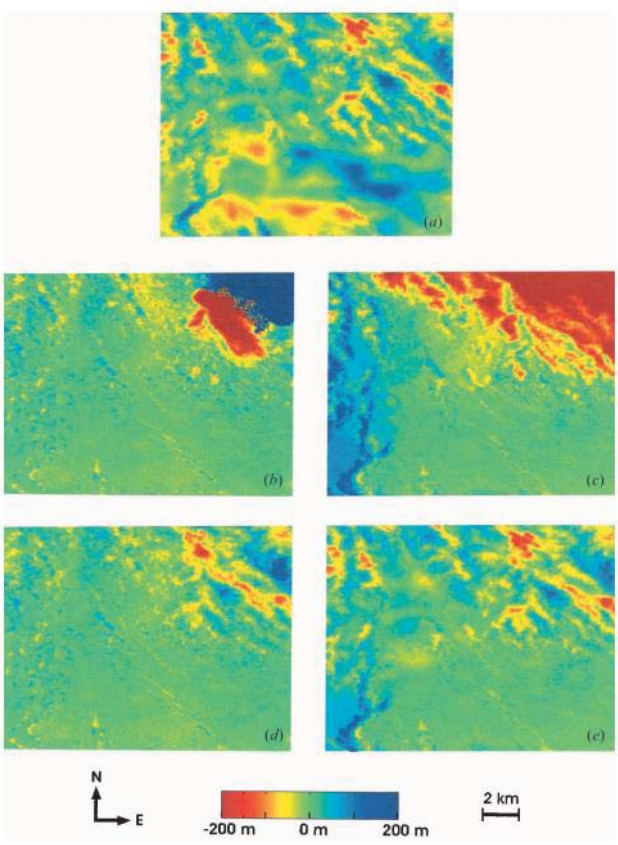
Henri Maitre tarafından yazılmış "Processing of Synthetic Aperture Radar Images" isimli kitabın 10. Bölümü [63] tamamen radargrametri konusuna ayrılmıştır. Fotogrametri prensiplerinden başlayarak radargrametri konusuna girilmiş ve algoritmanın işlem adımları sırasıyla detaylı olarak anlatılmıştır. Özellikle geometrik geriçatım kısmındaki denklemler ve denklemlerin çıkarımı konusunda faydalı bilgiler sunulmuştur. SAR görüntüsü oluşturulurken platformun bakış açısına bağlı olarak oluşan etkiler de bölüm içerisinde incelenmiştir.

Capaldo, Fratarcangeli, Nascetti, Pieralice, Porfiri ve Crespi'nin birlikte yazdıkları "High Resolution Radargrammetry – 3D Terrain Modeling" isimli kitap bölümü, "Land Applications of Radar Remote Sensing" kitabında bulunmaktadır [64]. Bölümde StereoSAR geometrik modeli, yörünge hesaplama, bağlantı noktası kullanarak kontrol etme ve görüntü eşleştirme stratejileri bulunmaktadır. COSMO-SkyMed ve TerraSAR-X verileri kullanarak kontrol noktaları üzerinden hatalar çıkarılmıştır. Son kısımda ileriye yönelik öneriler maddeler halinde paylaşılmıştır.

Radargrametri ve interferometri konusunu beraber inceleyen çalışmalardan ilkini Crosetto ve Aragues birlikte yapmışlardır [8]. Çalışmalarında; Sayısal Yükseklik Modeli üretmek için iki tekniği birlikte kullanmışlar, sonuçları doğrulamışlar ve birleştirmeye çalışmışlardır. Yayında kısaca iki teknik de özetlenmiştir. RADARSAT verilerini kullanarak her iki tekniğin de sonuçlarını çıkarmışlar ve hata oranlarını tablo üzerinde karşılaştırmışlardır. Son bölümde ise çıktıları birleştirmek ve füzyon işlemine tabi tutmaktan bahsetmişler ve özellikle dağlık bölgelerde radargrametrinin yüksek hata yaptığını ve füzyon sonucunda gözle görülür bir iyileşme gördüklerini paylaşmışlardır.

Radargrametri ve interferometi tekniklerini kullanarak üretilen Sayısal Yükseklik Modellerinin füzyon işlemine tabi tutulması ile ilgili en kapsamlı çalışmalardan biri de

Gelautz, Paillou, Chen ve Zebker tarafından yapılmıştır [65]. Yayının ilk kısımlarında her iki teknik de teorik arka planlarıyla birlikte anlatılmıştır. İlerleyen bölümlerde hem RADARSAT hem de ERS-2 uydularına ait SAR görüntülerinden teknikler kullanılarak Şekil 1-7'deki üç boyutlu topoğrafyalar üretilmiştir. Bu aşamada ERDAS yazılımı kullanılmıştır. Üretilen çıktı modellerin füzyon işlemine tabi tutulmasında baz alınan yaklaşım da detayları ile paylaşılmıştır. Çalışmada bahsi geçen yaklaşım, bu tez çalışması içerisinde Eşik Değer Kullanılarak Statik Füzyon olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 1-7: Radargrametri ve SAR İnterferometri Teknikleri Kullanılarak Üretilen SYM'ler [65], (a): RADARSAT verisi ile radargrametri tekniği kullanılarak üretilen SYM, (b): RADARSAT verisi ile SAR interferometri tekniği kullanılarak üretilen SYM, (c): ERS-2 verisi ile SAR interferometri tekniği kullanılarak üretilen SYM, (d): (a) ve (b) füzyonu [RADARSAT – RADARSAT Füzyonu], (e): (a) ve (c) füzyonu [RADARSAT – ERS-2 Füzyonu]

Füzyon işlemi sonrası ve öncesindeki hata oranları da çalışmada paylaşılmıştır. Füzyon işlemi ile her iki teknikten de daha iyi sonuçlar alındığı gözlenmektedir.

Yu, Li, Ge ve Chang'ın yaptıkları çalışmada [66], SAR interferometri ve radargrametri teknikleri kullanılarak sayısal yükseklik modelleri üretilmiştir. Her iki teknik, algoritma

adımları ve akış şemalarıyla birlikte anlatılmış ve deneysel sonuçlar paylaşılmıştır. L bantta çalışan ALOS/PALSAR ve C bantta çalışan ERS-1 uydu görüntüleri kullanılarak her iki tekniğin avantajları ve dezavantajları gösterilmiştir.

Copa, Poli ve Remondino'nun birlikte yazdıkları "Fusion of Interferometric SAR and Photogrammetric Elevation Data" isimli kitap bölümü, "Land Applications of Radar Remote Sensing" kitabında bulunmaktadır [67]. Kitap bölümünde farklı uyduların SAR görüntüleri ile interferometri tekniği kullanılarak üç boyutlu sayısal yükseklik modelleri üretilmiştir. Ayrıca uydulardaki optik sensörler ile fotogrametri tekniği kullanılarak da benzer topoğrafyalar elde edilmiştir. Buradaki algoritma adımları ve akış şemaları detayları ile anlatılmıştır. Son bölümde ise her iki tekniğin çıktılarının füzyon işlemine tabi tutulması paylaşılmıştır. Tekniklerin çıktıları belli bir kalite parametresi üzerinden ağırlıklandırılarak interpolasyon işlemine tabi tutularak nihai topoğrafya elde edilmektedir.

Saygın Abdikan, Füsun Balık Şanlı ve Zübeyde Alkış yaptıkları çalışmada [68] C bandında çalışan ve HH polarizasyonun alınmış RADARSAT uydusunun verilerine stereo SAR ve interferometrik SAR tekniklerini kullanarak sayısal yükseklik modelleri üretmişlerdir. İzmit körfez bölgesine ait SAR görüntüleri tekniklere uygun geometride toplanmıştır. Yükseklik bilgisi çıkarılırken yer kontrol noktaları kullanılmış ve nokta sayısı arttıkça sonuç ürün değerlerinin doğruluğunun da arttığı belirlenmiştir. Karşılaştırmalı analizler yapılmış ve eğim arttıkça her iki tekniğin de hata yaptığı ancak düz alanlarda stereoSAR tekniğinin, yüksek bölgelerde ise interferometri tekniğinin yüksek doğrulukta çalıştığı görülmüştür. Bu çalışmada kullanılan SAR görüntüleri yazarlardan rica edilerek alınmış ve doktora çalışmalarım kapsamında analiz edilmiştir.

SAR İnterferometri ve Radargrametri konularında ülkemizde de bazı lisansüstü çalışma yapılmıştır. Saygın Abdikan yüksek lisans tez çalışması kapsamında [68] numaralı bildirisinde özetlediği çalışmayı detayları ile analiz etmiştir [69]. Doktora çalışması kapsamında ise SAR görüntüleri üzerinden deformasyon analizi yapmıştır [70]. Türkiye'de yer alan iki farklı maden bölgesindeki çöküntülerin hesaplanması için interferometrik teknikler kullanılmıştır.

Özkan Eren İstanbul Teknik Üniversitesi'nde yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında [71] uydu görüntülerinden 3. boyut bilgisinin çıkarılmasını incelemiştir. İnterferometri yöntemini kabaca uygulamaya çalışmış, uygun veri setini bulmak ve veri setinden

interferogramı oluşturabilmek için gerekli ön adımları anlatmıştır. ERDAS yazılımını kullanarak interferometrinin diğer adımlarını da incelemiş ve sonunda SRTM referans verileri ile hata payını hesaplamıştır. RADARSAT verileri kullanılmış, algoritmalar ERDAS yazılımı üzerinden çalıştırılmıştır.

Hamit Beran Günçe Akdeniz Üniversitesi'nde yaptığı yüksek lisans tez çalışması [72] kapsamında SAR interferometri tekniği ile Batı Antalya bölgesi heyelanlarını incelemiştir. Çalışma, SAR interferometrinin kullanım alanlarından olan yeryüzü deformasyon analizi uygulamasıdır. Tez kapsamında yapılan çalışmada Sentinel-1 uydusunun verileri kullanılmıştır. Yazılım olarak ESA'ya ait Snap yazılımı tercih edilmiştir.

Kürşat Uslu İstanbul Teknik Üniversitesi'nde yaptığı tez çalışması [73] kapsamında InSAR tekniğini incelemiş ve katlı faz açma ile ilgili kullanılan algoritmalardan birinin simülasyonunu gerçekleştirmiştir. Tez aşamasında herhangi bir hazır yazılım kullanılmamış, algoritmalar ve çalışmalar yazar tarafından benzetim ortamında bizzat kodlanmıştır. Özellikle çakıştırma adımının ve katlı faz açma adımının öneminden bahsedilmiş ve katlı faz açma adımında iki boyutlu hızlı Fourier dönüşümü yolu ile en küçük kareler yönteminin simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Osman Atilla Akabalı Yıldız Teknik Üniversitesi'nde yaptığı tez çalışmasında [74] Stereo SAR görüntüleri ile otomatik SYM üretilmesi konusunu araştırmıştır. Tez kapsamında RADARSAT verileri kullanılmış ve PCI EASIZPACE görüntü işleme yazılımından faydalanılmıştır.

1.4. Motivasyon

Uydular ve hava platformları üzerine konuşlu SAR sensörleri yardımıyla toplanmış yeryüzüne ait SAR görüntüleri bulunmaktadır. SAR görüntüleri birlikte kullanılarak görüntü içerisindeki bölgeye ait farklı bilgiler de elde edilebilmektedir. SAR interferometri ve radargrametri, SAR görüntülerinin kıymetlendirilmesinde kullanılan tekniklerin en önde gelenleridir. Her iki teknik de aynı bölgeye ait en az birer çift SAR görüntüsüne ihtiyaç duymaktadır. Bu teknikler yardımıyla farklı bakış açıları ile alınmış aynı bölgeye ait iki boyutlu SAR görüntülerinden bölgenin üç boyutlu sayısal yükseklik modeli çıkarılmaktadır.

Tez çalışmasına başlarken motivasyonumuzun odağı SAR İnterferometri tekniği ile SAR görüntülerinin kıymetlendirilmesi ve sonuç olarak sayısal yükseklik modelinin oluşturulmasıydı. Ancak tezin hemen başında radargrametri tekniği kullanılarak da benzer çıktılarının alınabilmesinden dolayı tez kapsamı her iki tekniğin birden analiz edilmesini içerecek şekilde genişlemiş oldu. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda, hem SAR interferometi tekniği hem de radargrametri tekniğinin tüm operasyon adımları teorik olarak incelenmiştir. Bu kapsamlı çalışmalara ait detaylar *Bölüm 2* ve *Bölüm 3*'te yer almaktadır.

SAR interferometri analizi, tekniğin kalbi niteliğinde olan iki boyutlu katlı faz açma algoritmalarının detaylı analizi üzerine kurulmuş oldu. Ancak yine de katlı fazı açma adımından önceki adımların analiz edilip benzetimlerinin yapılmadan geçilmesi mümkün olmadığı için SAR interferometri tekniği baştan sona benzetim ortamında gerçeklenmiştir. Ayrıca, radargrametri tekniği de benzetim ortamına aktarılmıştır. Böylelikle SAR görüntülerinin kıymetlendirilmesini sağlayan bu tekniklerin çalıştırıldığı bir yazılım altyapısı geliştirilmiştir. Çalışmalara ait detaylar *Bölüm 5*'te yer almaktadır.

Tezin ilerleyen aşamalarında, daha yüksek kalitede Sayısal Yükseklik Modeli elde etmek amacı doğrultusunda SAR interferometri tekniğinin katlı faz açma adımında yapılan hataları azaltmak ve yeni bir yaklaşımla katlı faz açma adımını gerçekleme motivasyonu haiz oldu. Benzer girdileri kullanarak farklı operasyonlar ile sayısal yükseklik modeli üreten bu interferometri ve radargrametri tekniklerini füzyon işlemine tabi tutarak daha anlamlı ve doğru çıktılar üretilebileceği düşüncesiyle iki farklı füzyon kurgusu oluşturuldu. Statik olarak isimlendirilen füzyon işleminde tekniğin çıktıları üzerinden bir füzyon işlemi yapılırken, dinamik füzyonda ise interferometri tekniğinin kalbi niteliğindeki katlı faz açma bloğuna radargrametri tekniğinin çıktısı bir rehber olarak verilerek her iki teknik iç içe çalıştırılmakta ve daha doğru bir topoğrafya elde edilmektedir. Böylelikle SAR interferometri ve radargrametri teknikleri, hem çıktı yükseklik modelleri üzerinden füzyon işlemine tabi tutulurken hem de yenilikçi bir yaklaşımla teknikler birleştirilerek tek bir çıktı Sayısal Yükseklik Modeli elde edilebilmektedir. Bu çalışmalara ait detaylar *Bölüm 4*'te yer almaktadır.

1.5. Tez Çalışmasının Literatüre Katkıları

Tez kapsamında yapılan çalışmalar esas olarak "SAR İnterferometri ve Radargrametri Teknikleri" ve "SAR İnterferometri ve Radargrametri Tekniklerinin Statik ve Dinamik Füzyonu" olarak iki başlık altında toplanmaktadır. Her bir grupta yapılan çalışmalar için, literatüre katkı verdiği değerlendirilen noktalar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- SAR İnterferometri ve Radargrametri Teknikleri
    - SAR verileri sensörün bulunduğu platforma özgü bir formatta kaydedilmektedir. Çoğu zaman veri formatı özel bir araç olmadan açılamamaktadır. Bu sebeple sıklıkla rastlanılan veri formatlarının çözüldüğü, paketin veri ve metaveri olarak ayrıştırıldığı bir altyapı oluşturulmuştur.
    - SAR interferometri ve Radargrametri teknikleri birçok operasyonel adımdan oluşmaktadır. Özellikle InSAR'da yer alan çakıştırma/hizalama ve katlı fazın açılması adımları ile Radargrametride yer alan Eşleştirme adımı kritik öneme sahiptir. Tez kapsamında InSAR ve Radargrametri tekniklerine ait tüm işlem adımlarının bulunduğu, parametre seçimlerinin kolaylıkla yapılabildiği, literatürde yer alan alternatif algoritma seçeneklerinin yer aldığı bir InSAR ve Radargrametri teknikleri kullanıcı arayüzü ve benzetim altyapısı geliştirilmiştir.
    - SAR interferometri ve Radargrametri tekniklerinde yer alan işlem adımlarındaki farklı algoritmaların performanslarını test edebilmek amacıyla gerçek veriler dışında sentetik verilere de ihtiyaç duyulmuştur. Bu kapsamda SAR interferometri tekniği için faz farkı bilgisini içeren, Radargrametri tekniği için paralaks değerleri üreten sensör konumları girilebilir, gölge etkisi, insan yapısı gibi etkilerin isteğe bağlı eklenip çıkartılabildiği sentetik veri üreteci benzetim altyapısı oluşturulmuştur.
    - SAR interferometri tekniği ile Sayısal Yükseklik Modeli oluşturulması algoritması, yine SAR interferometri tekniği ile Faz Uyumlu Değişiklik Tespiti algoritmasının tüm adımlarını içermektedir. Faz Uyumlu Değişiklik Tespiti algoritmasının nihai çıktısı olan Korelasyon Haritası tez kapsamında üretilmiştir.

- Korelasyon haritasının yanı sıra Sözde Korelasyon Haritası, Faz Türev Varyansı Haritası, En Yüksek Faz Türevi Haritası ve Genlik Değişiklik Tespiti Haritası da üretilmiştir. Ayrıca haritalardaki değişikliğin tespiti için belirginleştirme algoritmaları da geliştirilmiştir.
- Katlı Faz Açma adımı için literatürde var olan birbirinden farklı tüm algoritmalar teorik arka planlarıyla beraber analiz edilmiştir. Ayrıca yol izleme metoduna dayalı katlı faz açma algoritmalarının tamamı benzetim ortamında gerçeklenmiştir. Hesaplama karmaşıklığı yüksek olmasından kaynaklı yavaş çalışan algoritmalardan bazıları C/C++ dilinde kodlanarak süre testleri ve analizleri de çıkartılmıştır. Sentetik ve gerçek verilerle benzetimi yapılan tüm katlı faz açma algoritmaları çalıştırılmıştır. Bu kapsamda katlı faz açma algoritmaları için rehber niteliğinde bir çalışma olmuştur.

- SAR İnterferometri ve Radargrametri Tekniklerinin Statik ve Dinamik Füzyonu
  - SAR interferometri ve Radargrametri teknikleri, aynı bölgeye ait farklı bakış açılarıyla toplanmış SAR görüntü çiftlerinden yükseklik bilgisi çıkaran iki farklı tekniktir. SAR interferometri tekniği, aralarında düşük baz uzaklık bulunan iki farklı konumdan alınmış SAR görüntülerini kullanır. Baz uzaklık sebebiyle görüntüler arasında oluşan faz farkı bilgisi katlı olarak elde edilir. SAR interferometri tekniği, katlı fazı açarak görüntülenen bölgeye ait yükseklik modelini çıkarır. Radargrametri tekinği ise SAR görüntülerinin sadece genlik bilgisini kullanır ve faz bilgisine ihtiyaç duymaz. Oldukça farklı bakış açıları ile toplanmış SAR görüntülerine ihtiyaç duyar. Radargrametri tekniği, görüntülenen bölgedeki aynı noktanın girdi SAR görüntülerinde farklı piksellere düşmesinden kaynaklanan geometrik bilgiyi kullanarak yükseklik modelini oluşturur. Görüldüğü üzere tekniklerin yükseklik modeli oluşturma algoritmaları oldukça farklıdır. Bu sebeple ürettikleri çıktılardaki hata karakteristikleri ve hata kaynakları da birbirinden farklıdır. Yine de benzer bir sonuç üretmeleri sebebiyle çıktıları füzyon işlemine tabi tutulabilir ve teknikler bütünleştirilebilir. Tekniklerin çıktıları olan Sayısal Yükseklik Modelleri çeşitli prosedürler uygulanarak

birleştirilebilir. Tez kapsamında bu işleme Statik Füzyon denilmiştir. Ayrıca teknikler birbirini geri besleyecek şekilde bir bütün olarak çalıştırılıp tek ve nihai Sayısal Yükseklik Modeli oluşturulabilir. Bu işleme de tez kapsamında Dinamik Füzyon ismi verilmiştir.

- Statik Füzyon, her iki tekniğin çıktısından daha kaliteli bir çıktı elde etmek amacıyla tekniklerin çıktıları olan Sayısal Yükseklik Modellerinin belirli bir prosedüre göre ve belirli bir kalite metriği ile orantılı olarak ağırlıklandırılarak birleştirilmesi işlemidir. Tez kapsamında statik füzyon işlemi için, eşik değer üzerinden ve ağırlıklandırılmış Holder ortalamaları kullanılarak SYM'ler birleştirilmiştir. Toplam yedi farklı algoritma seçeneği bulunan statik füzyon için kalite metriği olarak SAR interferometri tekniği içerisinde üretilen beş farklı haritanın tamamı kullanılmıştır. Tüm haritalar için tüm statik füzyon algoritmaları denenmiş, hata hesaplamaları yapılmış ve algoritmaların karşılaştırmaları tamamlanmıştır.
- Tekniklerin çıktısı olan Sayısal Yükseklik Modellerinin her ikisinde de oluşan hata aynı bölgede ise statik füzyon işlemi sonucunda oluşan yeni yükselik modelinde de aynı bölgede hata görülecektir. Bu durumu engellemek amacıyla ve hatanın daha oluşmadan çözülmesi düşüncesi ile dinamik füzyon algoritması geliştirilmiştir. Tez kapsamında geliştirilen dinamik füzyon algoritmaları ile radargrametri çıktısı olan Sayısal Yükseklik Modeli, SAR interferometri tekniğinin katlı faz açma adımına geri besleme ile rehber olarak verilerek SAR interferometri tekniğinin belli bir hata eşiğini aşmaması sağlanmıştır. Böylelikle SAR interferometri tekniğinin katlı faz açma adımında yapılması muhtemel bölgesel büyük hatalar yapılmadan önlenmiş ve katlı faz yüksek doğrulukta açılarak normalden daha yüksek doğrulukta ve bölgesel büyük hataları olmayan SYM'ler elde edilmiştir. Bu kapsamda bahsi geçen tüm çalışmaların modellemeleri yapılarak benzetim altyapısı tamamlanmıştır.

1.6. Tez Raporunun İçeriği

Tez, 7 Ana Bölüm ve 3 Ek Bölümden oluşmaktadır.

İlk bölümde Radar, Sentetik Açıklıklı Radar ve onun iki uygulaması olan SAR interferometri ve radargrametri tekniklerinin tarihsel gelişimi hakkında bilgi verilmiş, konularla ilgili literatürde yer alan çalışmaların bir özeti sunulmuş, çalışmanın motivasyonundan ve literatüre katkılarından bahsedilmiştir.

2.bölümde İnterferometrik Sentetik Açıklıklı Radar (InSAR) tekniğinin uygulama alanlarından bahsedilmiştir. Uygulamalardan biri olan InSAR tekniği kullanılarak Sayısal Yükseklik Modeli oluşturulması algoritması anlatılmıştır. Tezin literatüre yapacağı katkı açısından InSAR tekniğindeki tüm işlem adımları en ince ayrıntılarına kadar irdelenmiştir.

3.bölümde Radargrametrik SAR tekniği kullanılarak Sayısal Yükseklik Modelinin oluşturulmasına dair algoritmik yaklaşımlar sunulmaktadır.

4.bölümde her iki teknikle üretilen Sayısal Yükseklik Modellerinin füzyonuna ait teorik arka plan anlatılmış ve algoritma işlem adımları detaylandırılmıştır. Tekniklerin nihai çıktıları üzerinden yapılan Statik Füzyon işlemi ve tekniklerin birbirini besleyecek şekilde çalıştırılarak tek bir nihai Sayısal Yükseklik Modelinin oluşturulduğu Dinamik Füzyon işlemi bu bölümde anlatılmaktadır.

5.bölümde İnterferometrik SAR ve Radargrametrik SAR algoritmalarının tüm işlem adımlarının benzetim gerçekleme detayları ve sentetik/gerçek SAR görüntüleri kullanılarak üretilen çıktıları paylaşılmıştır. Her iki teknik kullanılarak üretilmiş Sayısal Yükseklik Modellerinin statik ve dinamik füzyonu incelenmiş ve karşılaştırmalı analizleri yapılmıştır.

6.bölüm sonuçların ve gelecek çalışmaların anlatıldığı ve yorumlarımızın verildiği kısımdır.

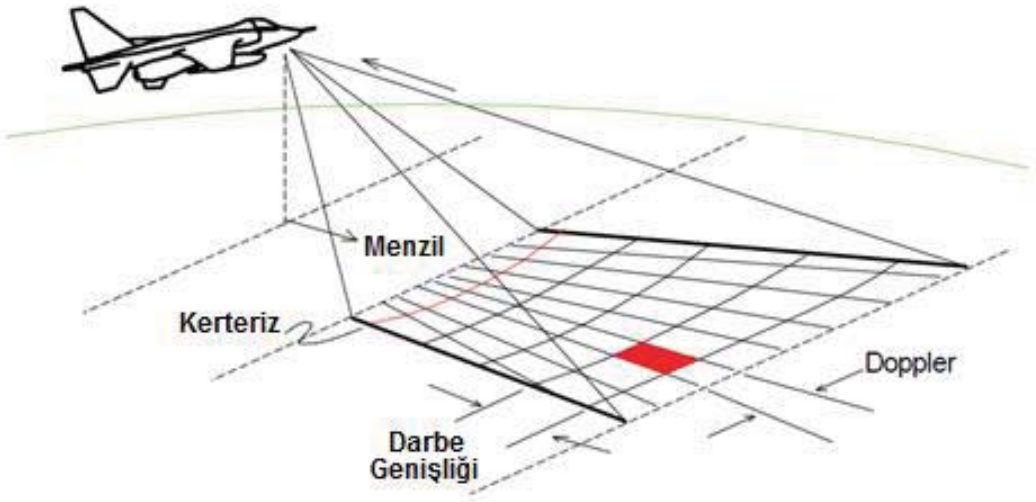
7.bölüm tez içerisinde başvurulan kaynakların yer aldığı bölümdür.

Ek Bölümlerin ilkinde tez kapsamında yapılan kullanıcı arayüzü ve özellikleri paylaşılmış, ikinci kısımda tezden üretilmiş yayınlara ve bildirilere yer verilmiştir. Üçüncü ek bölümde ise tez çalışması orijinallik raporu bulunmaktadır. Eklerden sonra ise yazarın kısa özgeçmişi yer almaktadır.

2. SAR İNTERFEROMETRİ (InSAR)

2.1. Sentetik Açıklıklı Radar

Sentetik Açıklıklı Radar (SAR), bir bölgenin yüksek çözünürlüklü görüntüsünü elde etmek amacıyla kullanılan, işlemcisinde büyük boyutlu bir antene eşdeğer sentezleme gerçekleştirerek çapraz menzilde yüksek çözünürlük sağlayan bir radar sistemidir [75]. SAR sensörü ile hedeften geri yansıyan sinyaller iki boyutlu genlik ve faz bilgisine sahip kompleks sinyaller olarak kaydedilip işlenerek genlik veya kompleks görüntü verisine dönüştürülmektedir [76]. Kullanım alanları olarak SAR, hem keşif amaçlı olarak yeryüzünün coğrafik özelliklerinin çıkarılması ve yerküredeki yapısal değişikliklerin takip edilmesi gibi sivil alanlarda önemli bir yere sahipken, hem de yer hedeflerinin takibi gibi askeri alanda birçok uygulamada kullanılmaktadır [77].



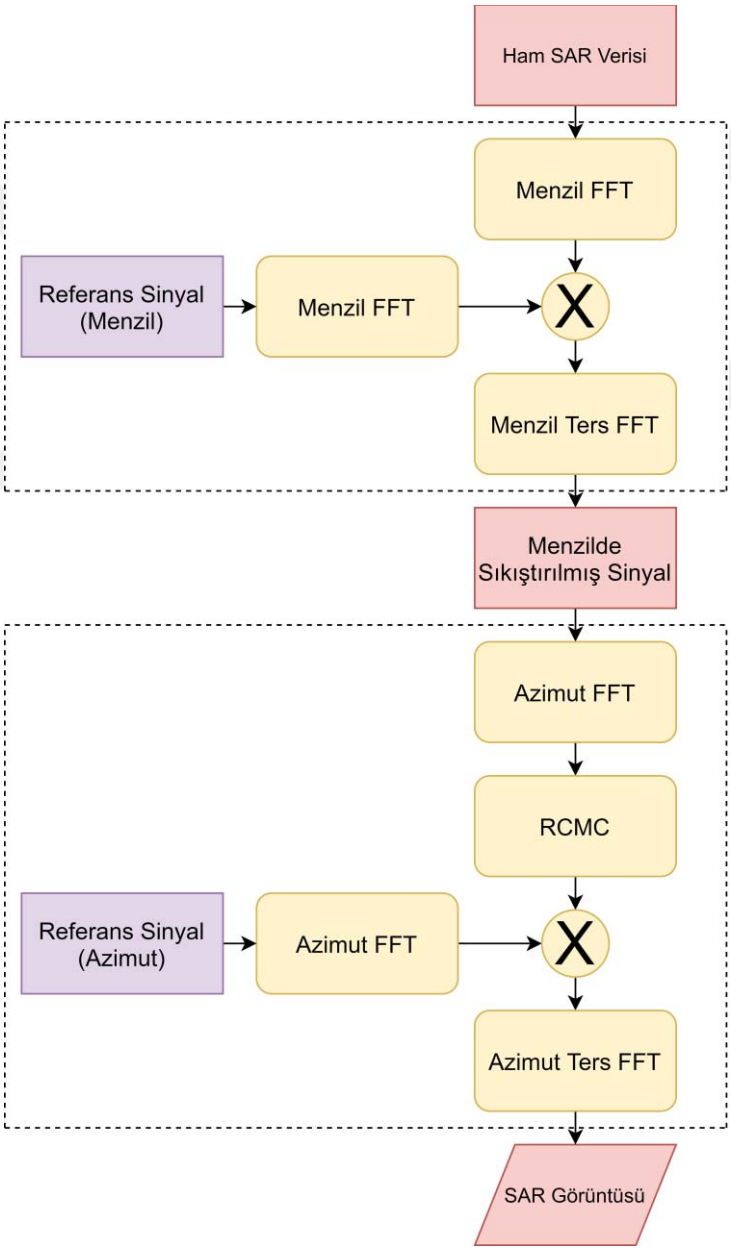
Şekil 2-1. Sentetik Açıklıklı Radar [78]

Sentetik Açıklıklı Radarda Şekil 2-1'de görüldüğü üzere SAR'ı taşıyan hareketli platformun uçuş yönüne dik olan menzilde ve uçuş yönüne paralel ancak menzile dik olan çapraz menzilde iki boyutlu görüntü elde edilir. Menzilde çözünürlük taşıyıcı frekans etrafında frekansı zamanla değişen ötüş sinyali (Chirp) seçilerek geniş bant genişliği sağlanmakta ve yeterli uzunluktaki darbe süresi ile istenen menzil çözünürlüğüne ulaşılmaktadır [4], [79]. Çapraz menzilde gerçekleştirilen görüntülemenin de yüksek çözünürlüğe sahip olması için çok büyük boyutta bir anten kullanılması gerekir ki pratikte

bu büyüklükte bir anteni hareketli bir platforma takıp görüntüleme yapabilmek mümkün olmamaktadır. SAR sistemlerinde bu problemin çözümü, küçük boyutlu bir antenle platformun hareketi vesilesiyle elde edilen çoklu gözlemler bütünleştirilerek büyük bir antenin sentezlenmesiyle gerçekleştirilmektedir [80].

2.1.1. Temel SAR Görüntü Oluşturma Algoritması

Sentetik Açıklıklı Radar taşıyan platform hareket halindeyken, görüntülenecek bölgeye belli sayıda darbeler gönderir ve bölgeden geri yansıyan sinyalleri faz uyumlu olacak şekilde birleştirip işleyerek ilgili bölgenin yüksek çözünürlüklü görüntüsünü oluşturur.



Şekil 2-2: Menzil Doppler Algoritması

Menzil Doppler Algoritması (Range-Doppler Algorithm) iki ana adımdan oluşmaktadır. Bunlardan ilki menzilde sıkıştırma (Range Compression), diğeri çapraz menzilde sıkıştırmadır (Azimuth Compression).

- Menzilde sıkıştırma menzil boyunca gönderilen chirp sinyali ile yansıyıp geri dönen sinyal arasındaki zamanda korelasyondur. Frekans dönüşüm bölgesinde ilgili sinyallerin çarpımı olarak ifade edilebilir.
- SAR sensörü taşıyan platform hareket ettiğinde Doppler frekans değişimi olur. Bu frekans değişimi, başka bir Doğrusal Frekans Modülasyonlu (LFM) sinyal olarak görünür. Çapraz menzilde sıkıştırma, menzilde sıkıştırılmış SAR verisi ile çapraz menzil referans fonksiyonuna göre Doppler değişimi olan sinyal arasındaki korelasyondur. Menzilde sıkıştırma ile aynı şekilde frekans dönüşüm bölgesinde ilgili sinyallerin çarpımı olarak ifade edilebilir.

2.1.2. SAR Görüntü Modeli Özellikleri

SAR sensörü ile toplanan veriler SAR algoritmasında işlendikten sonra SAR görüntüleri oluşur ve bu görüntüler iki boyutlu kompleks görüntülerdir. Her piksel (p) Eşitlik 2.1'deki gibi iki sayıdan oluşmaktadır: *Re* (Gerçel – Real) ve *Im* (Sanal – Imaginary)

$$p = Re \pm Im.j \tag{2.1}$$

SAR görüntü piksellerine ait büyüklük değerini *(A)* hesaplamak için Eşitlik 2.2 kullanılır.

$$A = \sqrt{Re^2 + Im^2} \tag{2.2}$$

SAR görüntü piksellerine ait faz değerini *(φ)* hesaplamak için Eşitlik 2.3 kullanılır. Faz değeri her zaman -π ile π arasında veya 0 ile 2π arasında olacaktır.

$$\varphi = arctan\left(\frac{Im}{Re}\right) \tag{2.3}$$

SAR görüntü piksellerine ait gerçel bileşen değerini *(Re)* hesaplamak için Eşitlik 2.4 kullanılır.

$$Re = A cos\varphi \tag{2.4}$$

SAR görüntü piksellerine ait sanal bileşen değerini *(Im)* hesaplamak için Eşitlik 2.5 kullanılır.

$$Im = A sin\varphi \tag{2.5}$$

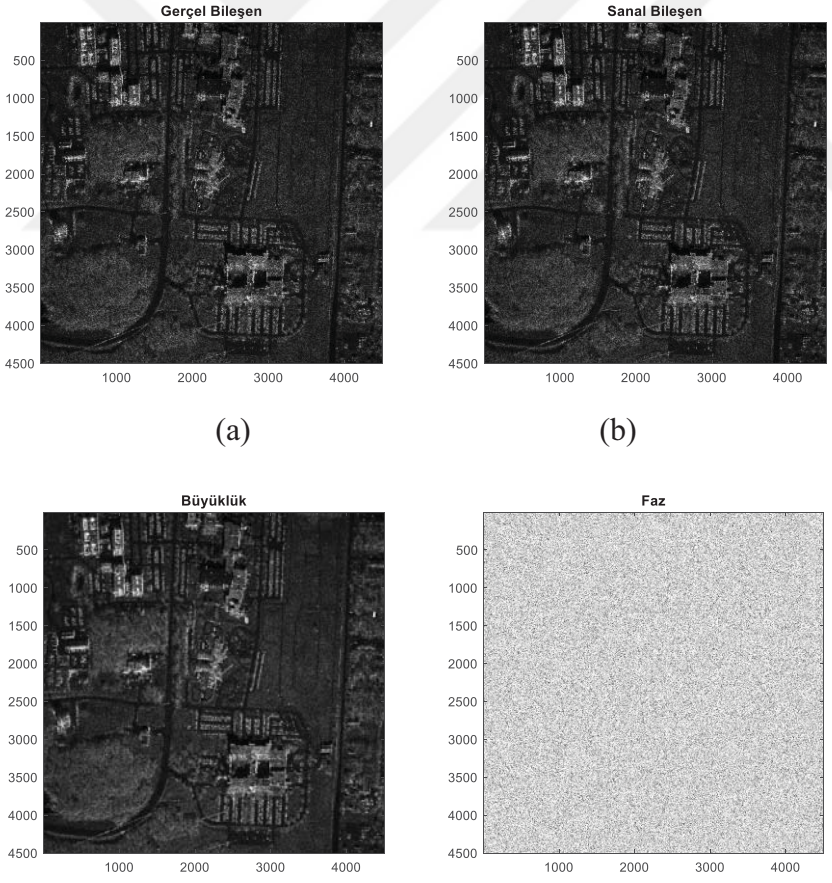
SAR görüntü piksellerine ait trigonometrik formül Eşitlik 2.6'da verilmiştir.

$$p = A(cos\varphi + jsin\varphi) \quad 2.6$$

SAR görüntü piksellerine ait eksponansiyel formül Eşitlik 2.7'de verilmiştir.

$$p = Ae^{j\varphi} \quad 2.7$$

Şekil 2-3'te X-Bant AFRL SAR sensörüne ait bir SAR görüntüsü örnek olarak verilmiştir. AFRL tarafından sağlanan bu SAR görüntüleri 4501x4501 boyutunda kompleks görüntülerdir. (a) gerçel bileşeni, (b) sanal bileşeni, (c) büyüklüğü ve (d) fazı göstermektedir. SAR görüntülerine [81]'de verilen bağlantıdan ulaşılabilmektedir. Bu görüntüleri kullanan [82]'deki çalışmada da interferometrik SAR tekniği olan faz uyumlu değişiklik tespiti uygulaması yapılmıştır.



Şekil 2-3: Tek Bakışlı Kompleks SAR Görüntüsü (a): Gerçel Bileşeni, (b): Sanal Bileşeni, (c): Büyüklüğü, (d): Fazı

2.1.3. SAR Sensörü Taşıyan Uydular

Uydu SAR sistemlerinde genel olarak X, C ve L bantları kullanılmaktadır. Bu bantlarda çalışan uydu SAR sistemlerine ilişkin temel özellikler Çizelge 2-1 ve Çizelge 2-2'de verilmiştir [83], [84], [85].

Çizelge 2-1: SAR Sistemleri Bantları ve Dalgaboyları

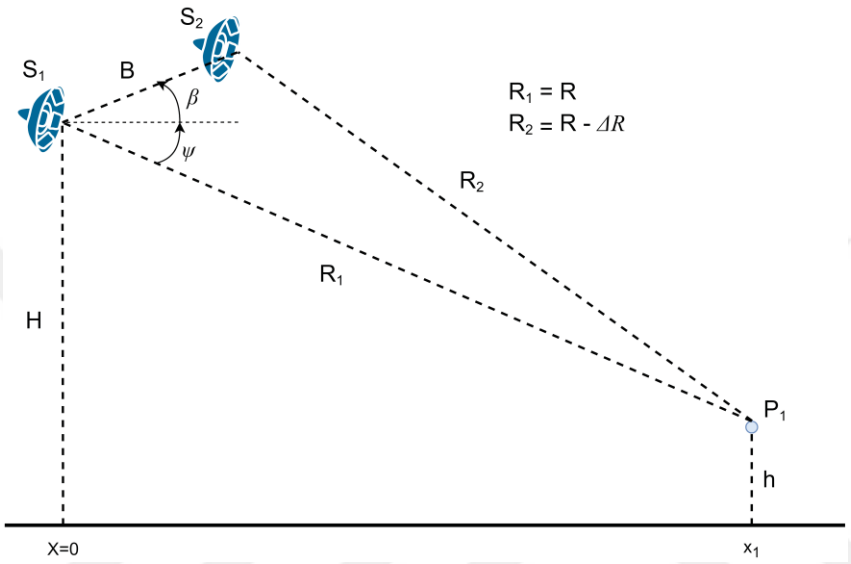
Bant	Frekans Aralığı	Dalgaboyu Aralığı	Örnek Uydular
X	8 - 12 GHz	2.50 cm - 3.75 cm	TERRASAR-X, TANDEM-X
C	4 - 8 GHz	3.75 cm - 7.50 cm	ERS-1/2, RADARSAT
L	1 - 2 GHz	15.0 cm - 30.0 cm	ALOS, J-ERS-1

Çizelge 2-2: SAR Sensörleri

Uydu	Tarih	Frekans Bandı	Dalga Boyu	Ülke
SEASAT	1978	L	25.0 cm	NASA / ABD
ERS-1	1991-2000	C	5.66 cm	Avrupa Uzay Ajansı (ESA)
J-ERS-1	1992-1998	L	23.5 cm	Japonya
SIR-C	1994	X, C , L	3.1 cm, 5.66 cm, 24.0 cm	NASA / ABD
ERS-2	1995	C	5.66 cm	Avrupa Uzay Ajansı (ESA)
RADARSAT	1995	C	5.66 cm	Kanada
SRTM	2000	X, C	3.1 cm, 5.66 cm	NASA / ABD
ENVISAT	2002	C	5.63 cm	Avrupa Uzay Ajansı (ESA)
ALOS	2006	L	23.6 cm	Japonya
TerrraSAR-X	2007	X	3.1 cm	DLR / Almanya
TanDEM-X	2010	X	3.1 cm	DLR / Almanya
COSMO-SkyMed	2007	X	3.1 cm	İtalya
RISAT	2012	C	5.3 cm	Hindistan
PAZ	2013	X	3.1 cm	İspanya
SAOCOM	2015	L	23.6 cm	Arjantin

2.1.4. SAR Görüntü Kıymetlendirme Geometrisi

Sentetik Açıklıklı Radar ile oluşturulan SAR görüntüleri farklı teknikler kullanılarak bölgeye ait görüntü kıymetlendirilebilmektedir. Kıymetlendirme için kullanılacak teknikler, genellikle aynı bölgenin birebir aynı açıdan farklı zamanlarda alınmış ya da belli bir baz uzaklıkla alınmış birden fazla SAR görüntüsüne ihtiyaç duyarlar. Baz uzaklığın seçimi ise kullanılacak kıymetlendirme tekniğine göre farklılık arz etmektedir.



Şekil 2-4: Stereo Görüntüleme Geometrisi

Genel bir stereo görüntüleme geometrisi Şekil 2-4'te verilmiştir. H yüksekliğinde bir SAR sensörü ve ondan β açısıyla B baz uzaklığında ikinci bir SAR sensörü bulunmaktadır. Referans düzleminde x_1 uzaklığında h yüksekliğinde duran P noktasına sensörler $R_1 = R$ ve $R_2 = R\text{-}\Delta R$ uzaklıktadırlar.

Sensörler ve P noktasından oluşan üçgende kosinüs teoremi uygulandığında Eşitlik 2.8 elde edilecektir.

$$(R - \Delta R)^2 = R^2 + B^2 - 2BRcos(\psi + \beta) \qquad 2.8$$

P noktasının yüksekliği de Eşitlik 2.9'da verilmiştir.

$$h = H - Rsin(\psi) \qquad 2.9$$

P noktasının yüksekliğindeki bir değişim iki sensör arasındaki uzaklık farkında da bir değişime neden olacaktır. Bu durum Eşitlik 2.10'da verilmiştir.

$$\frac{dh}{d(\Delta R)} = \frac{dh}{d\psi}\frac{d\psi}{d(\Delta R)} = \frac{dh}{d\psi}\frac{1}{d(\Delta R)/d\psi} \qquad 2.10$$

Eşitlik 2.9'un ψ'a göre türevi alındığında Eşitlik 2.11 elde edilecektir.

$$dh/d\psi = -Rcos(\psi) \tag{2.11}$$

$R \gg B$ ve $R \gg \Delta R$ olduğu varsayıldığında Eşitlik 2.8, Eşitlik 2.12'ye dönüşecektir.

$$\Delta R \approx Bcos(\psi + \beta) \tag{2.12}$$

Eşitlik 2.12'nin ψ'a göre türevi alındığında,

$$d(\Delta R)/d\psi \approx -Bsin(\psi + \beta) \tag{2.13}$$

Eşitlik 2.10, Eşitlik 2.11 ve Eşitlik 2.13 kullanılarak tekrar yazıldığında Eşitlik 2.14 elde edilecektir.

$$\frac{dh}{d(\Delta R)} \approx \frac{Rcos(\psi)}{Bsin(\psi + \beta)} \tag{2.14}$$

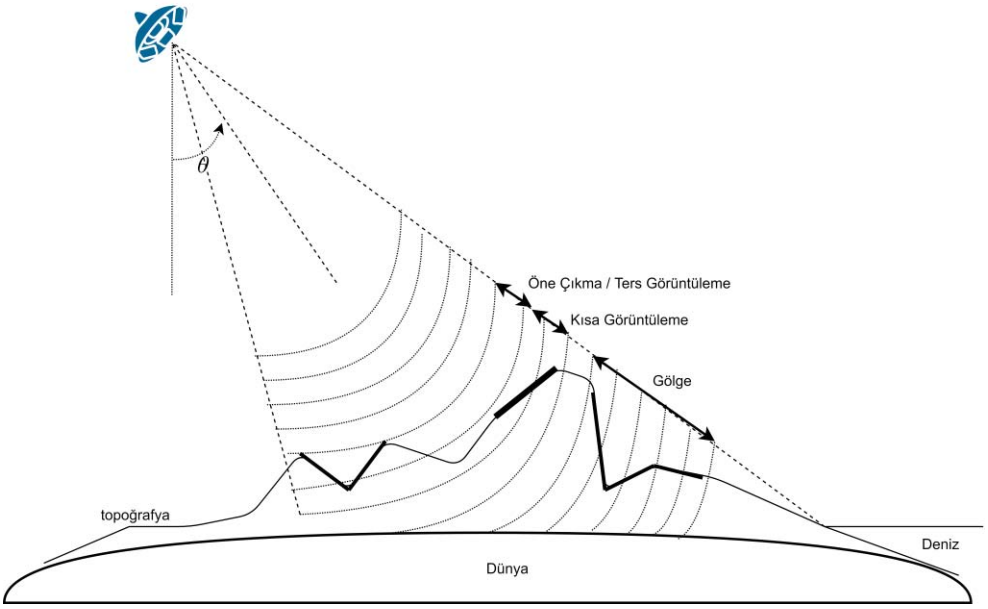
Eşitlik 2.14 yeniden düzenlenerek Eşitlik 2.15 elde edilecektir.

$$|\delta h| \approx \frac{\cos(\psi)}{\sin(\psi + \beta)} \left(\frac{R}{B}\right) |\delta(\Delta R)| \tag{2.15}$$

Eşitlik 2.15; P noktasının yükseklik ölçümünde yapılacak hatanın, uzaklığın baz uzaklığa oranı ile orantılı olduğunu göstermektedir. Ayrıca yine Eşitlik 2.15 iyi bir yükseklik ölçümü için, çok uzak mesafeden yapılan SAR görüntülemeler için büyük baz uzaklığa ihtiyaç olduğunu ve SAR sensörülerinin hedefe olan uzaklık farklarının iyi ölçülmesinin çok önemli olduğunu göstermektedir. Optik stereo görüntülemelerde çok uzak mesafeden görüntüleme yapılmadığı için küçük baz uzaklıklar yeterli olurken, geleneksel SAR tabanlı stereo görüntülemelerde, diğer adıyla radargrametri uygulamalarında genelde iki ayrı geçiş yapılarak görüntüler toplanmaktadır ve bu iki geçişte aydınlatılan araziye bakış açıları arasındaki fark 10º ile 20º arasında değişmektedir [86]. Radargrametri için büyük baz uzaklık değerleri daha makul iken SAR interferometri için büyük baz uzaklık pratik olarak mümkün değildir. Uydu kullanılarak yapılan İnterferometrik SAR uygulamalarında 250 km ile 800 km arasında değişen menziller için 100 metre ile 2 km arasında değişen baz uzaklıklar mümkündür. Uçaktan yapılan InSAR uygulamalarında ise 10km ile 20km civarında değişen menziller için metre veya metre altı baz uzaklıklar seçilmesi gerekmektedir [5].

2.1.5. SAR Görüntüleme Hataları

SAR görüntüleri oluşturulurken yeryüzü şekillerinden ve görüntüleme geometrisinden kaynaklanan bazı problemler ortaya çıkmaktadır. SAR görüntülemede, yeryüzündeki bir nesnenin algılayıcıya olan uzaklığını ölçerken yer gerçek uzaklığı yerine, nesne ile SAR sensörü arasındaki eğik uzaklık ölçüldüğü için Şekil 2-5'teki gibi bazı geometrik hatalar oluşmaktadır. Bu problemler yeryüzünün doğru bir şekilde görüntülenmesine engel olmakta ve oluşturulan görüntüde bazı hatalar oluşabilmektedir. Bu problemlerden en bilineni gölge (shadow) oluşumudur. Görüntülenen bölgede yüksek binaların ya da dağların olması ve bakış açısı sebebiyle aydınlatılamayan alanların kalması sebebiyle oluşturulan görüntüde gölgede kalan bölgeler oluşmaktadır. Bu kısımlar kanal ve almaç gürültüsü sebebiyle görüntüde bilginin olmadığı kısımlar olarak kolaylıkla göze çarpmaktadır. Küçük görüntüleme (foreshortening) bir diğer geometrik görüntüleme hatasıdır. Bakış açısıyla beraber arazinin eğim açısına da bağlıdır ve ölçülen uzunluğun gerçek uzunluktan daha kısa olması problemidir. SAR sensöründen gönderilen yayın eğimli araziye dik olduğunda ve böylelikle arazinin tabanına ve tepesine aynı anlarda çarptığında kısa görüntüleme hatası en büyük değerini alacaktır. SAR görüntülemedeki bir diğer geometrik hata ise ters görüntüleme veya öne çıkma (layover) olarak bilinen görüntülenen yüzeydeki üst bölgenin alt bölgeden önce kaydedilmesiyle oluşur. Bu geometrik hata genelde bakış açısının dar olduğu durumlarda gerçekleşir ve dağlık bölgelerde sıkça karşımıza çıkar.



Şekil 2-5. SAR Görüntüleme Geometri Hataları ([6]'dan Esinlenilmiştir)

2.2. SAR İnterferometri Prensipleri ve Uygulamaları

Interferometrik Sentetik Açıklıklı Radar (InSAR / IFSAR) tekniği, faz interferometri yöntemi kullanarak yüksek çözünürlüklü SAR görüntü ikililerinden görüntüdeki bölgenin yüksek kalitede Sayısal Yükseklik Modelinin çıkarılmasıdır [5]. Daha çok keşif ve gözetleme amaçlı kullanılan SAR sensörü görüntülerinden askeri / sivil amaçlı istihbarat elde edilmesi açısından önem taşımaktadır [76]. Bu kapsamda bir bölgenin farklı yörüngelerden elde edilen SAR görüntüleri interferometri yöntemleri ile analiz edilerek kıymetlendirilebilmektedir. Farklı yörüngelerden elde edilmiş kompleks SAR görüntüleri arasındaki faz farkı bilgisi kullanılarak yer yüzeyinin topografik ölçümü yapılabilmekte, yeryüzünde zaman içinde veya bir olay sonrası meydana gelen değişimler tespit edilebilmektedir [87]. SAR interferometri uygulamaları ile elde edilen sonuçlar sınır güvenliğinin sağlanması, hasar tespiti, fay hatlarının izlenmesi, doğal felaketler sonrası durum değerlendirmesi gibi pek çok kritik alanda askeri / sivil amaçlı olarak kullanılmaktadır.

2.2.1. InSAR Uygulamaları

Çok geçişli SAR interferometri uygulamaları;

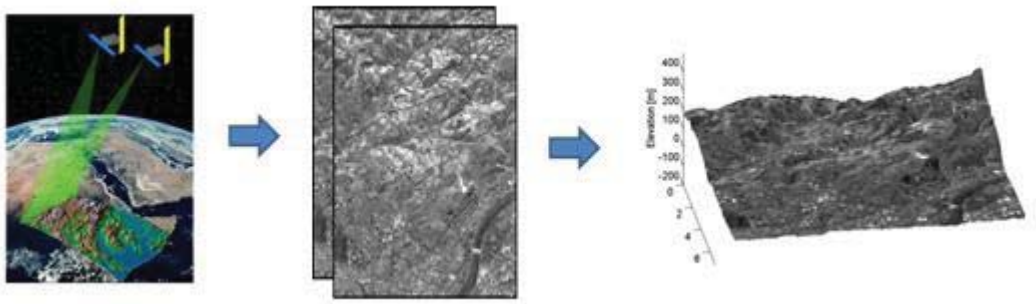
- yükseklik modellerinin çıkarılmasında
- değişiklik tespitinin yapıldığı haritaların oluşturulmasında
- görüntülenen bölgedeki arazilerin sınıflandırılmasında ve
- milimetre ve/veya santimetre hassasiyetiyle oluşturulan sismik olaylar, toprak kaymaları, buzul hareketleri / kutupsal araştırmalar ve volkanik tehlikeler için kullanılan deformasyon haritalarının oluşturulmasında

kullanılmaktadır.

2.2.1.1. Yeryüzü Modeli Oluşturma

2.2.1.1.1. Sayısal Yükseklik Modeli Oluşturma

SAR interferometri yöntemiyle SYM üretiminde, farklı uydu konumlarından alınan aynı bölgeye ait SAR görüntüleri kullanılarak yer yüzeyi yükseklik bilgisi yüksek doğrulukta tespit edilmeye çalışılmaktadır. Sayısal Yükseklik Modelinin üretilmesi bir SAR interferometri uygulamasıdır ve stereoSAR / radargrametri tekniğinden farklı olarak görüntülenecek bölgenin sensörlere uzaklığı bilgisi yerine sensörlerde oluşan faz farkı bilgisini kullanarak sayısal yükseklik modelini oluşturmaktadır.



Şekil 2-6. SAR Görüntülerinden SYM Üretilmesi

Şekil 2-6'da SAR görüntülerinin InSAR tekniği ile işlenmesiyle elde edilmiş örnek bir topoğrafya haritası veya diğer adıyla Sayısal Yükseklik Modeli görülmektedir. Tekrarlı geçiş yapılarak toplanan SAR görüntülerinde; öne çıkma / ters görüntüleme, kısa görüntüleme, gölge etkisi ve tekrarlı geçişteki zaman farkından kaynaklanan yüzey değişimleri ve atmosferik sinyal değişimleri başlıca problemlerdir [6].

Sayısal Yükseklik Modelleri; askeri amaçlı haritalamada, atış ve seyrüsefer kontrolünde, görev planlama ve eğitim için hazırlanan üç boyutlu arazi simülasyonlarında, bilimsel araştırmalarda ve uydu görüntülerinin ortorektifikasyonunda kullanılmaktadır.

2.2.1.1.2. Eğim Analizi

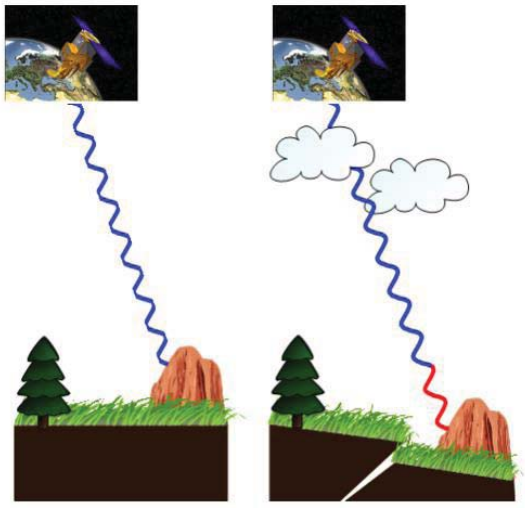
İnterferometrik baz uzaklık geometrisinin bilindiği durumda yeryüzünün açısı doğrudan belirlenebilir. Kompleks interferogramdan açının bir fonksiyonu olan faz gradientine ulaşmak mümkündür [88].

Yüzeyin açı bilgisi, SAR'ın geri saçılım katsayılarının normalizasyonunu sağlanmasını ve açı etkisinden dolayı oluşan interferometrik korelasyonun doğrulanmasını mümkün kılmaktadır. Geri yansımanın ne kadar büyük ölçüde olacağı yansımanın olduğu yüzeyin açısına bağlıdır ve buradaki açı bilgisi gerisaçılım katsayısının normalize edilmesinde kullanılmaktadır [38].

Açı bilgisi; jeomorfolojik çalışmalarda, iki nehir havzası arası setlerin yönetiminde, toprak kaymaları / erozyon ve benzer birçok uygulamada çok değerli bir öneme sahiptir [89]. Ayrıca eğim analizleri; ormanlık alanların belirlenmesinde, doğal afetler için riskli bölgelerin tespitinde ve bilhassa hidrojeolojik araştırmalarda kullanım alanları bulmaktadır.

2.2.1.2. Faz Uyumlu Değişiklik Tespiti

Aynı bölgenin farklı zamanlarda SAR görüntüleri alınarak faz uyumlu değişiklik tespiti (CCD) haritaları oluşturularak bölgedeki Şekil 2-7'deki gibi değişimler tespit edilebilir.



Şekil 2-7: InSAR ile Değişiklik Tespiti

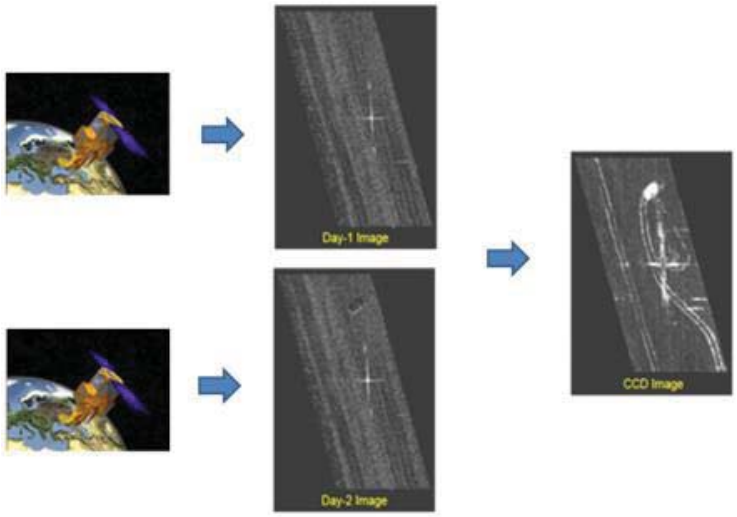
Faz uyumu, iki farklı SAR görevindeki radar sinyallerinin hedef alanla etkileşimleri arasındaki benzerliğin istatistiksel bir ölçümüdür [41].

$$\gamma = \frac{|\sum_k G_1 G_2^*|}{\sqrt{(\sum_k |G_1|^2)(\sum_k |G_2|^2)}} \qquad 2.16$$

Faz uyumu Eşitlik 2.16'daki gibi hesaplanmaktadır. Eşitlikteki G_1 ve G_2 çakıştırılmış SAR görüntüleridir. *k,* faz uyumu hesaplanırken seçilen kare pencerenin kenar boyutu ve γ ise ilgili pencere için hesaplanan faz uyumu (coherence) değeridir. Faz uyumu hedef alanın karakteristiğine oldukça bağımlıdır [5]. Faz uyumunda gözlenen bozulmalar, yer yüzeyi değişikliklerinden, atmosferik koşullardan, görüntülerdeki faz gürültüsünden veya yüzeyin değişken yansıtıcılık karakteristiğinden kaynaklanabilmektedir.

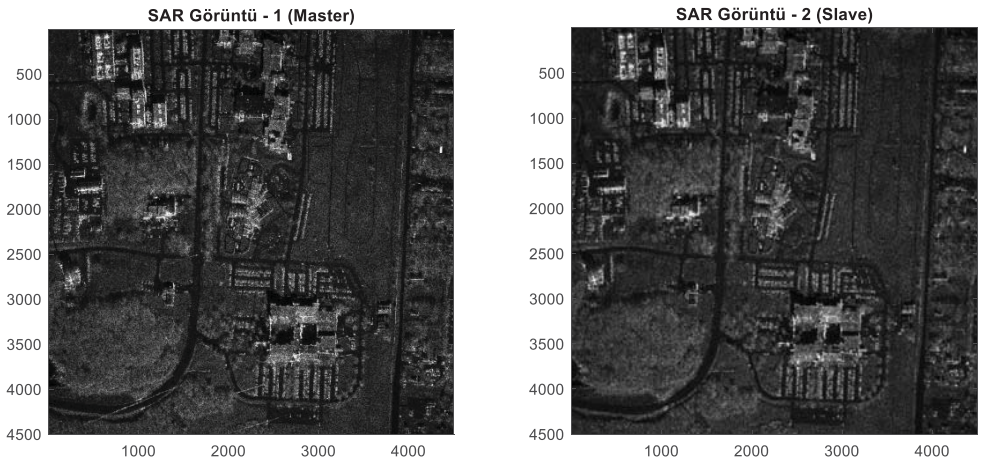
Faz uyum haritasını oluşturmak ve iki SAR görüntüsü arasındaki değişiklikleri doğru bir şekilde tespit edebilmek için ön kriter çakıştırma/hizalama işleminin yüksek doğrulukla yapılmasıdır [90], [91]. Çakıştırma adımının başarısı hesaplanacak ortalama faz uyum değerinden anlaşılabilir. Daha yüksek faz uyumu yakalamak için çakıştırma adımı tekrarlanabilir, hatta piksel altı çakıştırma işlemi yapılabilir [92]. Faz uyumunun tamamen kaybolduğu büyük değişimlerde ise genlik bilgisi kullanılmaktadır. Genlik Değişim

Haritası oluşturularak SAR görüntüleri arasında oluşan genlik farkından değişiklikler tespit edilebilmektedir [93].

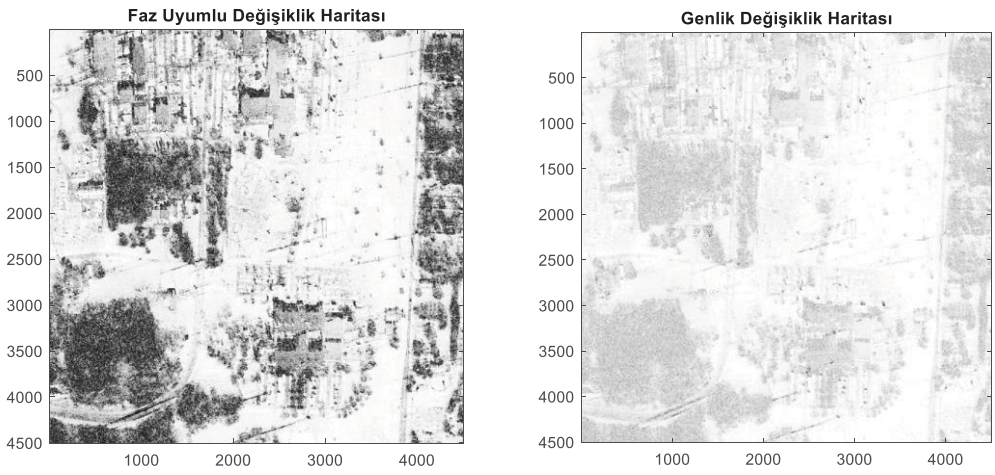


Şekil 2-8: Faz Uyumlu Değişiklik Tespiti Haritası Oluşturma

TerraSAR-X uydusu gibi bazı uydular farklı tarihlerde aynı bölgeyi görüntülerken değişiklik tespiti başarımını en yüksek seviyeye çıkarmak için çok iyi çakıştırılmış SAR görüntüleri oluşturmaktadırlar. Böylelikle SAR görüntülerinde değişiklik olmayan bölgelerde yüksek uyum değeri yakalarken, değişiklik olan kısımlar düşük uyum değeri almaktadır. Bu kapsamda [81]'deki bağlantıda yer alan X-Bant AFRL SAR sensörüne ait Şekil 2-9'daki SAR görüntü çifti kullanılarak [82]'deki çalışmaya benzer bir çalışma yapılmıştır. Sonuç olarak Şekil 2-10'daki Faz Uyumlu Değişiklik Tespiti Haritası ve Genlik Değişim Haritası oluşturulmuştur.



Şekil 2-9: SAR Görüntü Çifti



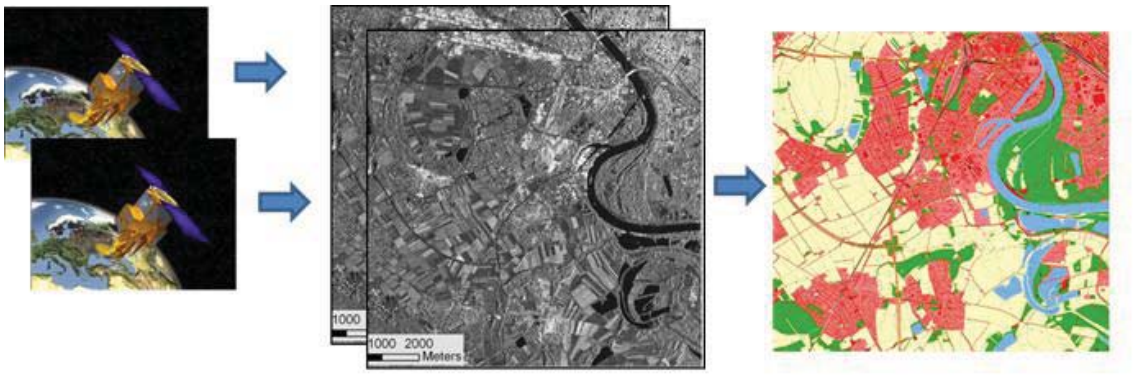
Şekil 2-10: SAR Görüntü Çiftinden Üretilen Faz Uyumlu ve Genlik Değişiklik Tespiti Haritaları

Faz Uyumlu Değişiklik Tespiti Haritaları; askeri amaçlı haritalamada, sınır güvenliğinde, bilhassa araç/insan geçişi tespitinde, askeri hedef hasar tespitinde, doğal felaketler sonrası değerlendirmede, fay hatlarının izlenmesinde kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra demiryolu, köprü, deniz kıyıları, şehir yerleşim yerleri, madenler, petrol ve doğalgaz boru hatları, büyük inşaatların izlenmesinde de kullanım alanları bulmaktadır.

2.2.1.3. Faz Uyumlu Arazi Sınıflandırma

Sentetik Açıklıklı Radar sistemleri RF dalgaları vasıtası ile yer yüzeyinin görüntülenmesi, arazi örtüsü bilgilerinin elde edilmesinde önemli bilgi kaynaklarıdır. SAR görüntüleri analiz edilerek ve sınıflandırılarak, arazi kullanımı, arazi örtüsü, çeşitli arazi istatistikleri ve göstergeleri de dâhil olmak üzere bir bölgede yer alan araziler hakkında bilgiler edinilebilmektedir [85]. Arazi örtüsü bilgileri, yeryüzündeki ormanlık alanların yıllara göre değişimi, deniz kirliliğindeki artış ve azalmanın belirlenmesi, yeryüzündeki aykırılık bölgelerinin tespiti, doğal afet sonrası hasar tespiti gibi çevrebilimle ilgili önemli konuların araştırılmasına katkı sağlamaktadır [94].

Sisteme farklı zamanlarda alınmış interferometrik SAR görüntüleri girdi olarak verilmektedir. Bu girdi görüntülerinin yansıtıcılığının genlik ve faz değişiminin istatistiksel özelliklerine göre öznitelikler belirlenmektedir. Belirlenen bu öznitelikler sınıflandırma için ana kriter olmaktadır ve bu özniteliklere göre görüntü içerisindeki pikseller sınıflandırılmaktadır.



Şekil 2-11: SAR Görüntülerinde Yer Alan Arazileri Sınıflandırma Tekniği

Arazi sınıflandırma işleminde belirlenen öznitelikler ve seçilecek sınıflandırıcılar algoritmanın performansı açısından çok kritik bir öneme sahiptir. Ayrıca görüntüler arasındaki düşük faz uyumu, yeterince düzgün çakıştırılmamış görüntü çiftleri ve benek gürültüsü de algoritmanın performansını kısıtlayan etkenlerden bazılarıdır [95].

Faz uyumu haritası arazi yüzeyinin özellikleri ve geri saçılım katsayısı hakkında bilgi vermektedir. Burada baz uzaklık faz farklılığın çıkmasında büyük etkiye sahiptir. Aralarında büyük baz uzaklık farkı olan görüntü çiftleri ile oluşturulan interferogramlar daha hassas topoğrafyaya sahiptirler. Düşük baz uzaklık ise küçük yüzey hareketleri ve geçişler arasındaki geçici değişimlerin tespitindeki hassasiyeti artırmaktadır. Bu sebeple, düşük baz uzaklık arazi sınıflandırma için daha uygun olacaktır [96]. Aslında baz uzaklığın yüzey değişiklik hassasiyetine doğrudan herhangi bir etkisi yoktur ancak topoğrafyanın mükemmel bir şekilde bilinmemesi diferansiyel interferogramda gürültüye sebep olmaktadır ve bu da baz uzaklık arttıkça artan bir gürültüdür [38].

Faz Uyumlu Arazi Sınıflandırma; askeri amaçlı arazi tipi bilgisinin çıkarılmasında, operasyon bölgesinin tanınmasında ve analiz edilmesinde, üniversitelerde bilhassa ziraat fakültelerinde farklı toprak yapısına ilişkin çalışmalarda kullanılmaktadır. Ayrıca sel, kuraklık ve orman yangını gibi felaketler sonrası geride kalan bölgedeki küçülmenin tespitinde ve şehirlerin gelişimi ya da kırsal bölgelerin tespiti gibi mühendislik uygulamalarında kullanılabilmektedir.

2.2.1.4. Yeryüzü Deformasyon Analizi

2.2.1.4.1. Kutupsal Araştırmalar

SAR interferometri; su akım hızlarının ölçümü, gel-git etkisi ile alakalı yer değiştirmeler ve toprak çizgisi pozisyonu ile alakalı birçok bilginin elde edilmesi yönleriyle kutupsal araştırmalar açısından büyük öneme sahip bir araçtır.

1993 yılında Antartika'daki Rutherford Buz akışı ile ilgili araştırmalarda Goldstein, SAR interferometri kullanarak yatay hareketlerin tespitini 1.5 mm, dikey hareketlerin tespitini ise 4 mm hassasiyetle ölçmeyi başarmıştır [97].

1994 yılında ise Hart ve arkadaşları Hemmen buz adasında birtakım testler yapmışlardır. Buradaki gel-git hareketleri, yüzey topoğrafyası tahmini ile diferansiyel interferometri kullanılarak belirlenmiştir [98].

SAR interferometri, buz akışı hızı tahminlerinde ve buz yüzeyi ölçümlerinde umut vaat eden bir tekniktir.

2.2.1.4.2. Sismik Olaylar

Bilimsel araştırmalar açısından incelenmiş en iyi sismik olaylardan bir tanesi 1992 yılındaki Kaliforniya Landers depremidir. Depremden dolayı bölgedeki büyük yüzey çatlakları dolayısıyla oluşan kozmik yer değişikliklerinin ölçümü radar interferometri kullanılarak yapılmıştır. İnterferogram tüm kozmik ve bazı post sismik deformasyonları içermektedir ve bu bilgi bize menzil yönündeki değişim haritasını vermektedir. Çalışmalar ölçümlerin 4 cm'den daha iyi bir hassasiyetle yapıldığını göstermiştir [99].

Zebker ve arkadaşları, görüntülerin yeterince hassas çakıştırılamaması ve daha önceki birçok çalışmadan kullanılmış olan sayısal yükseklik modelindeki hataların ve kaymaların teknik için ciddi bir limit olduğunu öne sürmüşlerdir [100].

Özet olarak SAR interferometri tekniğinin geniş alanlarındaki yer değişimlerinin ölçümünde ve deprem hareketlerinin modellenmesinde kullanılması büyük bir avantajdır.

2.2.1.4.3. Volkanik Deformasyon Görüntüleme

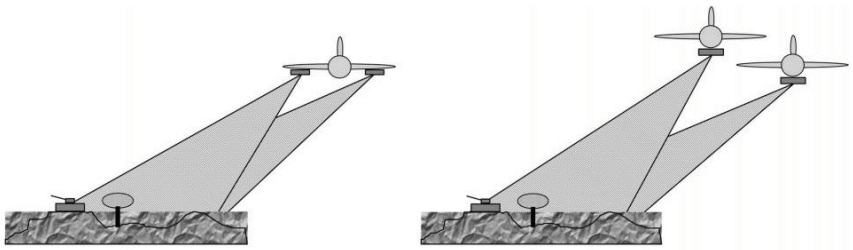
SAR interferometri, sayısal yükseklik modellerini sağlaması ve yüzey değişikliklerinin görüntülemesi yönüyle volkanik değişiklik çalışmalarında kullanılabilecek potansiyele sahip bir tekniktir. Teknik volkanik tehlikeler ile alakalı üç ana yönden doğrudan ilgilidir. Bunlar tehlikenin önlenmesi, tehlikelere karşı hazırlık ve tehlike azaltımıdır [38].

Evans ve arkadaşları 1992 yılında TOPSAR ile İzlanda'daki Hecla volkanına ait verileri elde etmişlerdir. Bu çalışma, volkanik patlama sonucu dağdan inen lavların ve erimiş materyallerin verdiği zararın belirlenmesinde SAR interferometrinin kullanılabileceğini göstermiştir [101].

2.2.2. InSAR Geometrik Modeli

Aralarında belli bir baz uzaklık bulunan SAR sensörlerinden yapılan aynı frekanstaki yayınların görüntülenen alandaki aynı noktadan yansıyarak geri döndüklerinde aralarında belli bir faz farkı oluşur. Bu faz farkının sebebi, SAR sensörlerin yanısyan noktaya olan uzaklık farkıdır. SAR interferometri tekniği, uzaklık farkı sebebiyle oluşan bu faz farkının hesaplanıp kullanılarak ilgili noktanın yüksekliğine dair bilgi çıkarılması teknolojisidir.

İnterferometrik SAR uygulamaları için gerekli SAR görüntülerinin elde edilmesi aynı platform üzerine belli bir baz uzaklık sağlanarak monte edilmiş iki farklı SAR sensörü ile tek geçişli olarak yapılabileceği gibi, tek SAR sensörü içeren platformun belli zaman aralıklarıyla aynı bölgenin görüntülerini aldığı çok geçişli uygulamalar şeklinde de olabilir. Ayrıca tek SAR sensörü içeren iki farklı platformun aynı anda aynı bölgenin görüntülerini aldığı çok geçişli senaryo da mümkündür.



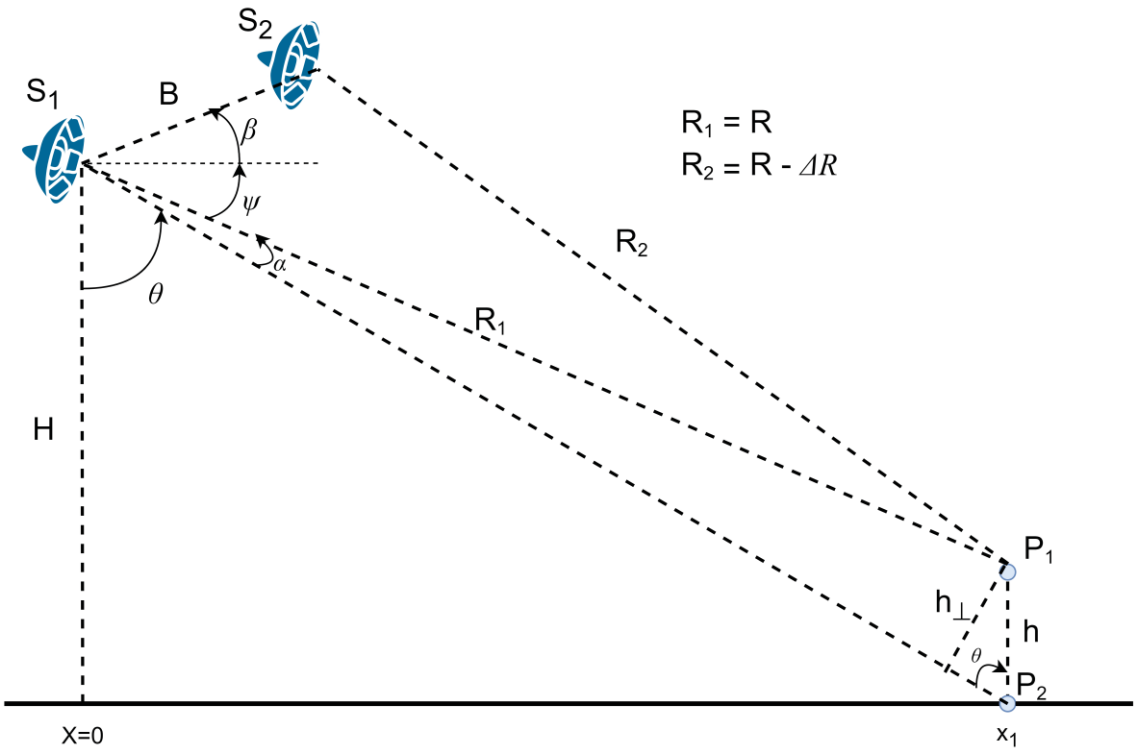
(a) (b)

Şekil 2-12: Tek-Geçişli (a) ve Çok-Geçişli (b) InSAR Verisi Toplama Senaryoları [5]

Tek geçişli operasyonda platform üzerinde iki adet SAR sensörü olması gerekmektedir. Bu da maliyet ve karmaşıklık getirmektedir. Çok geçişli operasyon senaryosunda ise baz uzaklığın korunması ve platformların çizilen güzergahlara uygun bir yörüngede hareketi bir problemdir. Ancak uydularda hareket telafisi (motion compensation), uçak ve benzeri platformlara göre daha kolay bir problem olduğu için çok geçişli operasyonlar daha ziyade uydularda tercih edilebilmektedir. Uçak gibi hava platformları ile oluşturulan SAR görüntülerinde yüksek çözünürlük değerlerine ulaşılabilirken, baz uzaklığın korunması ve hareket telafisi daha büyük bir problem olmaktadır. Atmosferik türbülans, rüzgâr ve

titreşim kaynaklı güzergahtan sapmalar InSAR tekniğini uygulamada sıkıntı oluşturmaktadır. Ancak bu durumlar uydular için kontrol edilebilir ve kolaylıkla üstesinden gelinebilir problemlerdir.

Temel SAR interferometri geometrisi Şekil 2-13'te verilmiştir.



Şekil 2-13: SAR İnterferometri Geometrisi

Bazı ön kabuller yapılacak olursa;

SAR sensörlerinin uydu üzerinde olduğu ve uyduların yerden yaklaşık 350-800 km yüksekte olduklarını düşünerek; ilk SAR sensörünün deniz seviyesine göre yüksekliği (H), P_1 noktasının yüksekliğine (h) göre oldukça büyük olacaktır. Bu sebeple Eşitlik 2.17'deki gibi bir ön kabul yapılacaktır.

$$\frac{h}{H-h} \approx \frac{h}{H} \qquad 2.17$$

Şekil 2-13'teki S_1 sensöründen P_1 noktasına ve P_1 noktasının deniz seviyesindeki hali olan P_2 noktasına olan bakış açıları arasındaki fark açısı (α) çok küçük bir açıdır. Bu sebeple Eşitlik 2.18 ve Eşitlik 2.19'daki gibi bir ön kabul yapılacaktır.

$$\cos(\alpha) = 1 \qquad 2.18$$

$$sin(\alpha) = \alpha \qquad 2.19$$

Ayrıca bakış açıları arasındaki fark açısı (α) Eşitlik 2.20'de verilmiştir.

$$\alpha = sin(\alpha) = \frac{h_{\perp}}{R} = \frac{hsin(\theta)}{R} \quad 2.20$$

SAR interferometri işleminin ilk adımı olarak iki SAR görüntüsü arasındaki faz farkı hesaplanacaktır.

Φ_1, P_1 noktası için iki SAR sensörü arasındaki faz farkını sembolize etmektedir.

$$\emptyset_1 = \frac{2B_{\parallel}}{\lambda} 2\pi = \frac{4\pi}{\lambda} . B_{\parallel} = \frac{4\pi}{\lambda} B\cos\left(90 - (\theta + \alpha) + \beta\right) \quad 2.21$$

$$\emptyset_1 = \frac{4\pi}{\lambda} B\, sin(\theta + \alpha - \beta) \quad 2.22$$

Eşitlik 2.22 açılacak olursa;

$$\emptyset_1 = \frac{4\pi}{\lambda} B\, sin(\theta - \beta)\cos(\alpha) + \frac{4\pi}{\lambda} B\, cos(\theta - \beta)\, sin(\alpha) \quad 2.23$$

$$\emptyset_1 \approx \frac{4\pi}{\lambda} B\, sin(\theta - \beta) + \frac{4\pi}{\lambda} B\, cos(\theta - \beta)\, \alpha \quad 2.24$$

Φ_2, P_2 noktası için iki SAR sensörü arasındaki faz farkını sembolize etmektedir.

$$\emptyset_2 = \frac{2B_{\parallel}}{\lambda} 2\pi = \frac{4\pi}{\lambda} B_{\parallel} = \frac{4\pi}{\lambda} B\cos(90 - \theta + \beta) \quad 2.25$$

$$\emptyset_2 = \frac{4\pi}{\lambda} Bsin(\theta - \beta) \quad 2.26$$

Her iki nokta için faz farkı değişimi hesaplanacak olursa Eşitlik 2.27 elde edilecektir.

$$\emptyset_1 - \emptyset_2 = \frac{4\pi}{\lambda} B\, cos(\theta - \beta)\, \alpha \quad 2.27$$

Eşitlik 2.20 ve Eşitlik 2.27 birleştirildiğinde ise Eşitlik 2.28 bulunacaktır.

$$\emptyset_1 - \emptyset_2 = \frac{4\pi}{\lambda} B\, sin(\psi + \alpha + \beta) \frac{h.\sin(\theta)}{R} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}\sin(\theta)}{R} h \quad 2.28$$

Ancak literatürdeki çoğu kaynakta Eşitlik 2.28 farklı hesaplanmaktadır. Farklı hesaplanmasının sebebi ise P_1 noktasının yüksekliğinin tam olarak bilinemeyecek olmasıdır. Doğal olarak Şekil 2-13'teki θ açısını bilmek mümkün olmayacaktır. Literatürdeki çoğu denklemde θ_1 açısı, Şekil 2-13'teki θ açısını ve α açısını kapsamaktadır. Böylelikle topoğrafyadaki bir noktaya olan bakış açısı bilenebilecektir.

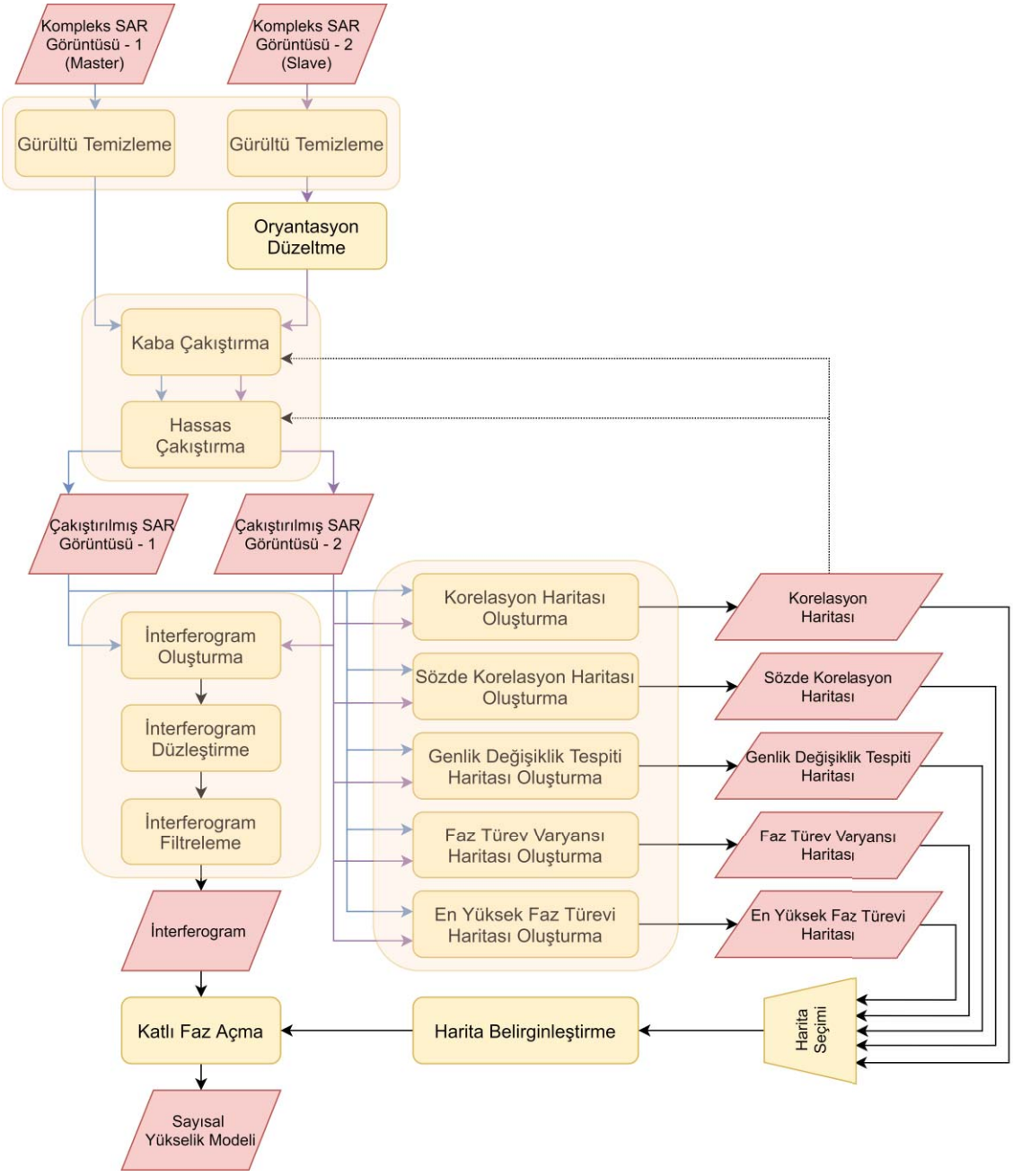
Eşitlik 2.11 ve Eşitlik 2.27 birleştirildiğinde Eşitlik 2.29 elde edilir.

$$\emptyset_1 - \emptyset_2 = \frac{4\pi}{\lambda} B\, sin(\psi + \alpha + \beta) \frac{h}{Rcos(\psi)} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_\perp}{Rsin(\theta_1)} h \qquad 2.29$$

Bu eşitlikler SAR interferometri tekniğinde faz farkının yükseklik ve baz uzaklık ile olan ilintisini anlamak açısından temel kabul edilebilir.

2.3. SAR İnterferometri Tekniği ile Sayısal Yükseklik Modeli Oluşturulması

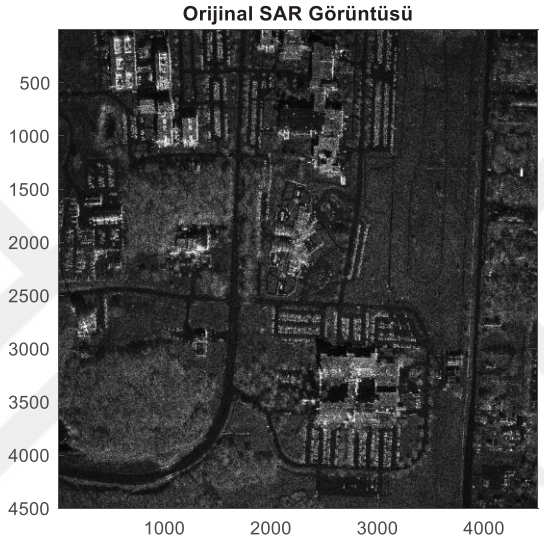
İnterferometrik SAR (InSAR) tekniği ile Sayısal Yükseklik Modeli oluşturma algoritmasının işlem adımları Şekil 2-14'te verilmiştir.



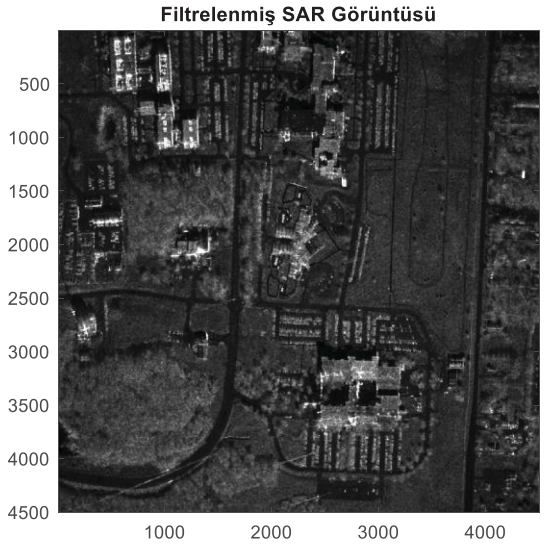
Şekil 2-14. SAR İnterferometri Tekniği ile SYM Oluşturulması İşlem Adımları

2.3.1. Gürültü Temizleme

SAR görüntüleri interferometrik SAR tekniği ya da radargrametrik SAR tekniğinin ilk aşamasında filtrelenebilir. Filtreleme işlemi neticesinde görüntüdeki gürültü azaltılabilir. Opsiyonel bir adımdır. Filtreleme işlemi sonucunda çakıştırma/hizalama adımının doğruluğu arttırılabilir. Zira filtreleme işlemi sonrasında SAR görüntüsü içerisindeki öznitelikler daha belirgin hale gelir ve böylelikle korelasyon artar. Filtreleme işlemi için farklı pencere boyutları kullanılabilir. Medyan veya ortalama gibi alternatif filtre seçenekleri değerlendirilebilir. SAR görüntüsüne özgü özel filtreler de tercih edilebilir.



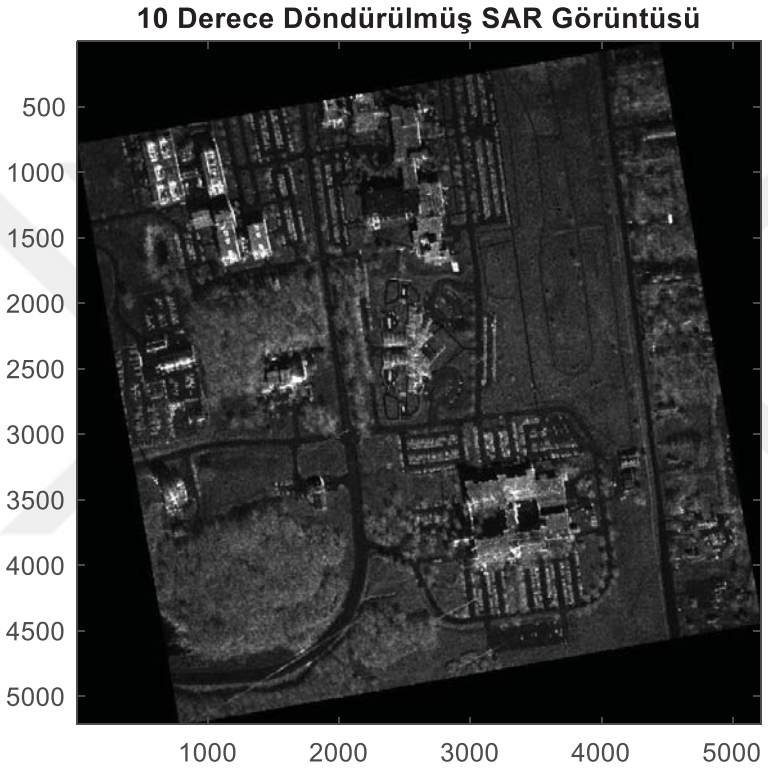
Şekil 2-15: Orijinal SAR Görüntüsü



Şekil 2-16: Filtrelenmiş SAR Görüntüsü

2.3.2. SAR Görüntüleri Arasında Bilinen Açı Farkını Düzeltme

SAR görüntüleri aynı platform üzerindeki iki farklı SAR sensörü ile alınabildiği gibi platform üzerindeki tek sensörden farklı zamanlarda da alınabilir. Uçuş güzergahları arasında belli bir mesafe, yükseklik ve açı farkı olması olağandır. Bu tip durumlarda aynı bölgenin farklı uçuşlarda alınmış SAR görüntüleri arasında bilinen bir açı farkı olacaktır ve bu işlem çakıştırma adımından önce otomatik olarak düzeltilebilir (Auto Rectification).



Şekil 2-17: Saat Yönünün Tersine 10º Döndürülmüş SAR Görüntüsü

Uydu SAR görüntülerinde *metadata* olarak geçen görev dosyasında SAR görüntülerini alan platformun baş açıları yer almaktadır. Diğer hava platformlarına konuşlu SAR sensörlerininde görev bilgisinde baş açısı bulunmaktadır. Oluşturulmuş ve interferometri uygulamasına girdi olacak SAR görüntülerinin (*master, slave*) baş açıları birbirinden farklı olabilir. Çakıştırma işlemi ile de halledilebilecek olan bu problem çakıştırma işlemi öncesinde de opsiyonel olarak yapılabilir. Düzeltme sonucunda bilinen açı ofseti ortadan kaldırılmış olur. Böylelikle çakıştırma işleminde daha küçük boyutlu pencereler kullanılacak, açısal düzeltmeye ihtiyaç olmayacak ve hesaplama karmaşıklığı azaltılacaktır.

2.3.3. Çakıştırma / Hizalama

SAR interferometri yöntemiyle Sayısal Yükseklik Modeli oluşturmak ya da Faz Uyumlu Değişiklik Tespiti yapmak için ilk kritik adım çakıştırmanın yüksek doğrulukta yapılmasıdır. Bu sebeple çakıştırma işlemi, InSAR algoritması için hayati öneme sahip bir adımdır. Hatalı bir çakıştırma işleminin devamında doğru bir nihai çıktıya ulaşmak imkansızdır. SAR görüntü çiftindeki tüm pikseller yüksek oranda çakıştırılmış olmalıdır. Zira kendinden sonra gelen algoritma adımlarının performansı çakıştırma doğruluğundan doğrudan etkilenecektir. Bu sebeple çakıştırma adımının önemi anlaşılmış ve yüksek doğruluk elde edebilmek için birçok araştırma yapılmış, birbirinden farklı onlarca algoritma geliştirilmiştir. Hatta SAR interferometri tekniğinin performasını arttırabilmek ve InSAR tekniğinin karmaşıklığını ve tekniğin çakıştırma performansına olan bağımlılığını azaltmak için çok iyi çakıştırılmış SAR görüntüsü üreten uydular (TerraSAR-X, TanDEM-X vb.) geliştirilmiştir.

Literatürdeki çakıştırma algoritmaları üç grup olarak incelenebilir.

- Frekans Düzleminde Çakıştırma
- Geometrik Çakıştırma ve
- Uzaysal Düzlemde Çakıştırma

Frekans düzleminde yapılan çakıştırma işleminde kompleks SAR görüntülerinin spektral özellikleri temel alınır. Ancak frekans düzleminde fazın katlanma riskinden kaçınmak için ilk olarak uzamsal yöntemlerdeki gibi kaba çakıştırma uygulanır. Sonra SAR görüntü çifti frekans düzlemine geçirilir. Frekans düzleminde, uzamsal düzlem yöntemlerinden farklı olarak çapraz-korelasyon ve interpolasyon kullanılmaz.

- ✓ Frekans düzlemine geçirilen SAR görüntüsü menzil ve çapraz menzilde farklı merkez frekansına sahip bant genişlikleri SAR görüntüsünün toplam bant genişliğinden küçük olacak şekilde parçalara ayrılır. Bu küçük parçalardan ayrı ayrı interferogramlar elde edilir. İnterferogramların faz farkından doğru çakıştırma için gerekli piksel kayma miktarı menzil ve çapraz menzil için ayrı ayrı hesaplanır [102].
- ✓ Frekans düzleminde faz korelasyonu ile iki SAR görüntüsü arasındaki faz farkı hesaplanıp gereken kayma miktarları faz korelasyon sonucundan bulunabilir [103], [104], [105].

- ✓ Faz korelasyonu ile piksel seviyesinde kaymalarla beraber, kutupsal dönüşüm ile rotasyon etkisi, logaritmik ifade ile de ölçek etkisi işin içine katılarak SAR görüntüleri arasındaki affine dönüşüm denklemi oluşturulmuş olur [106].

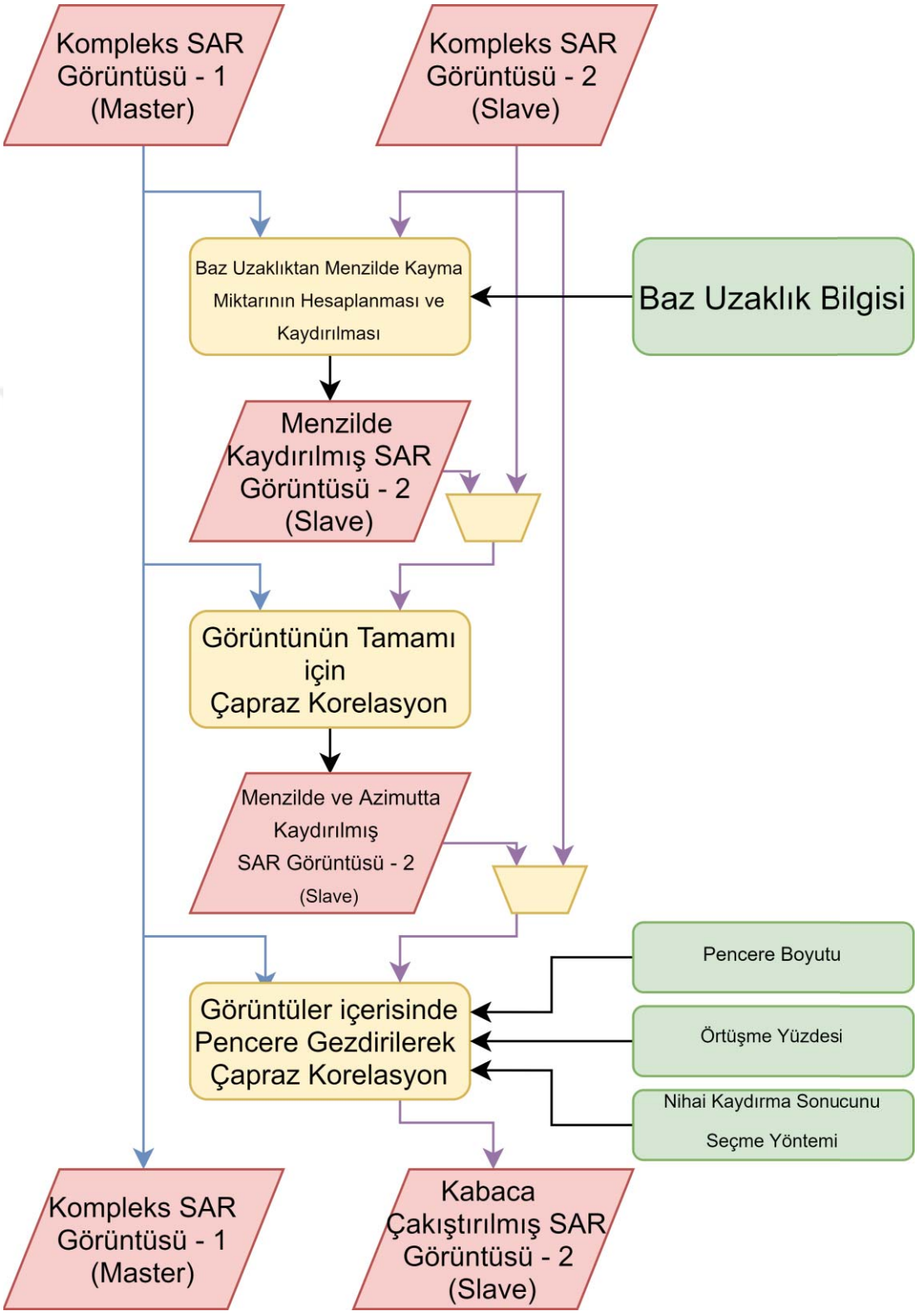
Yöntemlere ek olarak faz korelasyonunun başarımını arttırmak için SAR görüntüsündeki yüksek frekansa sahip piksellerin işlem öncesi ön plana çıkarılması önerilen bir ön adımdır [107].

Geometrik çakıştırma işleminde SAR sensörünün konuşlu olduğu platformların uçuş güzergahları hassas bir şekilde bilinmelidir. Bunun yanında birim hız vektörlerinin ve platformlar arası baz uzaklık mesafesinin de hassas olarak bilindiği kabul edilmektedir. Bu bilgiler kullanılarak çakıştırma işlemi yapılacağı için yöntem; uçaklardan daha ziyade konumları hassas bir şekilde ölçülebilen ve güzergahından sapmadan hareket edebilen uydularda kullanılmaktadır. Görüntülenen bölge içerisinden bağlantı noktaları (tie-point) seçilerek, bu noktaların hassas menzil ve çapraz menzil konumları ve yükseklik bilgileri; SAR sensörleri konuşlu olan uyduların güzergahları, birim hız vektörleri, ürettikleri SAR görüntülerinin piksel aralıkları, platformlar arası baz uzaklık değeri, sensörün gönderdiği yayının Darbe Tekrarlama Frekansı (DTF – PRF) ve örnekleme frekansı kullanılarak parametrik olarak çıkarılır. Bağlantı noktalarının parametrik olarak hesaplanan değeri ile gerçek değerleri arasındaki fark en küçük kareler (least squares) yöntemi ile çözülür. Böylelikle SAR görüntüleri arasındaki fonksiyonun denklemi için kestirim yapılır [108].

Uzaysal düzlemde çakıştırma algoritmaları çapraz korelasyon tabanlı algoritmalardır ve iki adımdan oluşmaktadır. Algoritma özetlenecek olursa; ilk olarak SAR görüntü çiftine kaba çakıştırma işlemi uygulanmaktadır. Görüntülerin çapraz korelesyonlarına bakılarak menzilde ve çapraz menzilde kayma miktarları hesaplanmakta ve SAR görüntülerinden biri menzil ve çapraz menzilde hesaplanan miktarlarda ötelenmektedir. Bu işlem sonrası kabaca üst üste getirilen SAR görüntüleri hassas çakıştırma işlemine girdi olarak verilmektedir. Hassas çakıştırma ile kabaca çakıştırılmış SAR görüntü çifti piksel altı seviyede yüksek oranda çakıştırılmaktadır. Ancak aralarında açısal farklılık olmayan, ya da benzer yükseklikten alınmış ve böylelikle ölçek farklılığı bulunmayan SAR görüntülerinde, sadece menzilde ve çapraz menzilde kaymalar olmakta ve kaba çakıştırma işlemi sonucunda öteleme ile yüksek çakışma doğruluğu sağlanabilmektedir. Bu tip senaryolarda hassas çakıştırma işlemine gerek kalmamaktadır. Tez kapsamında uzaysal çakıştırma algoritmaları detaylı olarak analiz edilmiştir.

2.3.3.1. Kaba Çakıştırma / Hizalama

Kaba çakıştırma adımı Şekil 2-18'de görüldüğü gibi üç adımdan oluşmaktadır.



Şekil 2-18: Kaba Çakıştırma Algoritması

Adımlardan ilki, bilinen baz uzaklık farkı kadar öteleme/kaydırma adımıdır. SAR sensörlerinin konuşlu olduğu platformlar SAR interferometri tekniği ile sayısal yükseklik modeli çıkarabilmek için aralarında belli ve sabit bir baz uzaklık olacak şekilde uçuş yapmışlardır. Aynı bölgenin görüntülemesini yaparken aynı bakış açısı ile görüntüleme yaptıkları için SAR görüntüleri arasında baz uzaklıktan doğan belirli bir kayma olacaktır.

$$d_{M1} = \frac{2B_{\parallel}}{r} \tag{2.30}$$

Bu kayma miktarı (d_{M1}), Eşitlik 2.30'daki gibi paralel baz uzaklık bileşeni ($B_{\parallel}$) ve menzil çözünürlük değeri (r) kullanılarak hesaplanıp görüntülerden biri ötelenerek ilk adım tamamlanacaktır.

Kaba çakıştırma işleminin ikinci adımında SAR görüntüleri Eşitlik 2.31'deki gibi bir bütün olarak çapraz kolerasyon işlemine tabi tutularak tüm görüntü için menzilde ve çapraz menzilde öteleme miktarı hesaplanacaktır.

$$ÇK(i,j) = \left| \sum_{m=1}^{N_M} \sum_{n=1}^{N_A} G_1(m,n) G_2^*(m+i, n+j) \right| \tag{2.31}$$

G_1 ve G_2 SAR görüntü çiftinin boyutları, menzil yönünde N_M, çapraz menzil yönünde (azimutta) N_A boyutundadır. Görüntülerin bir bütün olarak çapraz korelasyonları sonucunda *ÇK* matrisi hesaplanacaktır. Görüntülerin en yüksek korelasyonda çakıştıkları anda matrisin zirve noktası hesaplanacak ve zirve pikselde en yüksek değer elde edilecektir. İlgili pikselin merkez piksele menzil ve çapraz menzil yönünde uzaklıklarına (d_{M2}, d_{A2}) göre kaç piksel öteleme yapılacağı bulunacaktır.

Çapraz korelasyon işlemi zaman düzleminde yapılabildiği gibi frekans düzleminde de yapılabilmektedir. Hatta frekans düzleminde çarpım şeklinde yapılabilmesi sebebiyle çok daha hızlı olmakta ve dolayısıyla kısa sürmektedir. Eşitlik 2.31'deki çapraz korelasyon işlemi frekans düzleminde yazılacak olursa Eşitlik 2.32'deki gibi olacaktır.

$$ÇK = \left| F^{-1} \left\{ F\{G_1\} F^*\{G_2\} \right\} \right| \tag{2.32}$$

Kaba çakıştırmanın son adımında ise SAR görüntü çifti parçalara bölünerek her bir parça ayrı ayrı çapraz-korelasyon işlemine tabi tutulur. Pencerenin boyutları SAR görüntüsünün büyüklüğüne göre istenilen boyutta seçilebilir. Pencereler tamamen birbirinden bağımsız

olabileceği gibi belirli oranlarda örtüşme yapacak şekilde de pencereler oluşturulabilir. SAR görüntüsü içerisine kaç adet pencere sığacağı bilgisi pencere boyutları (p_M, p_A) ve örtüşme oranı (ω) ile ilişkilidir. Eşitlik 2.33 ve Eşitlik 2.34'teki $\#P_M$ ve $\#P_A$ değerleri menzilde ve çapraz menzilde kaçar adet pencere sığabileceğini göstermektedir.

$$\#P_M = \frac{N_M - p_M}{p_M(1-\omega)} + 1 \tag{2.33}$$

$$\#P_A = \frac{N_A - p_A}{p_A(1-\omega)} + 1 \tag{2.34}$$

$$\#P = \#P_M \#P_A \tag{2.35}$$

SAR görüntüsü içerisine sığan pencere adeti ($\#P$) belirlendikten sonra SAR görüntüleri pencerelere ayrılır ve çapraz korelasyon işlemine tabi tutularak her bir işlem sonucunda çapraz korelasyon matrisinde zirve yapan piksel bulunarak merkez piksele olan uzaklıkları menzilde ve çapraz menzilde hesaplanır. Böylelikle her bir pencerenin çapraz korelasyon işlemi sonucunda menzilde (M_1, M_2, M_3, ... $M_{\#P}$) ve çapraz menzilde (A_1, A_2, A_3, ... $A_{\#P}$) ne kadar ötelendiğine dair bilgiler elde edilmiş olur. Ancak menzilde ve çapraz menzilde kayma miktarına ilişkin bilgiler tüm pencerelerde aynı olmayabilir. Bu durumda SAR görüntüsünün (slave) tamamının menzilde ve çapraz menzilde nihai olarak ne kadar kaydırılması/ötelenmesi gerektiği ile ilgili menzil ve çapraz menzil için ayrı ayrı olmak üzere birer değer (d_{M3}, d_{A3}) çıkarılmalıdır. Bu nihai değerlerin hesaplanması için farklı yaklaşımlar mevcuttur.

- ✓ **Ortalama Alma** Pencerelerin çapraz korelasyon işlemine tabi tutulması sonucunda zirve noktasının merkeze olan uzaklık bilgisinin tüm pencerelerden alınarak hepsinin ortalaması alınıp nihai kayma miktarı hesaplanabilir [33].

$$d_{M3} = \left(\sum_{i=1}^{\#P} M_i \right) / \#P \tag{2.36}$$

$$d_{A3} = \left(\sum_{i=1}^{\#P} A_i \right) / \#P \tag{2.37}$$

- ✓ **Zirve Kalitesi** Pencerelerden gelen tüm değerleri hesaba katarak ortalama alınması hatalı sonuçların çıkarılmasına sebep olacaktır. Özellikle pencere içerisine çok fazla öznitelik olmayan bir bölge düştüğü durumda genel ortalamayı bozacak hatalı ve aykırı (outlier) değerler gelebilir. Bu aykırı değerlerin belli bir kalite metriğine göre elenmesi gerekmektedir. Bunun için zirvenin keskinliğine (sharpness) bakılabilir. Zirvenin penceredeki diğer değerlerin ortalamasına oranı da bir kalite metriği olabilir ve belli bir eşik değerinin altındakiler nihai kayma değerlerinin hesaplandığı ortalamaya katılmaz [1], [5], [36]. Zirve Kalite Değeri Eşitlik 2.38'deki gibi hesaplanacaktır.

$$ZKD = \frac{Maksimum\{ÇK(i,j)\}}{Ortalama\{ÇK(i,j)\}} \quad 2.38$$

- ✓ **En Çok Tekrar Eden Değer** Pencerelerden gelen tüm değerler içerisinden menzil ve çapraz menzil için ayrı olmak üzere en çok tekrar eden değerin nihai kayma miktarı olarak seçilmesi durumudur.

$$d_{M3} = En\ Çok\ Tekrar\ Eden\ \{M_1, M_2, M_3, \dots, M_{\#P},\} \quad 2.39$$

$$d_{A3} = En\ Çok\ Tekrar\ Eden\ \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_{\#P},\} \quad 2.40$$

- ✓ **Medyan** Pencerelerden gelen tüm değerler için menzil ve çapraz menzil kümelerinde ayrı ayrı olmak üzere medyanın seçilerek nihai kayma değerleri olarak belirlenmesi yöntemidir.

$$d_{M3} = Medyan\ \{M_1, M_2, M_3, \dots, M_{\#P},\} \quad 2.41$$

$$d_{A3} = Medyan\ \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_{\#P},\} \quad 2.42$$

- ✓ **Aykırı Değerlerin Elenmesi** Pencerelerden gelen tüm değerler belli bir ortalama değer etrafında öbekleşmiş olsa da aykırı değerler bulunabilir. Zirve kalite değerine bakılarak bazı değerler elenmiş olsa dahi aykırı kayma miktarı değerleri halen küme içerisinde kalabilir. Nihai kayma miktarını belirlemeden önce bu kalan aykırı kayma değerlerinin elenmesi daha yüksek doğrulukta nihai kayma miktarı hesaplanmasını sağlayacaktır. Bunun için belirlenen yöntem üç aşamada çalışmaktadır.

- İlk olarak menzil ve çapraz menzil için ayrı ayrı olmak üzere eldeki tüm kayma değerlerinin ortalaması ve standart sapması hesaplanır.

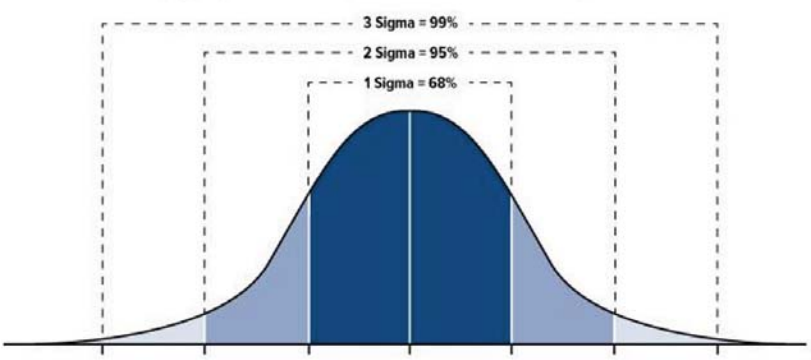
$$\mu_M = \left(\sum_{i=1}^{\#P} M_i\right)/\#P \tag{2.43}$$

$$\sigma_M = \sqrt{\left\{\sum_{i=1}^{\#P}(M_i - \mu_M)^2\right\}/(\#P - 1)} \tag{2.44}$$

$$\mu_A = \left(\sum_{i=1}^{\#P} A_i\right)/\#P \tag{2.45}$$

$$\sigma_A = \sqrt{\left\{\sum_{i=1}^{\#P}(A_i - \mu_A)^2\right\}/(\#P - 1)} \tag{2.46}$$

- İkinci aşamada ortalamadan standart sapma veya Şekil 2-19'daki gibi standart sapmanın k katı kadar yakında olanlar dikkate alınıp, dışında kalanlar aykırı değer olarak kabul edilip elenir.



Şekil 2-19. Standart Sapmanın Katları

- Üçüncü ve son aşamada ise dikkate alınıp elenmeyen değerlerin tekrar ortalaması alınarak nihai kayma değerleri hesaplanır.

$$d_{M3} = (\sum_{i=1}^{\#P} M_i)/\#P_{yeni} \quad , \quad Eğer\ \{\mu_M - k\sigma_M < M_i < \mu_M + k\sigma_M\} \tag{2.47}$$

$$d_{A3} = (\sum_{i=1}^{\#P} A_i)/\#P_{yeni} \quad , \quad Eğer\ \{\mu_A - k\sigma_A < A_i < \mu_A + k\sigma_A\} \tag{2.48}$$

Eşitlik 2.47 ve Eşitlik 2.48'de $\#P_{yeni}$ olarak ifade edilen değer aykırı değerler elendikten sonra kalan kayma değeri sayısıdır.

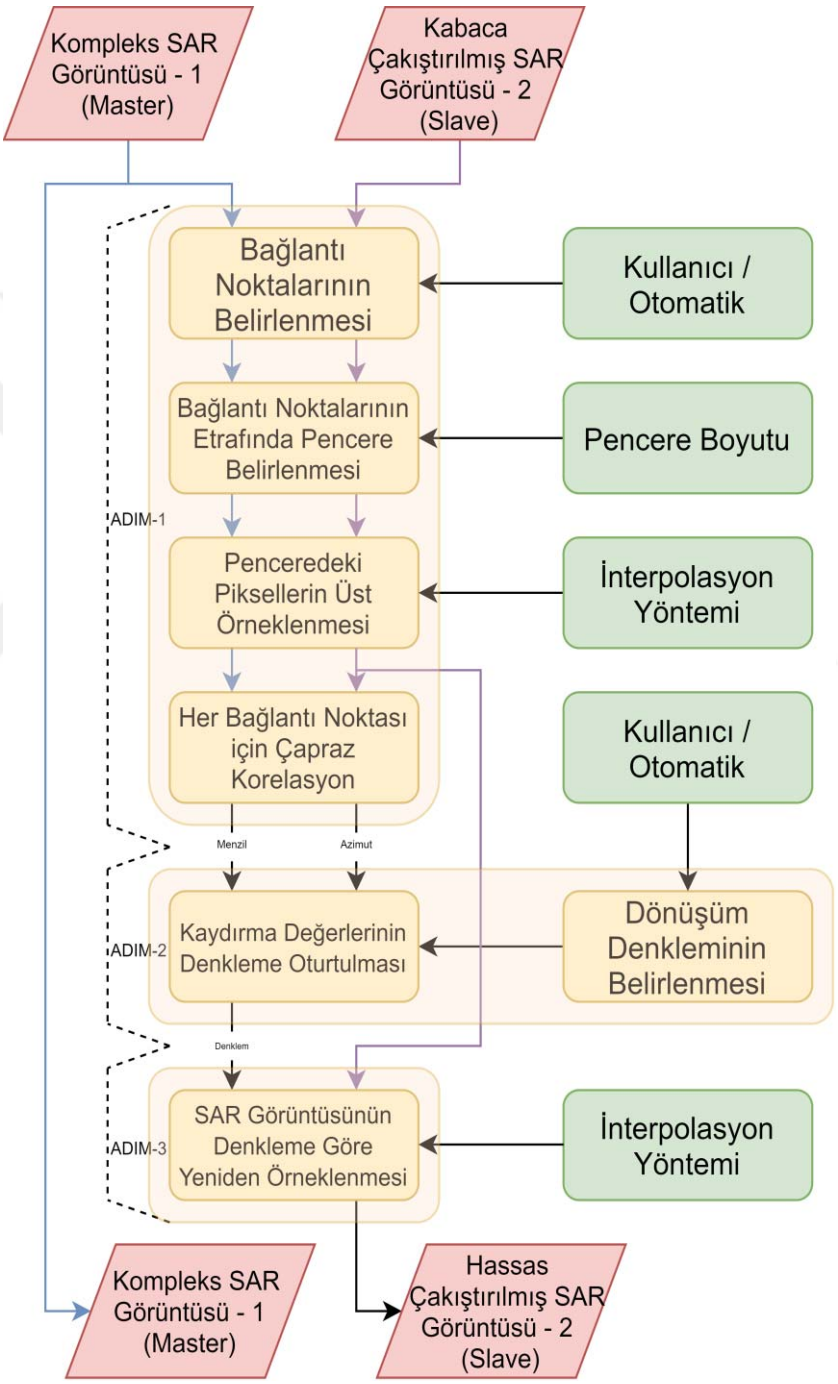
Sonuç olarak kaba çakıştırma adımının opsiyonel olan ilk aşamasında sensörler arası baz uzaklık farkından kaynaklı menzil kayması (d_{M1}), yine opsiyonel olan ikinci aşamasında tüm görüntünün çapraz korelasyonu sonucunda menzilde ve çapraz menzilde kayma değerleri (d_{M2}, d_{A2}), ve son olarak üçüncü ve en kritik aşamasında ise SAR görüntü pencerelerinden elde edilen nihai kayma değerleri (d_{M3}, d_{A3}) hesaplanmıştır. Hesaplanan kayma değeri kadar SAR görüntülerinden bir tanesi menzilde ve çapraz menzilde kaydırılacak ve iki görüntü mümkün mertebe çakıştırılmış olacaktır. Ancak görüntüler arasında açısal farklılar varsa, görüntüler arasında ölçek farkı bulunuyorsa, kayma miktarı piksel altı seviyede ise kaba çakıştırma adımı neticesinde halen yüksek doğrulukta bir çakıştırma başarısı elde edilememiştir. Bu durumda hassas çakıştırma yapmak gerekmektedir. Ancak çoğu uydu SAR görüntülerinde kaba çakıştırma yeterli olmaktadır. Çünkü sabit yükseklikte seyrettikleri için SAR görüntü çiftleri arasında ölçek farkı olmamaktadır. Açısal farklılıklar görev bilgisi dosyasından okunarak SAR interferometri tekniğinin ilk aşamalarında düzeltilmektedir. Uydular uçuş güzergahlarından çok sapmadan hareket ettikleri için ve çok yüksekten uçtukları için görüntülerde uzama (stretch) ya da eğrilme (skew) gibi sıkıntılar bulunmamaktadır. Ancak uçaklara konuşlu SAR sensörleri ile oluşturulan SAR görüntü çiftleri arasında bu tip problemler bulunmaktadır ve hassas çakıştırma ihtiyacı olmaktadır.

2.3.3.2. Hassas Çakıştırma / Hizalama

Kaba çakıştırmadan sonra hassas çakıştırma adımı gelmektedir. Hassas çakıştırma; eğer SAR görüntü çifti arasında açısal bir ofset kalmamışsa, ölçek farkı yoksa ve SAR görüntülerinde herhangi bir uzama ve/veya eğrilme bulunmuyorsa sadece piksel altı kayma işlemi yapılacak demektir. Bu kayma neticesinde de SAR görüntülerinden elde edilen faz uyum / korelasyon haritasının ortalama faz uyum değeri kaba çakıştırma sonrası değerden çok yüksek olmayacaktır. Örnek vermek gerekirse Hein kitabında [35] konu ile ilgili bir ortalama faz uyum hesabı yaptığı beş örneğin sonuçlarını vermiştir. Bu örneklerde çakıştırma işlemi öncesi SAR görüntü çiftinden elde edilen faz uyum haritasının ortalama faz uyumu değeri 0.21-0.29 aralığındadır. Kaba çakıştırma işlemi sonrası ortalama faz uyum değeri 0.52-0.61 aralığına yükselmiştir. Hassas çakıştırma adımından sonra ise ortalama faz uyum değeri 0.54-0.64 aralığında kalmıştır. Bu sebeple eğer kaba çakıştırma adımı sonrasında hala ortalama faz uyum değeri belli bir seviyenin

altında ise hassas çakıştırma adımı uygulanmalıdır. Kaba çakıştırma adımı ile iyi bir ortalama faz uyum değeri yakalanmış ise ciddi bir maliyeti olan hassas çakıştırma adımı atlanabilir.

Hassas çakıştırma işlemi Şekil 2-20'de görüleceği üzere üç adımdan oluşmaktadır.



Şekil 2-20: Hassas Çakıştırma Algoritması

İlk adımda bağlantı noktaları belirlenir ve bağlantı noktaları etrafında belli büyüklükte bir pencere açılarak pencere içerisine düşen pikseller interpolasyon işlemine tabi tutularak üst örnekleme yapılır. Bağlantı noktalarının seçimi ile ilgili olarak temelde iki yaklaşım mevcuttur. Bunlardan ilki, bağlantı noktalarının tamamı SAR görüntüsü içerisinde homojen olarak dağıtılmasıdır. Böylelikle görüntünün tamamından örnekler alınmış olacaktır. Ancak bu durumda seçilen bağlantı noktası merkezde kalacak şekilde açılacak pencerenin içerisine hiçbir özniteliği olmayan bir alan düşebilir. Bu, istenmeyen bir durumdur; çünkü çapraz korelasyon işlemi sonucunda kayma miktarında yüksek doğruluk elde etmek için kenar, köşe gibi yansıtıcılık katsayısı yüksek piksellerin yer aldığı noktalar bağlantı noktası olarak seçilmelidir. Bu sebeple diğer yaklaşımda bağlantı noktaları homojen dağıtılmaz. Bunun yerine kullanıcının kendisinin seçmesi istenir. Ancak burada da tüm bağlantı noktalarının SAR görüntüsünün belli bir bölgesinden seçilmesi ve böylelikle sadece o bölgeye ait bir çakıştırma yapılması gibi bir problemle karşılaşılabilir. Bu nedenle ikinci yaklaşıma bir kısıt getirilerek SAR görüntüsü 4 eş parçaya ayrılıp her bölgede eşit sayıda bağlantı noktası olması koşulu getirilebilir. Ya da her bölgede olması gereken minimum bağlantı noktası sayısı belirlenebilir. Böylelikle kullanıcı SAR görüntüsünün tamamında bağlantı noktası seçmek durumundadır. Bağlantı noktaları seçildikten sonra piksel altı seviyede kayma miktarının hesaplanabilmesi için üst örnekleme yapılmalıdır. Üst örnekleme görüntünün tamamında yapılabileceği gibi bağlantı noktaları merkezde kalacak şekilde açılacak pencereler içinde de yapılabilir ve böylelikle işlem süresinden tasarruf edilir.

Piksel altı seviyede yapılacak interpolasyonun üst örnekleme oranının ve interpolasyon yönteminin ne olması gerektiği ile ilgili farklı görüşler mevcuttur. Li ve Goldstein [109] bu oranın 1/20 seviyesinde olması gerektiğini ve 3-noktalı doğrusal interpolasyonu savunurken, Rufino [110], [111] 1/10 üst örneklemenin yeterli olduğunu söylemiş ve cubic B-spline interpolasyonu önermiştir. Kwoh [112] ve Hanssen [113] ise yine 1/10 üst örnekleme oranının yeterli olacağını, Mark Richards [5] ise oranın 1/8 ve üzerinde olması gerektiğini savunmuşlardır. Li ve Bethel de [33] 1/10 örneklemenin yeterli olduğunu ancak interpolasyon tipinin uygulanacak SAR görüntüsüne göre performans değişkenliği gösterdiğini ve tüm SAR görüntüleri için en iyi denebilecek bir interpolasyon tipi olmadığını savunmuşlardır.

SAR görüntülerinde seçilmiş bağlantı noktası merkezde olacak şekilde istenen pencere büyüklüğü içerisinde belli bir üst örnekleme oranı ve interpolasyon tipi belirlenerek üst

örnekleme yapılır. Üst örnekleme sonucu oluşan yeni pencereler çapraz korelasyon işlemine tabi tutulur. Ancak burada çapraz korelasyon işleminin kompleks sayılarla mı yoksa büyüklük üzerinden mi yapılması gerektiği de tartışılan bir husustur. Rufino [110], [111] sadece büyüklüğü kullanırken, Kwoh [112] büyüklüğün kompleks sayılarla çapraz korelasyona göre daha iyi sonuç verdiğini söylemektedir. Prati ve Rocca [114] ise çakıştırmadaki çapraz korelasyon için kompleks sayı kullanmışlardır. Çapraz korelasyon işlemi sonucunda her bağlantı noktası için kaba çakıştırmada olduğu gibi menzilde ve çapraz menzilde bir kayma değeri hesaplanır. Kaba çakıştırma adımından farklı olarak burada hesaplanan kayma değeri üst örnekleme işleminden dolayı piksel seviyesinde değil piksel altı seviyededir.

Hassas çakıştırma adımında, bağlantı noktaları için hesaplanan kayma değerlerinden menzilde ve çapraz menzilde nihai bir kayma değeri hesaplanmaz. Onun yerine bulunan değerler bir dönüşüm denklemine oturtulmaya çalışılır. Ancak burada bağlantı noktalarının tamamı kullanılmak zorunda değildir. Hatta hatalı çapraz korelasyon sonucu üreten bağlantı noktaları dönüşüm denkleminin katsayılarının belirlenmesinde hata yapılmasına sebep olur. Bu sebeple bağlantı noktaları Eşitlik 2.38'deki gibi belli bir kalite metriğine göre elenebilir. Ya da kalite metriğine göre sıralanıp dönüşüm denklemi için yeterli sayıda bağlantı noktası en yüksekten başlanarak seçilebilir. Böylelikle dönüşüm denkleminin katsayılarının belirlenmesinde yapılacak hatalar minimuma indirilir. Dönüşüm denkleminin belirlenmesi ve katsayılarının hesaplanması hassas çakıştırma işleminin ikinci adımıdır. Dönüşüm denklemi aslında birinci SAR görüntüsü (master) ile ikinci SAR görüntüsü (Slave) arasındaki dönüşümü ifade etmektedir. Dönüşüm denklemleri farklı şekillerde ve farklı karmaşıklık seviyesinde yazılabilir.

$$S_M = a_1 M_M^2 + b_1 M_A^2 + c_1 M_M + d_1 M_A + e_1 \qquad 2.49$$

$$S_A = a_2 M_M^2 + b_2 M_A^2 + c_2 M_M + d_2 M_A + e_2 \qquad 2.50$$

Eşitlik 2.49 ve Eşitlik 2.50'de yer alan (S_M, S_A) değişkenleri ikinci SAR görüntüsündeki (Slave) bağlantı noktalarının piksel koordinatlarını gösterirken, (M_M, M_A) değişkenleri ise ikinci SAR görüntüsündeki bağlantı noktalarına denk gelen ilk SAR görüntüsündeki (Master) bağlantı noktalarının piksel koordinatlarını sembolize etmektedir. Böylelikle iki SAR görüntüsü arasındaki dönüşüm denklemi oluşmaktadır.

Denklemleri yorumlamak gerekirse;

- ✓ e_1 ve e_2 sırasıyla menzil ve azimuttaki piksel altı seviyedeki kaydırma (öteleme) miktarını göstermektedir. Kaba çakıştırma adımında büyük ölçüde halledilmiş olsa bile bu iki değerin sıfırdan farklı bir değer alması genellikle SAR sensörleri arasındaki dik baz uzaklık farkından kaynaklanmaktadır. Kaba çakıştırma işlemi yapılmış olduğu için e_1 ve e_2 değişkenlerinin 1'den küçük bir değer çıkması beklenmektedir. Bu da piksel altı seviyede bir kaydırma yapılması gerektiğini göstermektedir.
- ✓ c_1 ve d_2 sırasıyla menzil ve azimuttaki PRF ve uydu süratinden kaynaklı baz uzaklık değişimi dolayısıyla ortaya çıkan uzamalardan (stretch) dolayı oluşan görüntü farklılıklarını sembolize etmektedir.
- ✓ c_2 ve d_1 sırasıyla menzil ve azimuttaki açısal dönüşler kaynaklı eğrilik (skew) dolayısıyla oluşan görüntü farklılıklarını sembolize etmektedir.
- ✓ a_1, a_2, b_1 ve b_2 ise ikinci seviye terimlerdir ve genellikle çok geniş alanlı SAR görüntü çiftlerinde oluşan görüntü farklılıklarını sembolize etmektedir.

Dönüşüm denklemi Eşitlik 2.49 ve Eşitlik 2.50'deki denklemler sadeleştirilerek daha az hesaplama karmaşıklığı içeren bir hale getirilebilir. Böylelikle daha az bağlantı noktası sonucu ile doğru dönüşüm denklemi için katsayılar doğru hesaplanır.

$$S_M = c_1 M_M + d_1 M_A + e_1 \qquad 2.51$$

$$S_A = c_2 M_M + d_2 M_A + e_2 \qquad 2.52$$

Dönüşüm denklemleri daha karmaşık olarak da planlanabilir. Bazı çalışmalarda farklı dönüşüm denklemlerinin kullanıldığı görülmüştür. Li, doktora tez çalışmasında Eşitlik 2.53 ve Eşitlik 2.54'ü önermiş ancak Eşitlik 2.51 ve Eşitlik 2.52'yi kullanmıştır.

$$S_M = a_1 M_M^2 + b_1 M_A^2 + c_1 M_M + d_1 M_A + e_1 + f_1 M_M M_A \qquad 2.53$$

$$S_A = a_2 M_M^2 + b_2 M_A^2 + c_2 M_M + d_2 M_A + e_2 + f_2 M_M M_A \qquad 2.54$$

Madsen ise yüksek lisans tez çalışması [36] kapsamında Eşitlik 2.55, Eşitlik 2.56 ve Eşitlik 2.57 benzeri dönüşüm denklemleri kullanmışlardır.

$$S_M = c_1 M_M + d_1 M_A + e_1 + \sum_{i=1}^{\#cp} g_1 r_i^2 \ln r_i^2 \qquad 2.55$$

$$S_A = c_2 M_M + d_2 M_A + e_2 + \sum_{i=1}^{\#cp} g_2 r_i^2 \ln r_i^2 \qquad 2.56$$

$$r_i = \sqrt{M_M^2 + M_A^2} \qquad 2.57$$

Dönüşüm denklemi yazılıp bağlantı noktalarının ilk görüntüdeki piksel koordinatları ve çapraz korelasyon işlemi sonucunda ikinci SAR görüntüsündeki ilgili piksel noktaları denkleme yazılarak denklemin katsayıları hesaplanır ve dönüşüm denklemi çıkarılmış olur.

Hassas çakıştırmanın üçüncü ve son adımı ise ikinci SAR görüntüsünün (Slave) dönüşüm denklemine göre yeniden örneklenmesi (resampling) işlemidir. Yeniden örnekleme yapılırken SAR görüntüsündeki her bir piksel dönüşüm denklemine yazılır ve yeni değerine atanır. Bu işlemde kullanılan interpolasyon tipi de kritiktir. Sinc interpolasyon ya da doğrusal interpolasyon yeniden örnekleme için en çok tercih edilen interpolasyon tipleridir. Bunların yanında en yakın komşu (nearest neighbor) ve kübik evrişim (cubic convolution) gibi farklı interpolasyon tipleri de kullanılabilir. Yeniden örnekleme için sinc interpolasyon kullanıldığı durumda fonksiyon Eşitlik 2.58 gibi olacaktır.

$$F(n) = Sinc[\pi(n + \Delta)] \qquad 2.58$$

$$n = -\frac{(S-1)}{2}, \ldots 0, \ldots, \frac{(S-1)}{2} \qquad , \qquad n \in [-0.5, 0.5)$$

Sinc fonksiyonunun uzunluğu tek sayıdır ve S değerindedir. Böyle bir durumda orijinal x(n) ayrık fonksiyonunun (m-Δ) interpolasyon noktasındaki değeri Eşitlik 2.59'daki gibi hesaplanır.

$$x(m - \Delta) = \sum_{k=m-\frac{S-1}{2}}^{k=m+\frac{S-1}{2}} x(k)\, Sinc[\pi(k - m + \Delta)] \qquad 2.59$$

Sinc interpolasyon yüksek doğrulukta sonuç üretiyor olsa da yeniden örnekleme yapılan sinyal üzerinde "Gibbs Etkisi" ismi verilen bir çeşit dalgalanma oluşturmaktadır. Bu osilasyon etkisinin azaltılması için interpolasyon sonrası yeniden örneklenen sinyal üzerinden pencereleme (windowing) işlemi yapılması gerekmektedir. Hann veya Kasier penceresi, Gibbs etkisinin azaltılması için kullanılabilir [113]. Hann penceresi için yazılacak denklem Eşitlik 2.60'daki gibi olacaktır.

$$W(n) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\cos\left[\frac{\pi}{\frac{S}{2}+1}(n+\Delta)\right] \quad 2.60$$

$$n = -\frac{(S-1)}{2}, \dots 0, \dots, \frac{(S-1)}{2}$$

Sinc interpolasyon ve pencereleme işlemi yapılıp normalize edildikten sonra denklem Eşitlik 2.61'deki gibi olacaktır.

$$x(m-\Delta) = \left[\sum_{k=m-\frac{S-1}{2}}^{k=m+\frac{S-1}{2}} x(k)\,F(k-m)W(k-m)\right] / \left[\sum_{k=m-\frac{S-1}{2}}^{k=m+\frac{S-1}{2}} F(k-m)W(k-m)\right] \quad 2.61$$

2.3.4. İnterferogram

İnterferogram ile ilgili adımlar; oluşturma, düzleştirme ve filtreleme adımlarından oluşmaktadır. Filtreleme adımı opsiyoneldir ve katlı faz açma adımında hesaplama karmaşıklığını azaltmak ve başarımı artırmak için kullanılmaktadır.

2.3.4.1. İnterferogram Oluşturma

Farklı konumlardaki uydular tarafından alınmış aynı bölgenin SAR görüntüleri çakıştırıldıktan sonra CCD haritası oluşturularak çakıştırma başarısı gözlemlenir. İstenilen başarı yüzdesi elde edildiğinde SAR görüntü çifti interferometrik SYM üretimi için kalan işlem adımlarına devam edebilecektir. Bu adımlardan ilki de interferogramın oluşturulmasıdır. Interferogram oluşturulmasındaki amaç SAR görüntü çiftleri arasında piksel piksel interferometrik faz farkının hesaplanması gerekliliğidir.

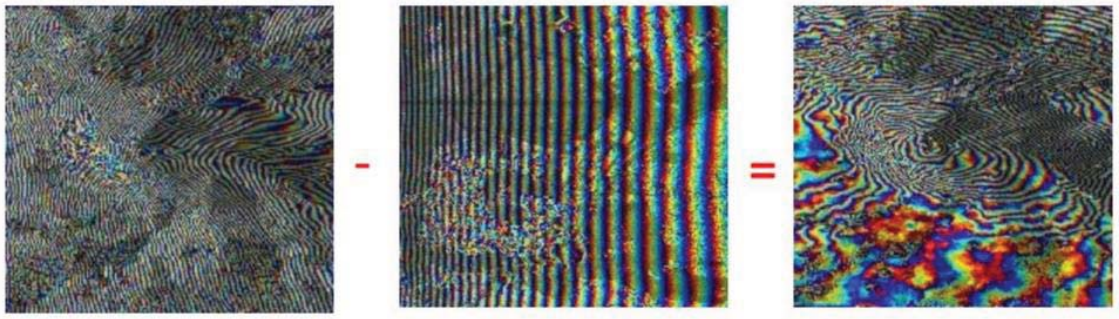
$$I_{G_1G_2}(x,y) = G_1(x,y)G_2^*(x,y) \quad 2.62$$

$$I_{G_1G_2}(x,y) = A_{G_1}A_{G_2}exp\,[j(\emptyset_1 - \emptyset_2)] \quad 2.63$$

2.3.4.2. İnterferogram Düzleştirme

Oluşturulan interferogram nesne yüksekliğinden oluşan fark ile birlikte anten geometrisinden dolayı oluşan farkı da içerir ve menzil yönünde dalgalanma yapacak şekilde görünür. Bunun sebebi, SAR sensörününü bulunduran platform ile görüntülenen bölgenin arasındaki uzaklığın menzil yönünde değişmesi ve farklı uzaklıklar için farklı

faz değerlerinin oluşmasıdır. Menzil yönünde artacak şekilde faza eklenen geometriden kaynaklı fazın hesaplanarak interferogramdaki faz değerinden çıkarılması ve bölgedeki her bir çözünürlük hücresi için yükseklik bilgisin kaynaklı gerçek faz farkı değerinin belirlenmesi gerekmektedir. Böylelikle interferogram düzleştirme yapılmış olacaktır. Interferogram bu işlem sonrasında Şekil 2-21'deki gibi izohips benzeri halkalardan yani örgelerden (fringe) oluşan bir görüntüye sahip olacaktır.



Şekil 2-21: Interferogram Düzleştirme

İnterferogram düzleştirme ya da bir diğer adıyla Yeryüzü Fazı Kaldırılması (Earth Phase Removal) interferogram oluşturulmasından sonra uygulanması gereken bir adımdır. Interferogramdaki yeryüzünün şeklinden ve sensörlerin bakış açısından kaynaklı bu ek fazı daha iyi anlamak için Şekil 2-13'e bakılmalıdır.

Φ_{flat}, P_1 noktası için iki SAR sensörü arasındaki faz farkını, bir diğer deyişle herhangi bir yükseklik yokken bile olan faz farkı bilgisini sembolize etmektedir.

$$\emptyset_{flat} = \frac{2B_{\parallel}}{\lambda} 2\pi = \frac{4\pi}{\lambda} B_{\parallel} = \frac{4\pi}{\lambda} B\cos(\psi + \beta + \alpha) \quad 2.64$$

$$\emptyset_{flat} = \frac{4\pi}{\lambda} B sin(\theta - \beta) \quad 2.65$$

$$\emptyset_{flat} = \frac{4\pi}{\lambda} B_{\perp} tan(\theta - \beta) \quad 2.66$$

Fazlalık olan bu faz değeri görüntüdeki tüm pikseller için hesaplanmalı ve interferogram fazından çıkarılmalıdır.

$$I^{f}_{G_1 G_2}(x, y) = A_{G_1} A_{G_2} exp\,[j(\emptyset_1 - \emptyset_{flat})] \quad 2.67$$

2.3.4.3. İnterferogram Filtreleme

Oluşturulan interferogram üzerinden faz açma işlemi yapılacağı için interferogramın filtrelenmesi önemli ve gerekli bir işlem adımıdır. Zira filtrelenerek gürültüsü azaltılmış bir interferogramın faz işlemine girdi olarak verilmesi fazı açarken yapılacak hataları da azaltacaktır.

$$I_{G_1G_2}^{ff}(x,y) = filtered(I_{G_1G_2}^{f}(x,y)) \tag{2.68}$$

2.3.5. Harita Oluşturma

SAR interferometri tekniğiyle Sayısal Yükseklik Modeli oluşturma algoritmasının adımlarından biri de haritaların üretilmesi aşamasıdır. Bu adımda üretilecek olan haritalar sayesinde birçok anlamlı bilgi çıkarılmaktadır. Aynı zamanda üretilen haritalar InSAR ile SYM oluşturma algoritmasının diğer adımları için hem girdi olmakta hem de geri besleme olarak kullanılabilmektedir.

2.3.5.1. Korelasyon Haritası Oluşturma

SAR İnterferometri tekniği vasıtasıyla birçok harita oluşturulabilmektedir. Amaca göre oluşturulan bu haritalardan en çok kullanılanı ve bilineni korelasyon haritası, diğer adıyla faz uyum haritasıdır. Korelasyon haritası oluşturmak için farklı alternatif formüller bulunmaktadır. Sadece büyüklük değerinin hesaplandığı, faz bilgisinin korunmadığı formüller Eşitlik 2.69 ve Eşitlik 2.70'de verilmiştir.

$$\gamma = \frac{\left|\sum_{i=1}^{p_M}\sum_{j=1}^{p_A} G_1(i,j)\, G_2^*(i,j)\right|}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{p_M}\sum_{j=1}^{p_A}|G_1(i,j)|^2\right)\left(\sum_{i=1}^{p_M}\sum_{j=1}^{p_A}|G_2(i,j)|^2\right)}} \tag{2.69}$$

$$\gamma = \frac{2.\left|\sum_{i=1}^{p_M}\sum_{j=1}^{p_A} G_1(i,j)\, G_2^*(i,j)\right|}{\left(\sum_{i=1}^{p_M}\sum_{j=1}^{p_A}|G_1(i,j)|^2\right) + \left(\sum_{i=1}^{p_M}\sum_{j=1}^{p_A}|G_2(i,j)|^2\right)} \tag{2.70}$$

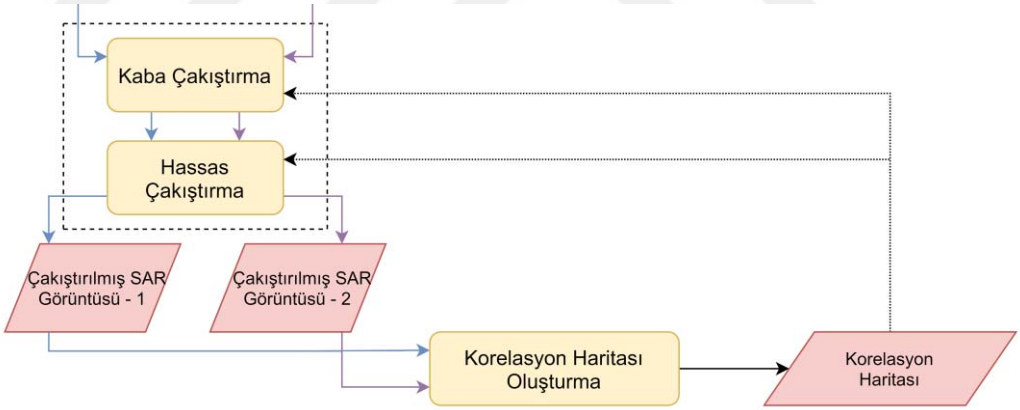
Faz bilgisinin de yer aldığı korelasyon haritası ise Eşitlik 2.71'deki gibi hesaplanır [42], [115].

$$\gamma = \frac{\left|\sum_{i=1}^{p_M}\sum_{j=1}^{p_A} G_1(i,j)\, G_2^*(i,j)\exp\left(-j\emptyset_{flat}(i,j)\right)\right|}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{p_M}\sum_{j=1}^{p_A}|G_1(i,j)|^2\right)\left(\sum_{i=1}^{p_M}\sum_{j=1}^{p_A}|G_2(i,j)|^2\right)}} \tag{2.71}$$

Eşitliklerde yer alan p_M ve p_A değişkenleri korelasyon haritası oluşturulurken SAR görüntüleri üzerinde gezdirilen pencerenin menzil ve çapraz menzil yönlerindeki boyutlarıdır.

Korelasyon haritasının oluşturulması adımı birçok sebepten ötürü kritik bir öneme sahiptir.

- ✓ Korelasyon haritası sayesinde SAR görüntülerinin çakıştırılma doğruluğu ölçülebilmektedir. Zira çakıştırma adımının sağlaması, korelasyon haritasının üretilip ortalama faz uyum değerine bakılarak yapılabilmektedir. Haritanın ortalama faz uyum değeri (γ) sıfır ile bir arasında değerler almaktadır. Ortalama faz uyumunun 1'e yakın bir değer olarak hesaplanması SAR görüntülerinin birbirine daha çok benzediğini göstermektedir. Zira değerin 1 olması SAR görüntülerinin birebir aynı olduğu anlamına gelmektedir. Değerin düşük olması ise görüntülerin birbirinden farklı olduğunu ya da çakıştırma adımının hatalı sonuçlar ürettiğini göstermektedir. Bu sebeple ortalama faz uyum değeri çakıştırma adımı için bir kalite metriği ve geri besleme mekanizması görevi göstermektedir.

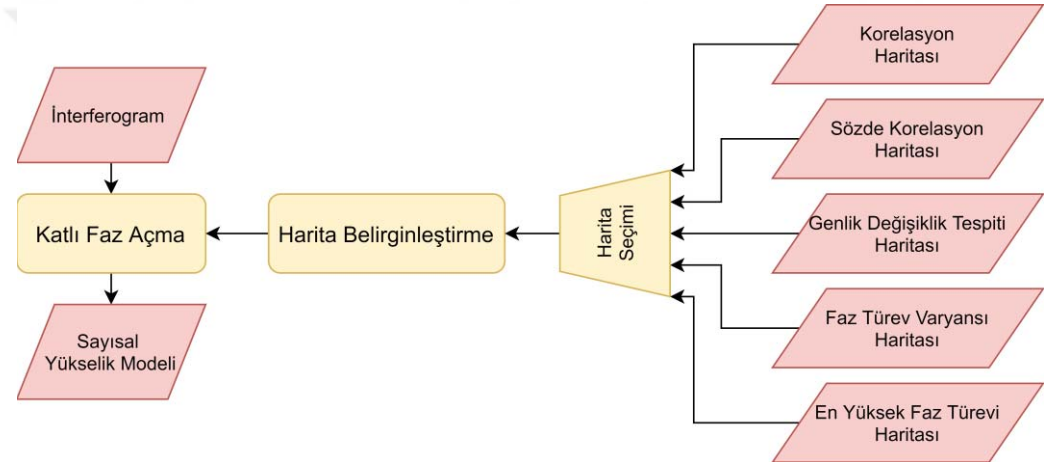


Şekil 2-22: Geri Besleme Mekanizması

Çakıştırma adımı ile korelasyon haritası oluşturma adımları yüksek faz uyum değeri yakalayana kadar iteratif olarak peş peşe çalıştırılabilir. Ortalama faz uyum değeri belli bir eşik değerinin üstüne çıkana kadar işlem tekrarlanır. Böylelikle birçok alternatif çakıştırma parametresi denenmiş olur. Özellikle kaba çakıştırma adımında kaydırma miktarı bu şekilde daha kolay belirlenir. Bu işlem birçok kez tekrar edileceği düşünülürse süreden tasarruf edilmesi gerekecektir. Bu sebeple iki farklı alternatif değerlendirilebilir. Bunlardan ilki SAR görüntülerinin tamamının kullanılarak ortalama faz uyum değerinin hesaplanmasına gerek

yoktur. Nispeten yüksek oradan öznitelik içeren (yollar, kavşaklar, binalar, yansıtıcılığı yüksek olan bölgeler) ve görüntüler arasında değişiklik miktarı en az olan (ağaç olmayan) bir bölge seçilerek sadece o küçük bölge için ortalama faz uyum değeri hesaplanarak işlemler iteratif olarak devam ettirilir. İkinci bir yol ise paralel programlama yapılarak işlem süresi kısaltılabilir. Tekniğin algoritma adımlarının çalıştırıldığı işlemci üzerindeki çekirdeklerin tamamı kullanılarak işlem paralelleştirilir ve süreden tasarruf edilir.

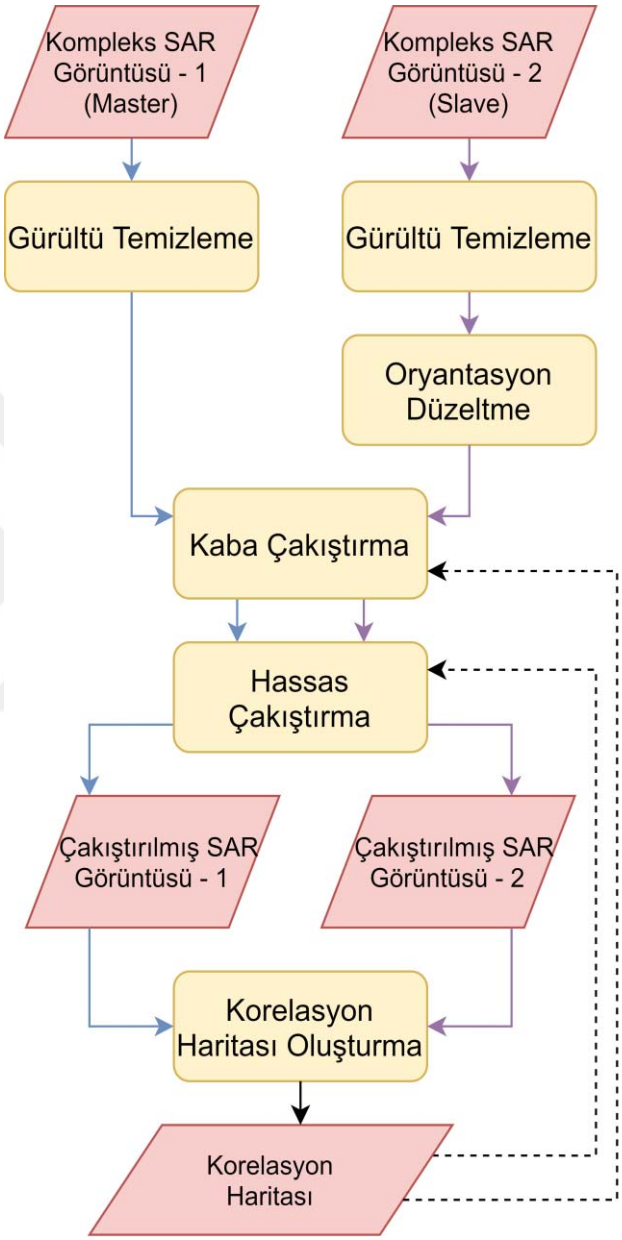
- ✓ Korelasyon haritası, SAR interferometri tekniği ile Sayısal Yükseklik Modeli oluşturmanın en kritik adımı olan katlı faz açma adımında Şekil 2-23'teki gibi rehber harita olarak kullanılabilmektedir.



Şekil 2-23: Rehber Harita Olarak Kullanım Mekanizması

Katlı faz açma adımında birçok algoritma katlı fazı açarken izlemesi gereken yolu rehber haritalar kullanarak belirlemektedir. Yüksek doğrulukta üretilmiş bir rehber harita, katlı fazın açılmasında izlenecek yolun da doğru olmasını sağlayacaktır. Bu sayede katlı faz daha doğru açılabilecek ve düşük hata oranında bir sayısal yükseklik modeli üretilebilecektir. Korelasyon haritasındaki piksellerin faz uyum değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanır. Düzleştirilmiş ve filtrelenmiş interferogramdaki katlı fazın açılması aşamasında izlenecek yol için sıralanmış olan piksellerin faz uyum değerleri çok önemli bir kalite metriği olmaktadır. Ayrıca katlı fazı açma algoritmasında bariyerlerin (Branch-Cut, Mask-Cut) oluşturulmasında da rehber haritalar kullanılabilmektedir. Korelasyon haritası diğer haritalar gibi bu açıdan da kritik bir öneme sahiptir.

- ✓ Korelasyon haritası, SAR interferometri tekniğinin Faz Uyumlu Değişiklik Tespiti (FUDT) uygulamasının nihai çıktısı olarak kullanılmaktadır. FUDT uygulamasının algoritma akış şeması Şekil 2-24'te verilmiştir. InSAR tekniği ile SYM üretme algoritmasının akış şeması FUDT'yi de tamamen içermektedir.



Şekil 2-24: SAR İnterferometri Tekniği ile FUDT Haritası Oluşturulması Algoritması

FUDT uygulamasında SAR sensörü içeren platformlar (uydu veya uçak) farklı zamanlarda çok benzer yörüngelerden geçerek aynı bölgenin SAR görüntülerini oluştururlar. İki tarih arasında ilgili bölgede olan değişiklikleri tespit etmenin yollarından birisi de SAR interferometri tekniği ile Faz Uyumlu Değişiklik Tespiti haritasının oluşturulmasıdır. Bu da yüksek doğrulukta çakıştırılmış SAR görüntülerinden korelasyon

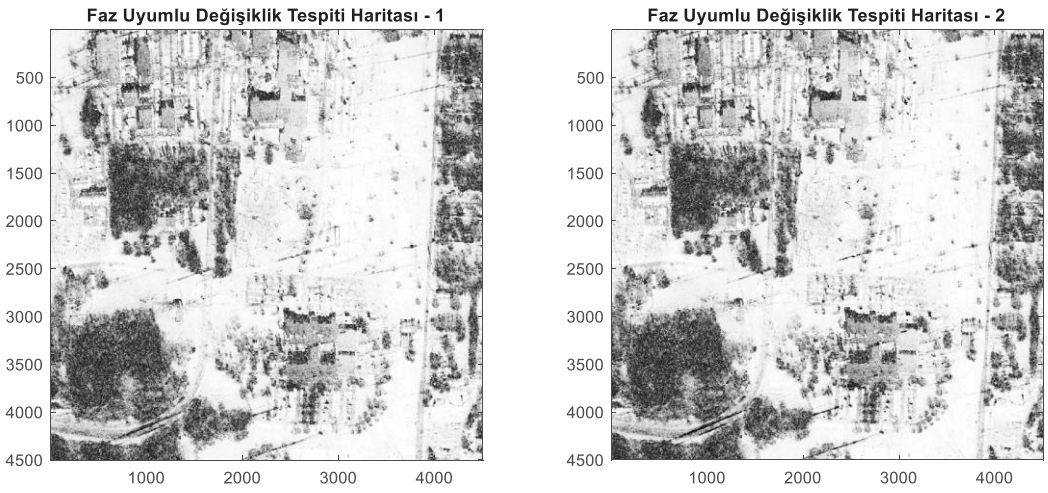
haritası oluşturmak anlamına gelmektedir. Görüntüler aynı bölgeye ait oldukları için ve yüksek doğrulukta çakıştırıldıkları için haritadaki piksellerin büyük çoğunluğunun faz uyum değeri yüksek olacaktır. Ancak görüntüler toplanırken arada geçen zamanda ilgili bölgede bazı değişiklikler olmuş olabilir. Değişikliğin olduğu piksellerde ise faz uyum değeri düşük çıkacaktır. Bu değişiklikler korelasyon haritasında düşük faz uyum değerinden dolayı görülebilecektir.

Konuyla ilgili yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Bunlardan en dikkat çekenlerinden bir tanesi de Preiss'in doktora tez çalışmasıdır [39]. Çalışmadaki görseller *GİRİŞ* bölümünde SAR İnterferometri ve Radargrametri Literatürü kısmında Şekil 1-5 ve Şekil 1-6'da verilmiştir. Aryıca Madsen'in çalışmasında da [36] benzer bir örnek bulunmaktadır. Şekil 2-25'te değişiklik tespiti için kullanılan SAR görüntüleri ve değişiklik tespiti için üretilen korelasyon haritası görülmektedir.

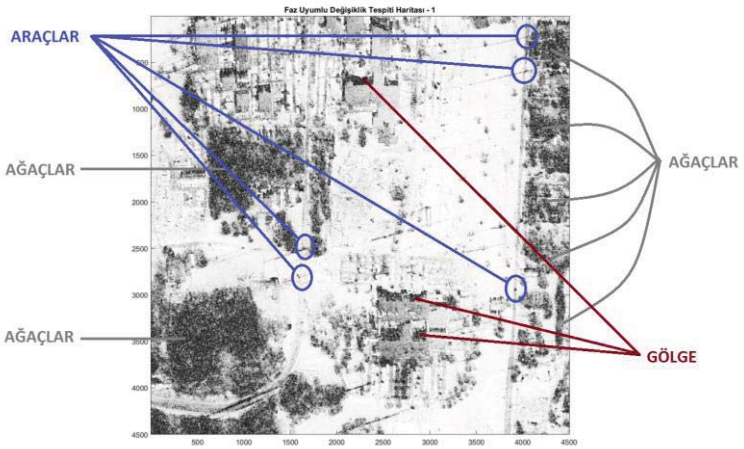


Şekil 2-25: SAR Görüntüleri ve Değişiklik Tespiti Haritası [36]

Değişiklik Tespitine yönelik Korelasyon Haritası üretmek için [81]'deki bağlantıda yer alan X-Bant AFRL SAR sensörüne ait Şekil 2-9'daki SAR görüntü çifti kullanılarak [82]'deki çalışmaya benzer bir çalışma yapılmıştır. Bu kapsamda Eşitlik 2.69 ve Eşitlik 2.70'deki formüller kullanılarak Şekil 2-26'daki korelasyon haritaları üretilmiştir.



Şekil 2-26: Korelasyon Haritaları



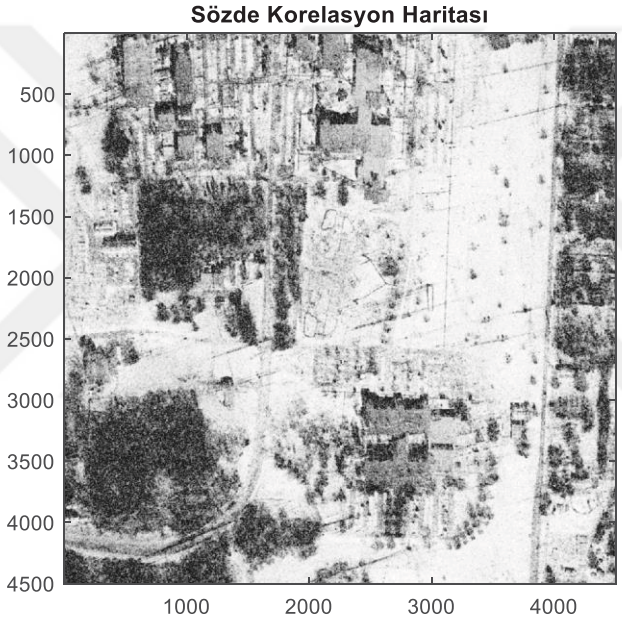
Şekil 2-27: Değişiklik Tespitleri

Şekil 2-27'deki değişiklik tespiti için üretilen korelasyon haritasında faz uyum değeri düşük olan (siyah renkli) pikseller bulunmaktadır. Bunun sebebi ilk görüntü ile ikinci görüntü arasındaki zaman farkı, piksellere denk gelen nesnelerin hareket etmesi (ağaç yaprakları, araçlar vb.) veya değişikliğe uğramış olması ve gölgede kalan alanların her iki görüntüde de bulunmasından kaynaklanmaktadır. Zira gölgede kalan alanlarda doğru bilgi bulunmamakta ve sadece gürültüden oluşmaktadır. Bu durumda da iki görüntü arasında gölge denk gelen piksellerde faz korelasyonunun düşük olmasına sebep olmaktadır.

2.3.5.2. Sözde Korelasyon Haritası Oluşturma

Korelasyon Haritası gibi katlı faz açma algoritmasına girdi olarak verilebilecek haritalardan bir diğeri de sözde korelasyon (Pseudo Correlation) haritasıdır. Kompleks SAR görüntülerinin büyüklük değerlerinin bilinmediği durumda korelasyon haritasına benzer bir harita üretebilmek için kullanılır. Benzer işlevde olup rehber harita olarak kullanılabilmektedir. Eşitlik 2.72'de formül paylaşılmıştır.

$$|\gamma| = \left[\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{p_M}\sum_{j=1}^{p_A} cos\varphi_{i,j}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{p_M}\sum_{j=1}^{p_A} sin\varphi_{i,j}\right)^2}\right] / (p_M . p_A) \qquad 2.72$$



Şekil 2-28: Sözde Korelasyon Haritası

Şekil 2-9'daki SAR görüntü çifti kullanılarak Şekil 2-28'deki sözde korelasyon haritası üretilmiştir.

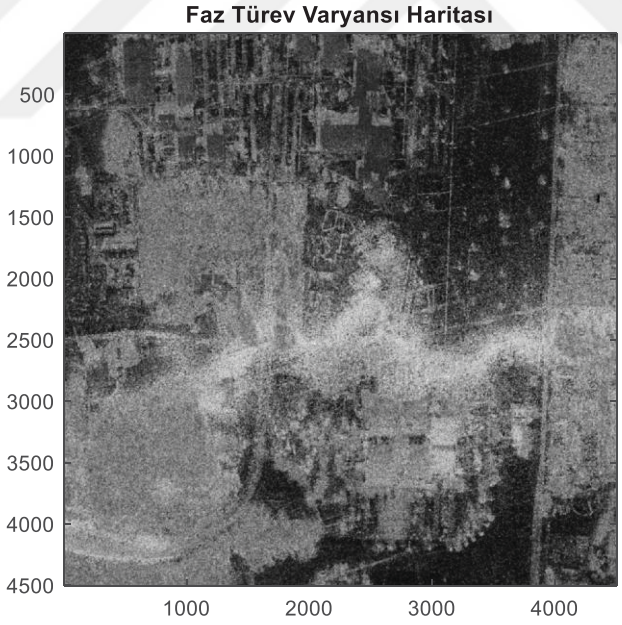
Korelasyon haritası ile sözde korelasyon haritasının farkına bakacak olursak faz verisi iyi tanımlanmış ve gürültülü olmasa bile, sözde korelasyon haritaları dik arazileri düşük kaliteli bölgeler olarak işaretlemektedirler. Çünkü dik arazilerin eğimleri yüksek olduğu için faz değişimleri de diğer bölgelere oranla daha fazladır ve bu sebeple faz verileri birbiriyle iyi korelasyon göstermezler [44]. Öte yandan korelasyon haritaları sadece faz bilgisini değil piksellerin büyüklük değerlerini de kullandıkları için dik arazilerde bu tip hatalar üretmezler.

2.3.5.3. Faz Türev Varyansı Haritası Oluşturma

Özellikle dik eğimli arazilerde sözde korelasyon haritasının düşük korelasyon değeri üretmesi sebebiyle faz türev varyansı haritası oluşturarak bu tip dezavantajların üstesinden gelinebilir. Faz Türev Varyansı Haritası, Eşitlik 2.73 kullanılarak oluşturulmaktadır.

$$\gamma = \left[\sqrt{\sum_{i=1}^{p_M} \sum_{j=1}^{p_A} \left(\Delta_{i,j}^{M} - \bar{\Delta}_{\frac{p_M}{2},\frac{p_A}{2}}^{M} \right)^2 + \sum_{i=1}^{p_M} \sum_{j=1}^{p_A} \left(\Delta_{i,j}^{A} - \bar{\Delta}_{\frac{p_M}{2},\frac{p_A}{2}}^{A} \right)^2} \right] / (p_M . p_A) \qquad 2.73$$

Eşitlik 2.73'te yer alan $\Delta_{i,j}^{M}$ ve $\Delta_{i,j}^{A}$ ifadeleri, fazın menzil ve çapraz menzil (azimut) yönündeki ayrık türevini sembolize ederken, $\bar{\Delta}_{\frac{p_M}{2},\frac{p_A}{2}}^{M}$ ve $\bar{\Delta}_{\frac{p_M}{2},\frac{p_A}{2}}^{A}$ ise p_M ve p_A boyutlarındaki pencere içerisindeki faz değerlerinin ayrık türevlerinin ortalama değerlerini temsil etmektedir [43]. Eşitlik 2.73 aynı zamanda menzil ve azimut yönünde alınan ayrık türevin varyansının ortalama karesel hatasını (Root Mean Squaere Error – RMSE) vermektedir.



Şekil 2-29: Faz Türev Varyansı Haritası

Şekil 2-9'daki SAR görüntü çifti kullanılarak Şekil 2-29'daki Faz Türev Varyansı Haritası üretilmiştir. Faz türev varyansı haritası da tıpkı korelasyon haritası gibi SAR görüntüleme geometri hatalarından olan öne çıkma / ters görüntülemeden kaynaklı korelasyonun düşük olduğu kısımları net olarak göstermektedir.

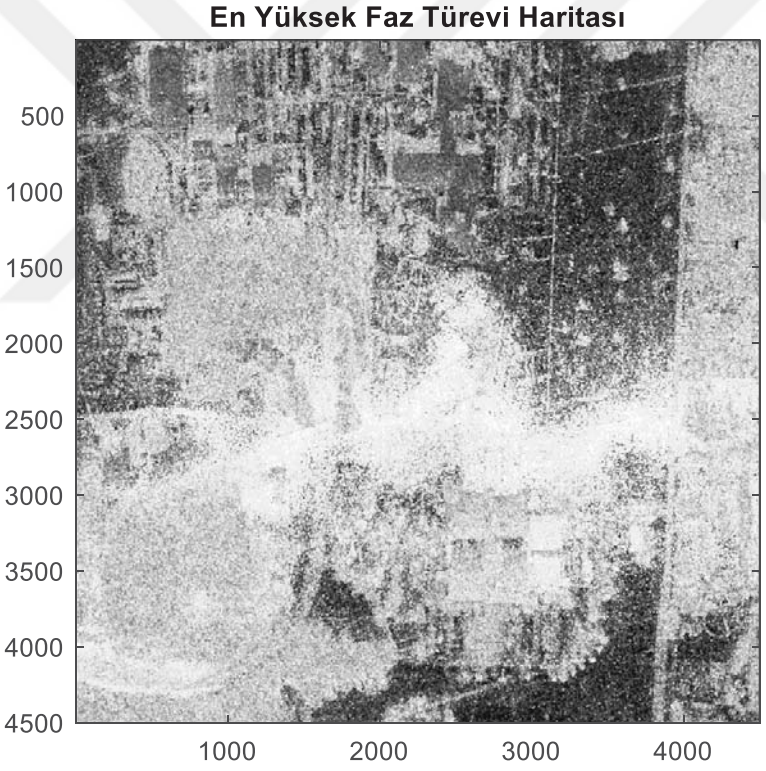
2.3.5.4. En Yüksek Faz Türevi Haritası Oluşturma

Çakıştırılmış SAR görüntü çifti kullanılarak üretilen rehber haritalardan bir diğeri de En Yüksek Faz Türevi Haritasıdır. Gürültülü alanlarda fazın türevi genellikle daha yüksek olma eğilimdedir. Pencere gezdirilerek bu en yüksek değer seçilirse gürültünün fazla olduğu alanlar haritada ön plana çıkarılacaktır.

$$maksimum\{|\Delta_{i,j}^{M}|\} \quad 2.74$$

$$maksimum\{|\Delta_{i,j}^{A}|\} \quad 2.75$$

Eşitlik 2.74 ve Eşitlik 2.75'te yer alan $\Delta_{i,j}^{M}$ ve $\Delta_{i,j}^{A}$ ifadeleri, fazın menzil ve çapraz menzil (azimut) yönündeki ayrık türevini sembolize etmektedir.



Şekil 2-30: En Yüksek Faz Türevi Haritası

Şekil 2-9'daki SAR görüntü çifti kullanılarak Şekil 2-30'daki En Yüksek Faz Türevi Haritası üretilmiştir.

2.3.5.5. Genlik Değişiklik Tespiti Haritası Oluşturma

Rehber haritalardan sonuncusu Genlik Değişiklik Tespiti Haritasıdır (Amplitude Change Detection). Çakıştırılmış SAR görüntülerinin büyüklük değerleri kullanılarak harita oluşturulur. Faz bilgisi formüller içerisinde bulunmaz. Literatürde Genlik Değişiklik Haritası üretmek için farklı formüller bulunmaktadır [40].

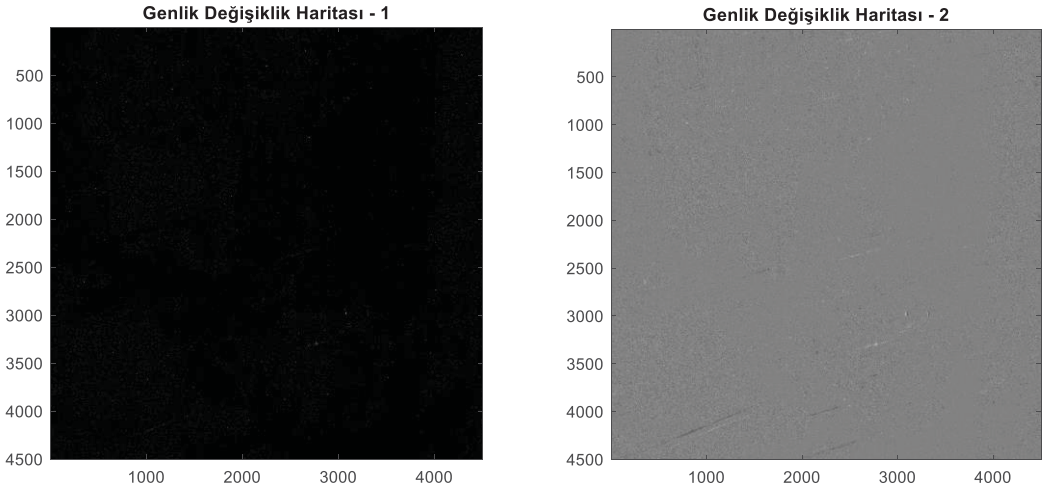
$$H_{GD} = A_{G1} - A_{G2} \tag{2.76}$$

$$H_{GD} = A_{G1}/A_{G2} \tag{2.77}$$

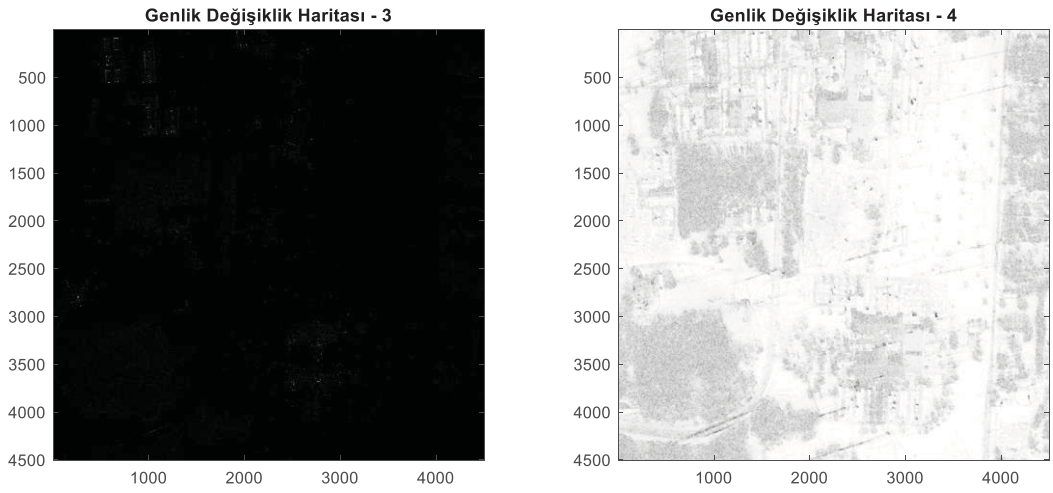
$$H_{GD} = log_{10}(A_{G1}) - log_{10}(A_{G2}) \tag{2.78}$$

$$\gamma = \frac{\left|\sum_{i=1}^{p_M}\sum_{j=1}^{p_A} A_{G1}(i,j)\, A_{G2}(i,j)\right|}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{p_M}\sum_{j=1}^{p_A}|A_{G1}(i,j)|^2\right)\left(\sum_{i=1}^{p_M}\sum_{j=1}^{p_A}|A_{G2}(i,j)|^2\right)}} \tag{2.79}$$

Eşitliklerde yer alan A_{G1} ve A_{G2} değişkenleri SAR görüntülerinin büyüklük bilgileridir. p_M ve p_A değişkenleri ise Genlik Değişiklik Tespiti Haritası oluşturulurken SAR görüntüleri üzerinde gezdirilen pencerenin menzil ve çapraz menzil yönlerindeki boyutlarıdır.



Şekil 2-31: Genlik Değişiklik Tespiti Haritaları 1 - 2



Şekil 2-32: Genlik Değişiklik Tespiti Haritaları 3 - 4

2.3.6. Harita Belirginleştirme

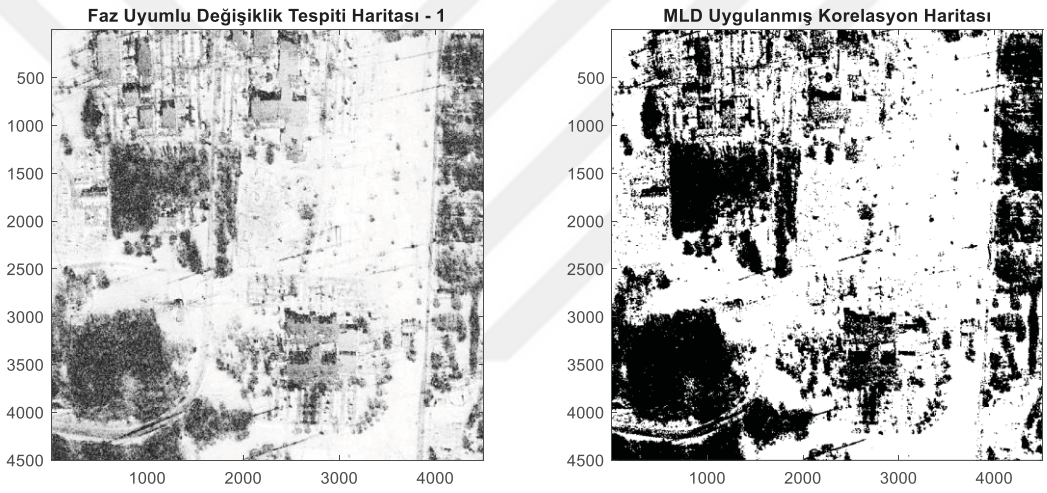
SAR interferometri ile değişiklik tespiti ya da Sayısal Yükseklik Modeli oluşturulması gibi uygulamalarda haritalar üretilmektedir. Üretilen haritalar değişiklik tespitinde, çakıştırma adımının kontrol edilmesinde ve katlı fazın açılmasında girdi olarak kullanılmaktadır. Bu sebeple haritalardaki özelliklerin belirginleştirilmesi amaca daha iyi hizmet etmesini sağlayacaktır. Örneğin haritada değişiklik olan piksellerin ön plana çıkarılması ile değişikliğin tespiti daha kolay olacaktır. Böylelikle faz uyumlu veya genlik değişiklik tespiti haritalarında değişiklik olan pikseller ile olmayan pikseller birbirlerinden daha kolay ayırt edilebilecektir. Literatürde tespitin kolaylaştırılması için değişikliğin belirginleştirilmesi ile ilgili bazı çalışmalar yapılmış ve bazı yöntemler geliştirilmiştir. Belirginleştirme işlemi bir yandan değişiklik tespitini kolaylaştırırken öte yandan rehber harita olarak kullanılan haritaların katlı fazı açma aşamasında kullanılmasında da fayda sağlayacaktır. Zira daha yüksek kalitede rehber haritaların kullanılması katlı faz açma adımının doğruluğunu arttıracak ve bilhassa bariyerlerin oluşturulması aşamasında doğru piksellerin seçilmesini sağlayacaktır. Buna ek olarak katlı fazın açılmasında izlenecek yolu belirlerken kullanılan kalite metriği olan rehber haritada daha yüksek faz uyum / genlik değerinde olan piksellerden başlayacak ve düşük değere doğru ilerleyecektir. Belirginleştirme işlemi ile düşük değerdekiler daha aşağı çekilirken kalite metriği daha belirgin hale gelmiş olacaktır. Özetle; bu işlem sonucunda hem değişiklik tespiti kolaylaşacak hem de katlı fazın açılması adımına daha yüksek kalitede rehber haritalar girdi olarak verilebilecektir.

Haritadaki piksellerin belirginleştirilmesi aşamasında kullanılan 4 farklı tespit yöntemi bulunmaktadır [116], [117], [118].

2.3.6.1. Ortalama Seviye Algılayıcı

Ortalama Seviye Algılayıcı (Mean Level Detector - MLD) yönteminde, üretilen haritadaki değerlerin ortalaması Eşitlik 2.80'deki gibi hesaplanarak eşik kabul edilir [119]. Belirlenen bu eşiğin altındaki ve üstündeki pikseller değişiklik olan veya olmayan pikseller kabul edilir.

$$\zeta_{MLD} = \frac{1}{N_M . N_A} \sum_{i=1}^{N_M} \sum_{j=1}^{N_A} H_x(i,j) \qquad 2.80$$



Şekil 2-33: Korelasyon Haritası ve MLD ile Belirginleştirilmiş Versiyonu

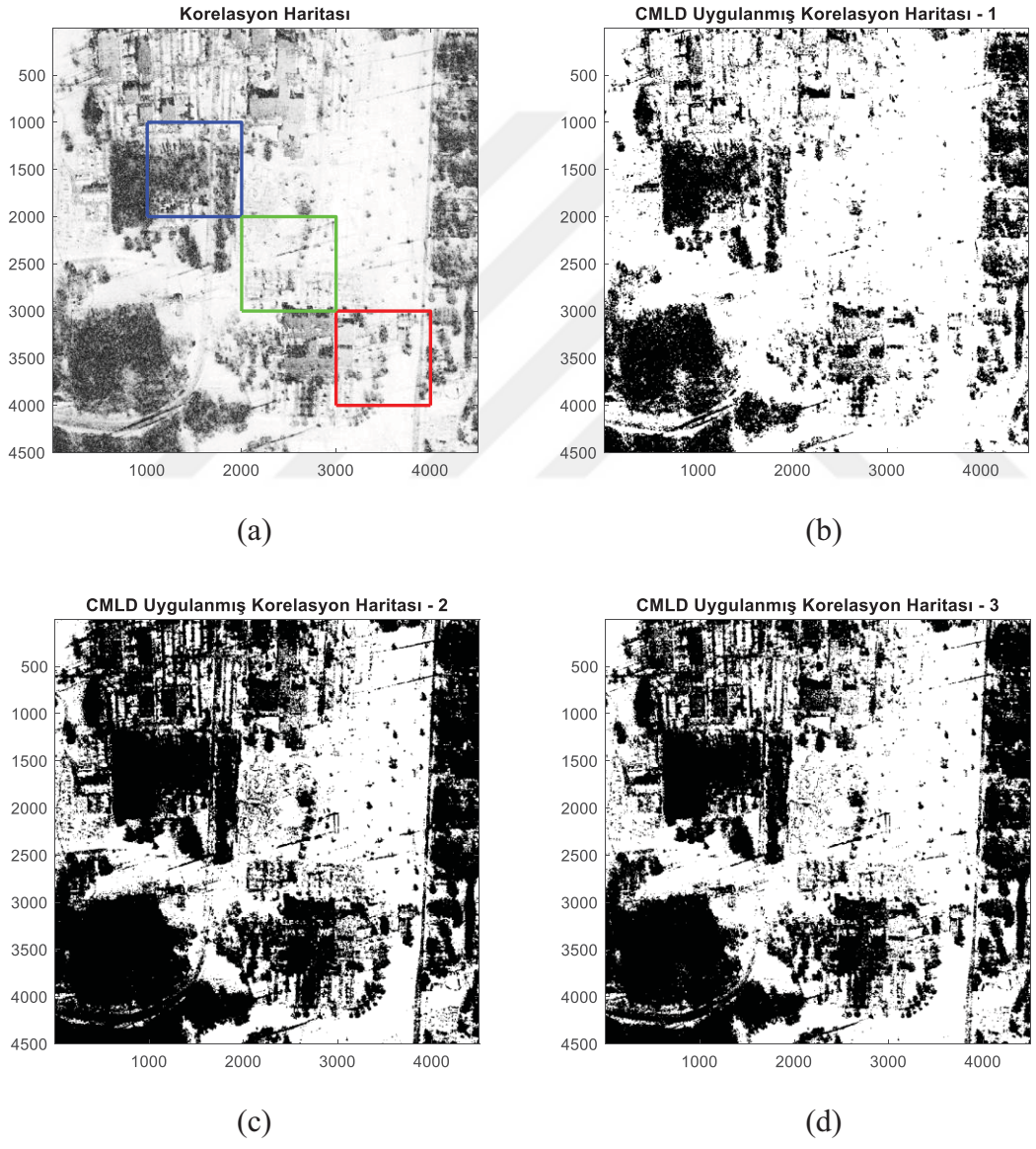
Şekil 2-26'daki korelasyon haritası için ortalama seviye detektörü (MLD) kullanılarak değişikliğin olduğu kısımlar daha belirgin hale getirilmiştir. Şekil 2-33'te hem korelasyon haritası hem de ortalama seviye detektöründen geçtikten sonraki versiyonu verilmiştir.

Algoritmada ilk olarak korelasyon haritasındaki değerlerin tamamı hesaba katılarak ortalama hesaplanmış ($\zeta_{MLD} = 0.7692$) ve eşik değer olarak hesaplanan bu değer seçilmiştir. Korelasyon haritasındaki tüm pikseller için yeniden değerleme yapılmış ve hesaplanan ortalamanın altındakiler 0'a, ortalamanın üstündeki tüm değerler 1'e çekilmiştir. Böylelikle Şekil 2-33'te sağdaki harita elde edilmiştir. Haritada değişiklik olan kısımlar, gölgeler, iki harita arasındaki farklar daha net biçimde görülebilmektedir.

2.3.6.2. Sansürlü Ortalama Seviye Algılayıcı

Sansürlü Ortalama Seviye Algılayıcı (Censored Mean Level Detector - CMLD) yöntemi MLD tespit yönteminin haritada belirlenen daha küçük bir alan üzerinden hesaplanarak tüm harita için uygulanmasıdır. Belirlenen bölgedeki değerlerin ortalaması Eşitlik 2.81'deki gibi hesaplanıp eşik kabul edilir [120].

$$\zeta_{CMLD} = \frac{1}{p_M . p_A} \sum_{i=1}^{p_M} \sum_{j=1}^{p_A} H_x(i,j) \qquad 2.81$$



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 2-34: Korelasyon Haritası ve CMLD ile Belirginleştirilmiş Versiyonları

Şekil 2-26'daki korelasyon haritası için sansürlü ortalama seviye algılayıcı (CMLD) kullanılarak değişikliğin olduğu kısımlar daha belirgin hale getirilmiştir. Şekil 2-34'te

hem korelasyon haritası (a) hem de sansürlü ortalama seviye detektöründen geçtikten sonraki versiyonları (b), (c) ve (d) verilmiştir.

Algoritmada ilk olarak korelasyon haritasındaki mavi pencere seçilerek bu pencere içerisine düşen değerlerin ortalama hesaplanmış ($\zeta_{CMLD} = 0.6273$) ve eşik değer olarak bu değer seçilmiştir. Korelasyon haritasındaki tüm pikseller için yeniden değerleme yapılmış ve hesaplanan ortalamanın altındakiler 0'a, ortalamanın üstündeki tüm değerler 1'e çekilmiştir. Böylelikle Şekil 2-34'teki (b) haritası elde edilmiştir. Aynı işlem yeşil pencere seçilerek yapıldığında ortalama değişmiştir ($\zeta_{CMLD} = 0.9003$). Yeni eşik değerine göre üretilen harita Şekil 2-34'te (c) görülmektedir. Son olarak kırmızı pencere seçilerek aynı işlem tekrar edilmiş ve ortalama hesaplanmış ($\zeta_{CMLD} = 0.8585$) ve eşik olarak bu değer seçilmiştir. Bu eşik değer kullanılarak Şekil 2-34'teki (d) haritası üretilmiştir.

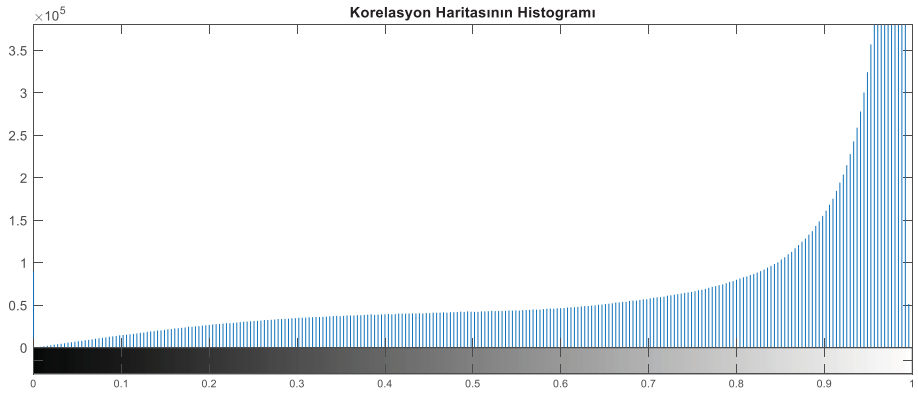
2.3.6.3. Sıralı İstatisik Uyum Algılayıcı

Sıralı İstatistik Uyum Algılayıcı (Ordered Statistics Coherence Detector – OSCD) yönteminde üretilen haritadaki değerler küçükten büyüğe sıralanır ve bir eşik değeri Eşitlik 2.82'deki gibi seçilerek bu değerin altındaki ve üstündeki pikseller değişiklik olan veya olmayan pikseller kabul edilir [121].

$$\zeta_{OSCD} = \gamma_{th} \tag{2.82}$$

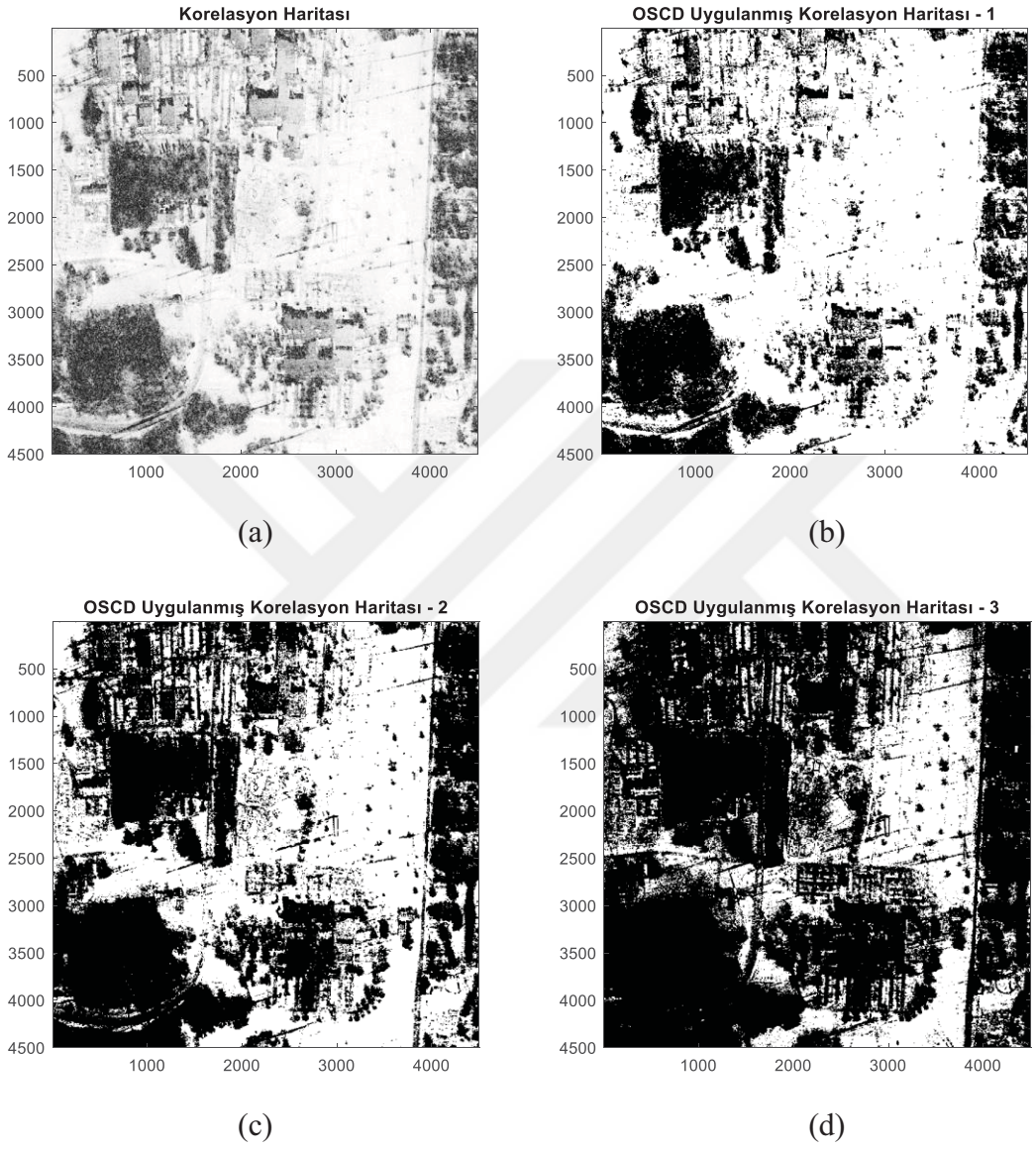
$$\gamma_1 \leq \gamma_2 \leq \gamma_3 \leq \cdots \leq \gamma_{(N_M x N_A)} \quad \text{ve} \quad \gamma_{th} \epsilon \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_{(N_M x N_A)}\}$$

Şekil 2-26'daki korelasyon haritasının ilk olarak histogramı çıkarılmıştır. Şekil 2-35'te histogram paylaşılmıştır.



Şekil 2-35: Korelasyon Haritasının Histogramı

Sıralı İstatistik Uyum Algılayıcı (OSCD) kullanılarak korelasyon haritasında değişikliğin olduğu kısımlar daha belirgin hale getirilmiştir. Şekil 2-36'da hem korelasyon haritası (a) hem de sıralı istatistik uyum algılayıcıdan geçtikten sonraki versiyonları (b), (c) ve (d) verilmiştir.



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 2-36: Korelasyon Haritası ve OSCD ile Belirginleştirilmiş Versiyonları

Algoritmada ilk olarak korelasyon haritasındaki değerler küçükten büyüğe sıralanmıştır. En küçük değer ($\gamma_1 = \gamma_{min} = 0$) ve en büyük değer ($\gamma_{(N_M x N_A)} = \gamma_{max} = 0.9990$) belirlenmiştir. Eşik değer olarak %30 belirlenmiş ($\gamma_{(N_M x N_A x 0.3)} = \zeta_{OSCD} = 0.7011$) ve korelasyon haritasındaki tüm pikseller için yeniden değerleme yapılmış ve belirlenen eşiğin altındaki değerler 0'a, üstündeki tüm değerler 1'e çekilmiştir. Böylelikle Şekil 2-36'daki (b) haritası elde edilmiştir. Oran %50 olarak değiştirilmiş ve aynı işlem

tekrarlanmıştır ($\gamma_{(N_M x N_A x 0.5)} = \zeta_{OSCD} = 0.8893$). Yeni eşik değerine göre üretilen harita Şekil 2-36'da (c) görülmektedir. Son olarak oran %70 seçilerek aynı işlemler tekrar edilmiştir. ($\gamma_{(N_M x N_A x 0.7)} = \zeta_{OSCD} = 0.9584$) ve eşik olarak bu değer seçilmiştir. Bu eşik değer kullanılarak Şekil 2-36'daki (d) haritası üretilmiştir.

Şekil 2-36'dan da görüleceği üzere eşik değer büyüdükçe eşik değerin altında kalan piksel sayısı fazla olmakta ve haritanın büyük çoğunluğu siyaha boyanmaktadır. Bu durum hata yapılma ihtimalini arttırmaktadır. Bu sebeple eşik dikkatli bir şekilde belirlenmelidir.

2.3.6.4. Sabit Yanlış Alarm Oranı Algılayıcı

Sabit Yanlış Alarm Oranı Algılayıcı (Constant False Alarm Rate – CFAR) yönteminde harita üzerinde belli boyutlarda kare bir pencere gezdirilerek, pencerenin içerisindeki değerlerden ortalama ve standart sapma hesaplanır. Daha sonra bu iki bilgi kullanılarak sabit yanlış alarm oranı tutturulacak şekilde bir eşik hesaplanır [122]. Böylelikle görüntü içerisinde gezdirilen tüm pencerelerde aynı yanlış alarm oranı yakalanmış olur.

$$\mu_{CFAR} = \frac{1}{p_{CFAR}^2} \sum_{i=1}^{p_{CFAR}} \sum_{j=1}^{p_{CFAR}} H_x(i,j) \tag{2.83}$$

$$\sigma_{CFAR} = \sqrt{\frac{1}{p_{CFAR}^2} \sum_{i=1}^{p_{CFAR}} \sum_{j=1}^{p_{CFAR}} (H_x(i,j) - \mu_{CFAR})^2} \tag{2.84}$$

Kare pencere içerisindeki değerler kullanılarak Eşitlik 2.83 ve Eşitlik 2.84'teki gibi ortalama ve standart sapma hesaplanır. Kullanılacak eşik (ζ_{CFAR}) ve eşik ölçek katsayısı ($k_{p_{FA}}$) Eşitlik 2.85 ve Eşitlik 2.86'daki gibi belirlenir.

$$\zeta_{CFAR} = \mu_{CFAR} + (\sigma_{CFAR} k_{p_{FA}}) \tag{2.85}$$

$$k_{p_{FA}} = \sqrt{2}.\, erfcinv(2p_{FA}) \tag{2.86}$$

2.3.7. Katlı Faz Açma

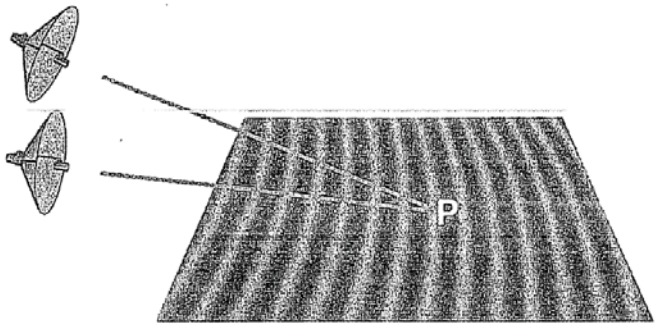
Aktif uzaktan algılamada bir kaynak tarafından belirli bir frekansta üretilen sinyaller gönderilir ve aydınlatılan bölgeden yansıyan / geri saçılan sinyaller alıcı tarafından toplanır [123]. Burada alınan sinyalin fazı, yansıdığı noktanın uzaklığına ve gönderilen sinyalin frekansına göre değişmektedir (Bkz. Şekil 2-37). Ancak uzaklık her ne olursa olsun alıcıda okunan faz değeri ($-\pi$) ile ($+\pi$) aralığında olmaktadır. Bu sebeple farklı uzaklıklardaki bölgelerden yansıyan sinyallerin alıcıda okunan fazları aynı olabilmektedir çünkü faz bilgisinde katlanmalar olmaktadır ve bu bazı belirsizliklere yol açmaktadır.

$$\varphi^{uw} = \varphi^{w} \pm 2\pi n \qquad 2.87$$

Eşitlik 2.87'de φ^{uw} değişkeni katlı fazı açılmış kesin faz değerini gösterirken, φ^{w} ise katlı fazı (alıcıda okunan faz değerini) temsil etmektedir. Katlı fazın açılması işlemi; alıcıda okunan faza eklenen veya alıcıda okunan fazdan çıkarılmış olan n adet 2π değerindeki faz bilgisinin tahmin edilerek kesin faz değerinin (φ^{uw}) belirlenmesi işlemidir. Bu sebeple, katlı fazı açma işlemi doğruluğu referans harita değerlerine bakılarak ve/veya koordinatları yüksek doğrulukla bilinen yer kontrol noktaları referans olarak alınarak hesaplanmaktadır.

Şekil 2-37'ye dikkatle bakıldığında örgelerin doğrusal olmadığı, yay şeklinde oldukları görülmektedir. Bu durum hem menzilde hem de çapraz menzilde uzaklık farkının değişmesinden kaynaklanmaktadır.

Karmaşık yapısı ve pek çok tahmin alternatifine açık olması sebebiyle katlı fazın açılması problemi için birçok araştırma yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir. Bu sebeple literatürde konuyla ilintili yayınlara rağmen katlı faz açma probleminin halen araştırılmaya açık bir konu olduğu söylenebilir.



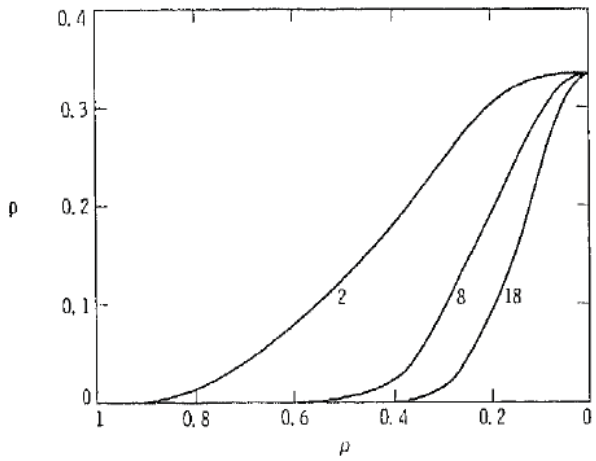
Şekil 2-37: İki Radar Antenin Yerdeki Aynı Noktaya Uzaklıkları [43]

Hızlı Fourier Dönüşümleri (FFT) gibi birçok iki boyutlu sinyal işleme operasyonundan farklı olarak; iki boyutlu katlı fazın açılması problemi önce kolonların sonra satırların tek boyutta ve sırasıyla operasyona sokulması gibi parçalanamamaktadır [5]. Bundan dolayıdır ki iki boyutlu katlı fazın açılması işleminin iki boyutta birden çözüme ulaştırılması gerekmektedir.

Veri içerisindeki gürültüden kaynaklanan lokal faz ölçüm hatası ve ters görüntüleme etkisinden dolayı oluşan gerçek kopukluklar süreksizliklerin oluşmasının ana sebepleridir. İnterferogramdan faz ölçümündeki gürültünün üç ana kaynağı bulunmaktadır [12].

- Alıcıdaki termal gürültü: Görüntüde her zaman gölgede kalan alanlar bulunacaktır ve bu alanlardaki sinyal-gürültü oranı oldukça düşüktür.
- Benek (Speckle) Etkisi
- Anten Etkisi: İki anten aynı anda tamamen aynı noktada bulunamayacağı için, çözünürlük değeri de her görüntüde birbirinin aynısı olamayacaktır. Burada faz gürültüsü radarın bant genişliğine, görüntü geometrisine ve antenlerin ayrıklığına bağlıdır.

Ayrıca korelasyon katsayısının artması ve görüntüleme sayısının değişmesi süreksizlik sayısını değiştirmektedir. Şekil 2-38'den de görüleceği üzere korelasyon katsayısındaki (ρ) artış süreksizlik oranını düşürmektedir. Aynı şekilde görüntüleme sayısındaki artış da süreksizlik oranında düşüşe sebep olmaktadır. Aynı korelasyon katsayısında farklı görüntüleme sayıları için grafik üzerinden takip edilecek olursa bu düşüş net bir şekilde gözlemlenebilecektir.



Şekil 2-38: Süreksizlik – Korelasyan Katsayısı / Görüntüleme Sayısı Grafiği [12]

2.3.7.1. Katlı Faz Açma Probleminde Genel Kabuller ve Nyquist Teoremi

Katlı fazın açılması probleminde önemli noktaların başında Nyquist örnekleme kriterinin görüntünün tamamında sağlandığı ön kabulü gelmektedir. Böylelikle uzaysal (spatial) örnekleme oranının kompleks interferogramın tamamında yeterli seviyede (nyquist) olması beklenecektir. Özetle interferogramın tamamında komşu piksel değerleri arasındaki faz farkı en fazla yarım döngü (π rad) kadar olacaktır [53], [54]. Bu ön kabul katlı fazın açılması problemindeki en temel prensiptir.

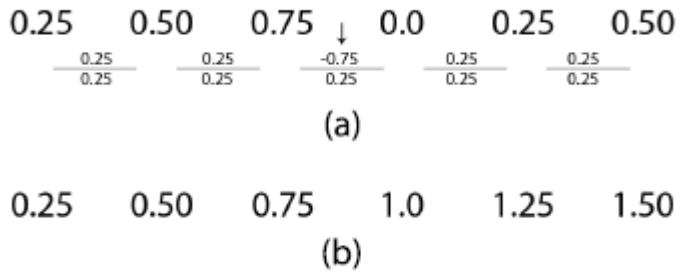
Bahsi geçen ön kabul interferogramın tamamında karşılık bulacaktır, ancak bazı komşu pikseller arasındaki fark yarım döngüden (π rad) fazla olacak ve bu noktalarda süreksizlik (discontinuity) oluşacaktır. Bunların oluşmasında birbirinden bağımsız üç sebep mevcuttur:

- Faz Gürültüsü
- Spektral Katlanma (Aliasing)
- Dik Arazi Açısı

Tekrarlı geçiş ile yapılan interferometrik uygulamalarda geçici ve geometrik dekorelasyondan kaynaklı düşük sinyal-gürültü oranı (SNR) değerlerinde (~0 dB) çalışılmaktadır. Genel olarak, süreksizlik sayısı lokal topoğrafyanın, nadir açısının, normal baz uzaklığın ve ilintisizlik (decorrelation) gürültüsünün bir fonksiyonudur [42].

2.3.7.2. Bir Boyutta Katlı Faz Açma

Bir boyutta katlı fazın açılması işlemi, Nyquist kriterinin ve katlı fazın açılması probleminin en basit hali ile anlaşılması açısından güzel bir örnektir.



Şekil 2-39: Bir Boyutlu Katlı / Açılmış Faz Örnekleri

Şekil 2-39'da ilk dizideki (a) faz değerleri arasındaki fark ilk iki tanesinde (0.25) iken üçüncüde bu fark (-0.75) olmuştur. Bu değer Nyquist örnekleme kriterine göre yarım döngüden (yarım döngü bu örnek için 0.5 olmaktadır) daha büyüktür. Bu sebeple burada bir süreksizlik mevcuttur ve bu süreksizliğin giderilmesi ve tüm dizide Nyquist kriterinin sağlanabilmesi için dizideki dört, beş ve altıncı değerlere bir tam döngü kadar (tam döngü 1 olmaktadır) ekleme yapılmasıyla katlı faz açılacaktır. Katlı fazı açılmış ikinci dizide (b) tüm piksel değerleri arasındaki farkın Nyquist kriterine uygun bir hale geldiği görülmektedir.

Tek boyutlu katlı faz problemi her zaman bu kadar kolay çözülebilir bir problem olmayabilir. Bir boyutlu katlı fazın açılması için Itoh Metodu [44] kullanılmaktadır.

Itoh Metodu algoritması 4 adımdan oluşmaktadır.

- Faz farkı hesaplanması
- Katlı faz farkının hesaplanması
- Başlangıç açılmış faz değerinin belirlenmesi
- Katlı faz farkının toplanarak fazın açılması

Katlı fazın açılmasında Nyquist kriteri çok büyük önem arz etmektedir. Kriterin önemi tek boyutta katlanmış fazın açılmasında çok net bir şekilde görülmektedir.

Itoh metodu kullanılarak açılmış katlı fazlarda spektral katlanmanın (phase aliasing) etkisini incelemek için Eşitlik 2.88'de verilen fonksiyon seçilmiş ve farklı örnek sayıları ile katlı fazın açılması problemi incelenmiştir.

$$\varphi = 10sin\,(10t) \tag{2.88}$$

$$0 \leq t \leq 1\,, \Delta t = 1/N$$

Fazdaki değişimi bulmak için Eşitlik 2.88'in türevi alınır ve Eşitlik 2.89 elde edilir.

$$\dot{\varphi} = 100cos\,(10t) \tag{2.89}$$

$$\Delta\varphi = \dot{\varphi}\Delta t \tag{2.90}$$

Eşitlik 2.90, Nyquist kısıtlamasından dolayı Eşitlik 2.91 gibi ifade edilecektir.

$$|\Delta\varphi| < \pi \tag{2.91}$$

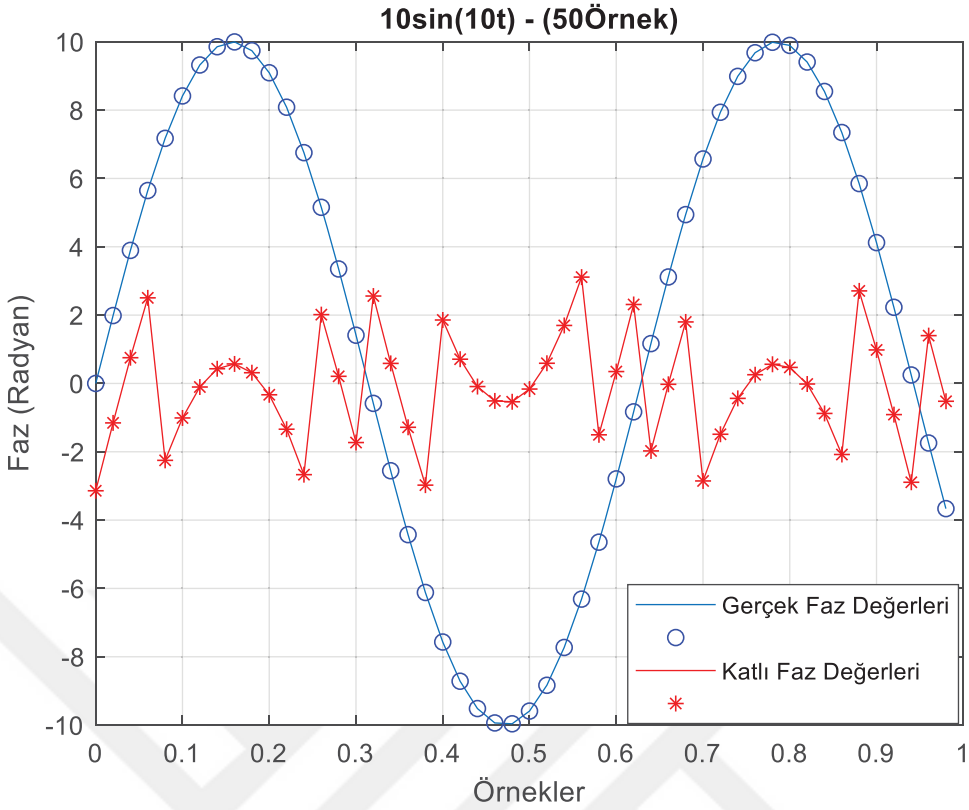
Eşitlik 2.91 ise Eşitlik 2.92 gibi yazılabilir.

$$\left|\frac{100}{N} cos\ (10t)\right| < \pi \qquad 2.92$$

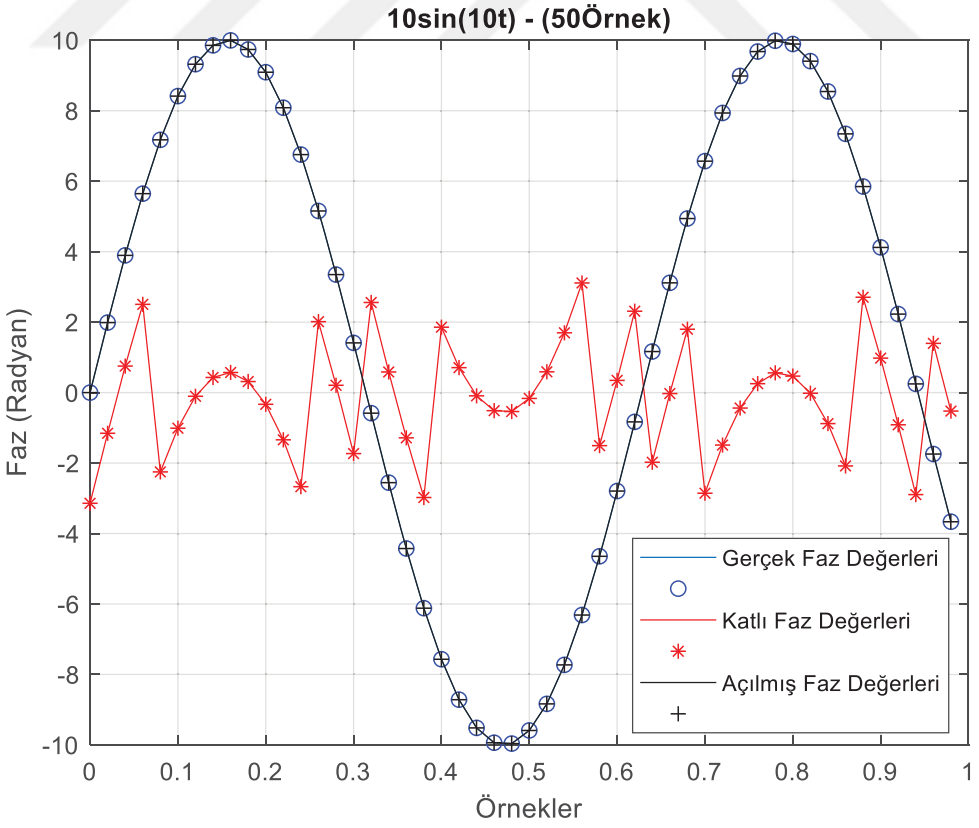
Sonuç olarak Eşitlik 2.93 elde edilecektir.

$$N > \frac{100}{\pi} \approx 31.83 \qquad 2.93$$

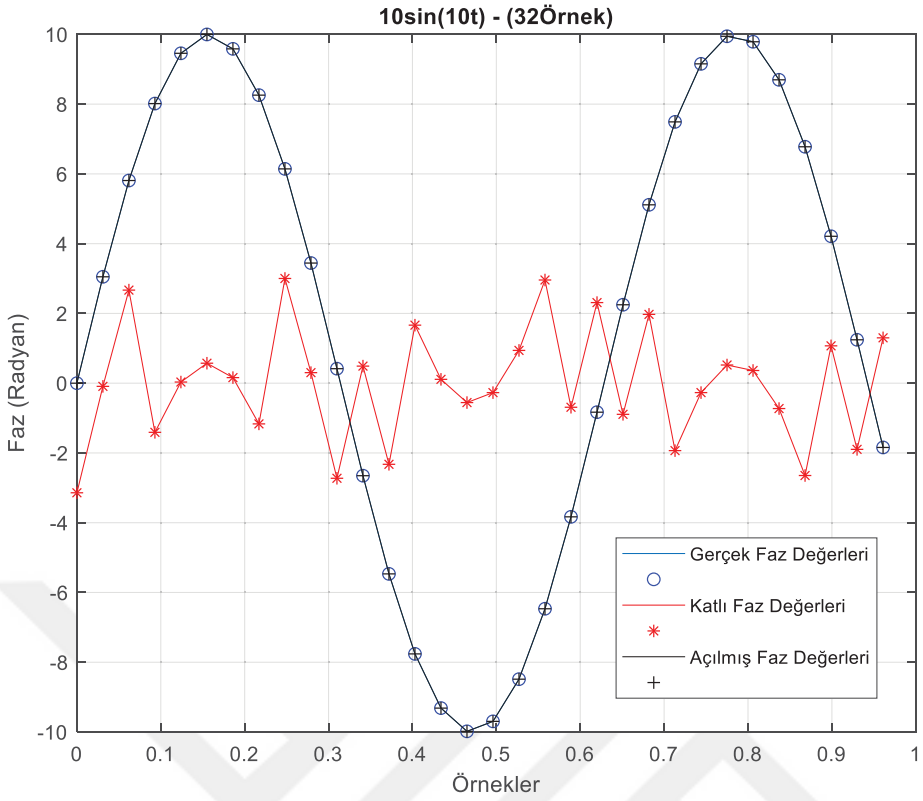
Eşitlik 2.88'de verilen fonksiyonun en düşük kaç örnek ile ifade edildiği durumda katlı fazının açılabileceğini Eşitlik 2.93 söylemektedir. Bunun için ilk olarak Eşitlik 2.88'de verilen fonksiyon Şekil 2-40'da çizdirilmiştir. Gerçek faz değerleri mavi renkte ve daire (^{O}) şeklinde çizdirilmiştir. Katlı faz değerleri kırmızı renkte ve yıldız (*) şeklinde çizdirilmiştir. Şekil 2-41'de ise katlı faz açıldıktan sonra açılmış faz değerleri siyah renkte ve artı ($^{+}$) şeklinde çizdirilmiştir. Şekil 2-41'den görüldüğü üzere örnek sayısı Eşitlik 2.93'te verilen en düşük değerden daha fazla olduğu için katlı faz doğru bir şekilde açılabilmiştir. Şekil 2-42'de örnek sayısı sınırdan da olsa Eşitlik 2.93'te verilen en düşük değerden daha fazladır ve katlı faz doğru bir şekilde açılabilmiştir. Ancak Şekil 2-43'teki örnek sayısı katlı fazın doğru açılması için gereken minimum değerden daha düşüktür ve Şekil 2-43'ten de görüleceği üzere katlı faz hatalı açılmıştır.



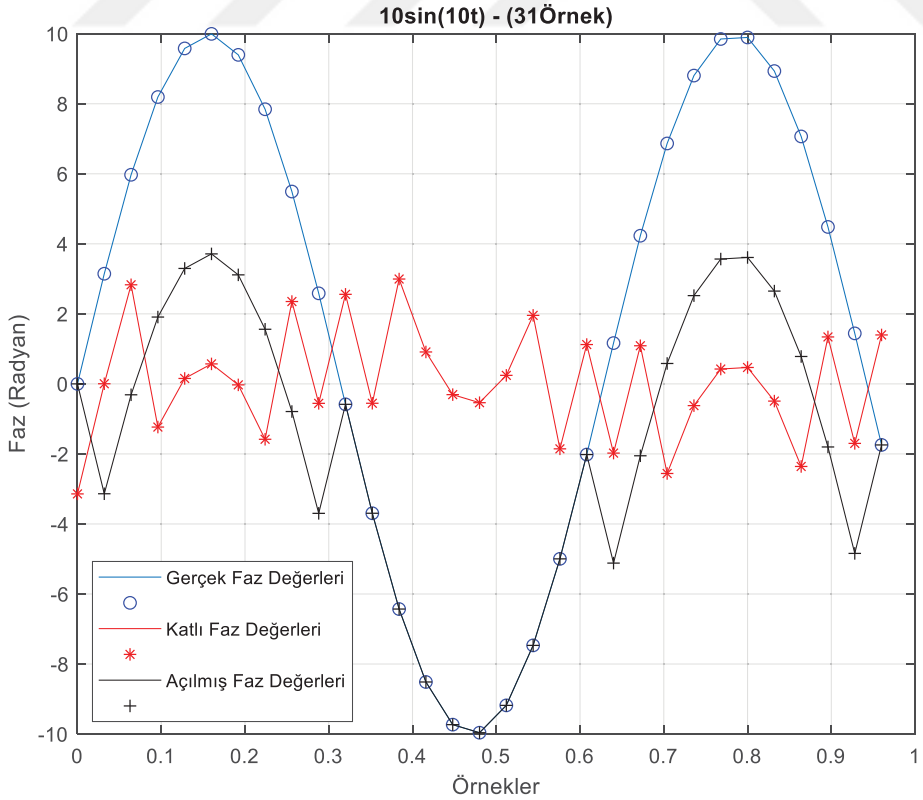
Şekil 2-40: Eşitlik 2.88 Gerçek (Mavi) ve Katlı (Kırmızı) Faz Değerleri (50 Örnek)



Şekil 2-41: Gerçek (Mavi), Katlı (Kırmızı) ve Açılmış (Siyah) Faz Değerleri (50 Örnek)



Şekil 2-42: Gerçek (Mavi), Katlı (Kırmızı) ve Açılmış (Siyah) Faz Değerleri (32 Örnek)



Şekil 2-43: Gerçek (Mavi), Katlı (Kırmızı) ve Açılmış (Siyah) Faz Değerleri (31 Örnek)

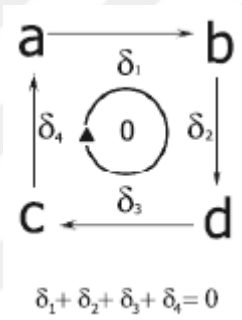
2.3.7.3. İki Boyutta Katlı Faz Açma

Bir noktadan başka bir noktaya entegrasyon eğer yol bağımlı değilse bu vektör alanı (φ) korunumludur (conservative) ve bu dönmesiz alan (irrotational field) için hesaplanan dolam (curl) değeri sıfıra eşittir [54].

$$\nabla x \nabla \varphi = 0 \qquad 2.94$$

Doğru faz değeri olan φ bilinmemektedir. Bu değer, katlı faz değerleri arasındaki farka bakılarak tahmin edilecektir [6].

Şekil 2-44'teki δ değerleri faz gradientlerini (değişim ölçüsü) göstermektedir. Saat yönünde bu gradientlerin toplamının sıfır değerini vermesi beklenmektedir. Bu işlemin matematiksel açıklaması Eşitlik 2.97'de verilmiştir.



Şekil 2-44: Dolamsız Alan [54]

İnterferogramın tamamındaki piksellerde yer alan katlı faz (φ^w) farkları menzil yönünde Eşitlik 2.95 ve azimut yönünde Eşitlik 2.96'daki gibi hesaplanır.

$$\Delta\varphi_{i,j}^{w,(M)} = \mathrm{W}\{\varphi_{i+1,j}^{w} - \varphi_{i,j}^{w}\} \quad i = 0, \dots, N_M - 2; \quad j = 0, \dots, N_A - 1 \qquad 2.95$$

$$\Delta\varphi_{i,j}^{w,(A)} = \mathrm{W}\{\varphi_{i,j+1}^{w} - \varphi_{i,j}^{w}\} \quad i = 0, \dots, N_M - 1; \quad j = 0, \dots, N_A - 2 \qquad 2.96$$

Kalıntılar ise Eşitlik 2.97'deki gibi hesaplanacaktır.

$$k_{i,j} = \Delta\varphi_{i,j}^{w,(A)} + \Delta\varphi_{i,j+1}^{w,(M)} - \Delta\varphi_{i+1,j}^{w,(A)} - \Delta\varphi_{i,j}^{w,(M)} \qquad 2.97$$

$$i = 0, \dots, N_M - 1; \quad j = 0, \dots, N_A - 1$$

Eşitlik 2.97'deki *k* terimi kalıntı (residue) olarak adlandırılır ve bu terim yalnızca sıfır (0), bir (1), eksi bir (-1) gibi üç değer alabilir [12]. İnterferogramın çok büyük kısmında bu

değer beklenildiği üzere 0 olsa da bazı noktalarda 1 ve -1 değerlerini alacaktır. Sıfırdan farklı değerler için literatürde kullanılan terim kalıntıdır (residue). Katlı faz görüntüsünde kalıntı değerlerinin olması gürültünün veya alt-örneklemenin (undersampling) ve pürüzsüzlük (smoothness) durumundaki tutarsızlığın bir göstergesidir [6]. Katlı fazın açılması işlemi bahsi geçen bu kalıntı değerlerin olduğu bölgeler takip edilerek yapılacaktır. Bu sebeple katlı faza açma işleminin ilk adımı olarak interferogram üzerindeki tüm piksellerin faz değerleri kullanılarak kalıntı haritası oluşturulmalıdır. Kalıntı değeri sayısı, katlı faz adımının karmaşıklığını belirleyeceği için mümkün mertebe kalıntı sayısını makul rakamlarda tutmak gerekmektedir. Bunun için yapılması gereken ve yine literatürde sıklıkla bahsedilen öneri ise katlı faz açma adımına başlamadan önce interferogramın filtrelenmesi işlemidir.

2.3.7.4. İki Boyutta Katlı Faz Açma Algoritmaları

İnterferometrik SAR uygulamalarında kullanılan katlı fazı açma işlemi, fazda spektral katlanma, düşük sinyal-gürültü oranı (SNR), gölgede kalan aydınlatılamayan bölgeler ve ters görüntüleme gibi birçok faktörden dolayı zor bir adımdır. Çözümü zor bir problem olmasından kaynaklı olarak birçok farklı yöntem ile çözüm aranmıştır. Bu yöntemlerden bazıları detaylı olarak analiz edilmiştir.

Eşitlik 2.94'e bakılacak olursa denklem içerisinde iki bilinmeyen vardır. Bu sebeple katlanmış fazın açılması için sadece Eşitlik 2.94'ü kullanarak tek bir çözüm elde etmek mümkün değildir. Başka bir deyişle açılmış faz için birden fazla çözüm mevcuttur. Tek (unique) ve doğru bir açılmış faz sonucu elde edebilmek için bazı varsayımlar yapmak veya ek bilgiler kullanmak gerekmektedir [43].

Katlanmış fazın açılmasına yönelik olarak geliştirilen algoritmalar literatürde birçok açıdan sınıflandırılmıştır. Mark Richards InSAR tekniği için yazdığı rehber niteliğindeki makalesinde [5] dört ana başlık altında toplarken, Ghiglia ve Pritt ise kitaplarında iki parçaya ayırmışlarıdır [44]. Daha sonraki yıllarda eklenen yeni yöntemlerle beraber son yayınlar da incelendiğinde katlanmış fazın açılması problemi en temelde üç ana başlık altında toplanabilir [43].

1. Tek Baz Uzaklıklı Katlı Fazı Açma Yöntemleri (Single Baseline PU)
2. Çoklu Baz Uzaklıklı Katlı Fazı Açma Yöntemleri (Multi Baseline PU)
3. Geniş Alanlar için Katlı Fazı Açma Yöntemleri (Large Scale PU)

Çizelge 2-3: Katlı Faz Açma Yöntemleri Tasnifi [123]

<table>
<tr><td rowspan="8">KATLI FAZ AÇMA TEKNİKLERİ
(PHASE UNWRAPPING TECHNIQUES)</td><td rowspan="6">Tek Baz Uzaklıklı KFA
(Single Baseline PU)</td><td rowspan="4">Yol İzleme Metotları
(Path Following Methods)</td><td>Goldstein Branch Cut</td></tr>
<tr><td>Rehber Harita (Quality Guided)</td></tr>
<tr><td>Mask Cut</td></tr>
<tr><td>Flynn En Küçük Süreksizlik Yaklaşımı</td></tr>
<tr><td rowspan="3">En Küçük Kareler Metotları
(Least Square Methods)</td><td>Ağırlıklandırılmamış En Küçük Kareler</td></tr>
<tr><td>Ağırlıklandırılmış En Küçük Kareler</td></tr>
<tr><td>En Küçük Lp Norm</td></tr>
<tr><td colspan="2">Ağ Akışı Metotu
(Network Flow Method)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Entegre Gürültü Filtreleme ve Faz Açma Metotu
(Integrated Denoising and Unwrapping Method)</td></tr>
<tr><td colspan="3">Çok Baz Uzaklıklı KFA
(Multi Baseline PU)</td></tr>
<tr><td colspan="3">Geniş Alanlar İçin KFA
(Large Scale PU)</td></tr>
</table>

2.3.7.4.1. Tek Baz Uzaklıklı Katlı Faz Açma Algoritmaları

Literatürde yer alan ve genel olarak bilinen yöntemler tek baz uzaklıklı katlı fazın açılması yöntemleridir. Tek Baz Uzaklıklı Katlanmış Fazı Açma problemini en genel formül ile matematiksel olarak açıklamak gerekirse; tüm katlı fazı açma algoritmaları Eşitlik 2.98'de verilen maliyet fonksiyonunu minimize etmeye çalışmaktadırlar [42].

$$c = \sum_{i=1}^{N_M}\sum_{j=1}^{N_A} w_{i,j}^{M} \left|\Delta\varphi_{i,j}^{uw,(M)} - \Delta\varphi_{i,j}^{w,(M)}\right|^{p_u} + \sum_{i=1}^{N_M}\sum_{j=1}^{N_A} w_{i,j}^{A} \left|\Delta\varphi_{i,j}^{uw,(A)} - \Delta\varphi_{i,j}^{w,(A)}\right|^{p_u} \qquad 2.98$$

$$0 \le p_u \le 2$$

$w_{i,j}^{M}$ ve $w_{i,j}^{A}$ ağırlıklandırma katsayılarıdır.

Eşitlik 2.98,

- p_u = 0 ise Yol-İzleme Tabanlı Yöntemlere
- p_u = 1 ise Ağ Akışı Tabanlı Yöntemlere
- p_u = 2 ise En Küçük Kareler Tabanlı Yöntemlere

  dönüşecektir.

2.3.7.4.1.1. Yol İzleme Tabanlı Yöntemler

İnterferogramdaki bir pikselden başlayarak piksel piksel ilerleyip katlı fazın açılması işleminde bulunan sonuçlar gidilen yola göre değişebilmektedir. Eğer katlı fazı açılan bölgede herhangi bir ani yükselme veya kırılma yoksa (kalıntı içermiyorsa) yol bağımsız bir şekilde bulunan tüm açılmış faz sonuçları aynı değerde olacaktır. Ancak gerçek hayatta bu durum pek mümkün değildir. SAR görüntülerinde fazı açarken izlenen yol kritik bir öneme sahiptir ve fazın açılması izlenen yola bağımlıdır. Sonuç olarak izlenen yola göre bulunan sonuçlar değişmektedir. Bunun sebebi ise görüntü içerisinde fazın tahmin edilenden daha fazla atladığı ya da hiç katlanmadığı durumların faz açılırken bilinememesinden kaynaklanmaktadır. Ancak bu bölgelerdeki faz kalıntılarına (residue) bakılarak yol bağımlı bir şekilde katlı faz açılabilir. Bulunan kalıntılar pozitif ve negatif olarak ikiye ayrılır. Eş sayıda kalıntı birleştirilerek bariyerler (branch-cut veya mask-cut) oluşturulur ve katlı faz açılırken bu bariyerlerden geçmeyecek şekilde bir yol izlenmesine izin verilir. Böylelikle fazı açarken izlenen yola bir kısıt getirilmiş olur ve görüntülenen bölgedeki hızlı yükselmelerin veya bina gibi insan yapılarının katlı fazının doğru bir şekilde açılması sağlanır. Burada en önemli ve en kritik nokta ise bulunan kalıntıların nasıl bir kombinasyonla birleştirilerek bariyerlerin oluşturulacağıdır. Bununla ilgili olarak ilk çalışmayı, Goldstein ve arkadaşlarının çalışmasında [12] görüyoruz.

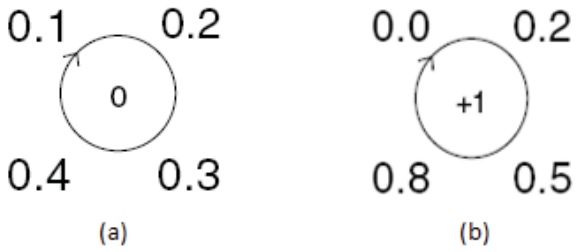
Fazı açarken izlenecek yolları belirlemede kalite haritası kullanmak da ayrı bir seçenektir. Korelasyon veya sözde korelasyon haritaları gibi haritalar kalite haritası olarak kullanılabilir. Bunlar sayesinde fazı açarken izlenecek yol belirlenir.

Kalite haritaları ile branch-cut engellerini hibrit bir şekilde kullanarak üretilen maskeler de üçüncü bir yol izleme yöntemidir.

Son olarak Flynn'in kopuklukları minimize ettiği ve branch-cut'lara benzeyen yaklaşımı da yol izleme yöntemine dayalı bir katlı faz açma algoritmasıdır.

2.3.7.4.1.1.1. Goldstein Branch Cut Algoritması

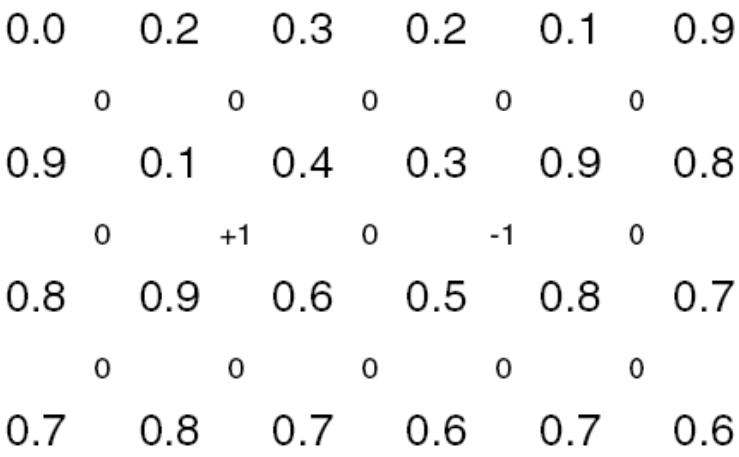
Goldstein Branch Cut yöntemi ile katlı fazın açılması işleminde izlenecek yolun kısıtlanması ve bu sayede fazın doğru açılabilmesi için bazı engellerin / bariyerlerin / branch-cut'ların olması gerekmektedir. Branch-cut'lar ise interferogramdaki komşu 4 pikselin faz farklarının saat yönünün tersine toplanması ile oluşabilen kalıntıların birleştirilmesi ile oluşturulur. Kalıntılar, Şekil 2-45'te olduğu gibi saat yönünün tersine olacak şekilde faz farklarının toplamı ile bulunur.



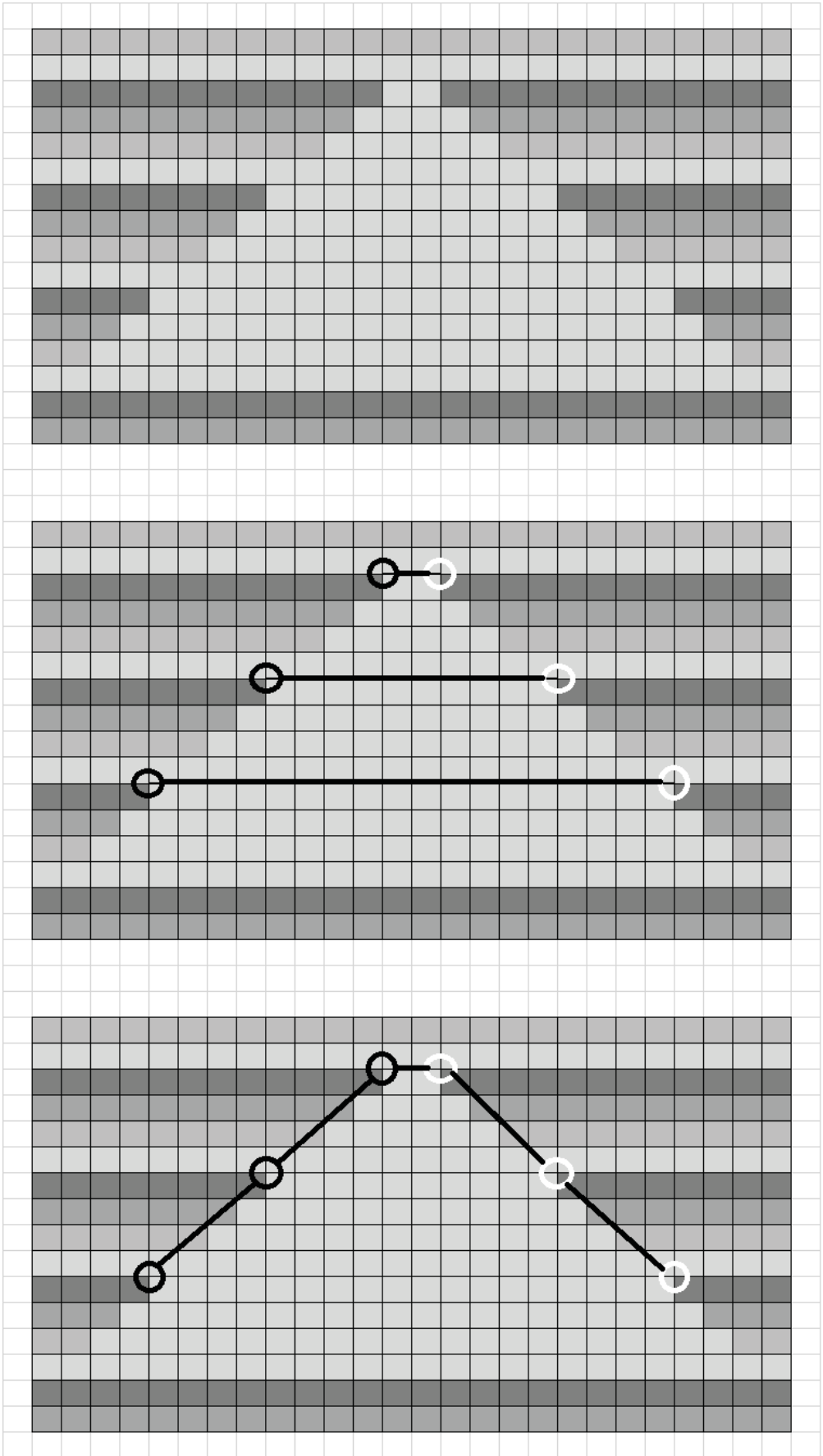
Şekil 2-45: Kalıntı Hesabı

- (a) : (0.1) + (0.1) + (0.1) + (-0.3) = 0
- (b) : (0.2) + (0.3) + (0.3) + (0.2) = 1

İnterferogramdaki dört komşu pikselin faz değerlerinin arasındaki farklar kullanarak ilgili dört piksel için kalıntı değeri hesaplanıp ortaya yazılmıştır. Daha önce de bahsedildiği gibi interferogramın tamamı için bu işlem yapıldığı takdirde çok büyük bir oranda bu değer sıfır olarak hesaplanacaktır. Ancak yol izleme yöntemi +1 ve -1 değerleri üzerinden takip edilecektir. Goldstein yöntemi gibi branch-cut benzeri engeller oluşturan başka yöntemler de literatürde mevcuttur. Pozitif ve negatif kalıntıları en kısa ikililer şeklinde birleştiren ve bunu yaparken en yakın komşuluk algoritmasını ya da grafik teorisi yaklaşımını kullanan metotlar vardır. Ancak Goldstein algoritması, bir pozitif ve bir negatif kalıntıyı birleştirerek sadece iki kalıntıdan oluşan branch-cut'lardan ziyade birçok kalıntıyı içeren daha uzun ama daha anlamlı branch-cut kümeleri (clump) oluşturmayı da sağlamaktadır. Bu yönüyle diğer kalıntı kullanan algoritmalardan ayrılabilmektedir.



Şekil 2-46: Örnek (Katlı) Faz Değerleri



Şekil 2-47: Branch-cut Oluşturmada En Yakın Kalıntı ve Optimum Oluşum Senaryoları

Algoritmanın daha iyi anlaşılabilmesi açısından interferogramdaki 24 piksel için faz değerleri 0 ve 1 arasına normalize edilerek verilmiştir ve yol izleme yöntemi kullanılarak katlı fazın nasıl açıldığı bu örnek üzerinden sonuca ulaştırılmıştır [53].

Goldstein Branch Cut algoritması adım adım incelendiğinde [8], [12], [53], [54];

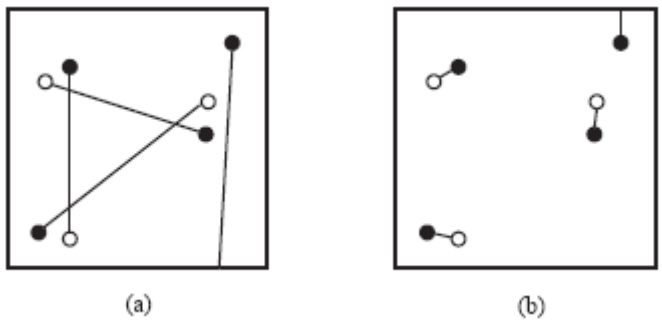
1. İnterferogramdaki her pikseldeki faz değerleri kullanılarak yukarıda bahsedildiği şekilde kalıntı değerler hesaplanır. Kalıntı haritası (Residue Map) çıkarılır.
2. Daha sonra bu değerler üzerinden interferogram üzerinde piksel piksel gezilerek kalıntılar bulunmaya çalışılır.
3. Sıfırdan farklı ilk değer yani kalıntı bulunduğunda 3x3'lük bir kutu bu kalıntı etrafında gezdirilir ve o kutu içerisinde yeni bir sıfırdan farklı değer yani kalıntı var mı ona bakılır.
4. Eğer sıfırdan farklı bir kalıntı varsa ve
    a. Bu kalıntı ilk bulunan kalıntıdan farklı işaretliyse
        i. İki kalıntı birleştirilir (uncharged) ve bağlantı burada sonlandırılır. Branch-cut oluşturulmuştur.
        ii. Daha sonra ilk sıfırdan farklı kalıntının bulunduğu pikselden (Adım 3) yeni bir kalıntı aramaya devam edilir.
    b. Bu kalıntı ilk bulunan kalıntı ile aynı işaretliyse bu kez ikinci bulunan kalıntı etrafında 3x3'lük bir kutu gezdirilir ve birbirine bağlanarak ilerleyen kalıntıların yük durumu sıfır oluncaya kadar algoritma devam ettirilir. Oluşturulan ağaç üzerinde negatif ve pozitif kalıntı sayısı eşit olduğu anda bağlantı sonlandırılır.
5. Eğer sıfırdan farklı bir kalıntı yoksa, kutu büyüklüğü iki katına çıkarılarak 3. adımdan itibaren tekrar aramaya devam ederek uygulanır ve branch-cut'lar oluşturulur.
6. Bazı durumlarda ise branch-cut'lar en yakın görüntü sınırına birleştirilerek topraklanır.
    a. Hiçbir kalıntı ile birleşemeyerek boşta duran kalıntı varsa,
    b. Birleştirilen kalıntıların toplam yükü sıfır olmadıysa,
    c. Kalıntı etrafında açılan kutu görüntü sınırlarına geldiyse

    İlgili branch-cut en yakın görüntü sınırına birleştirilir.

7. Kalıntı haritasındaki tüm kalıntılar kullanılarak branch-cut'lar oluşturulduktan sonra
    a. İlk olarak otomatik ya da kullanıcı tarafından branch-cut pikseli olmayacak şekilde başlangıç pikseli belirlenir.
    b. Seçilen ilk pikselden itibaren ilk komşu 4 pikselinin katlı fazı açılır. Daha sonra bu 4 pikselin komşu 4 pikselinin fazı açılır. Bu işlem branch-cut pikseli olmayan tüm pikseller için yapılır.
    c. Son olarak branch-cut piksellerinin de fazı açılarak görüntünün tamamında katlı fazı açma işlemi tamamlanmış olur.

Goldstein Branch Cut yol izleme metodunda algoritma bu şekilde uygulanmaktadır ve çıkan sonuçlarda kalıntılar birbirinden dağınık durumdaysa, birbirine bağlanmış ağaçsı bir yapıda olacaklardır ve her dal üzerinde eşit sayıda pozitif ve negatif değerde kalıntı bulunacaktır ancak kalıntılar çok yoğunsa bağlantılar da çok fazla olacaktır ve algoritma çıkmaza girecektir ("gives up").

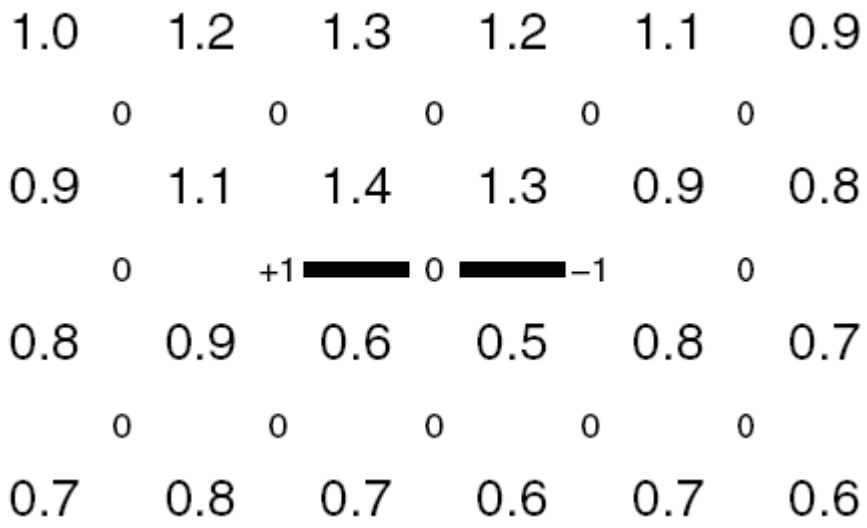
Ayrıca; hiçbir bağlantı (branch-cut) Şekil 2-48 (a) kısmındaki gibi birbirinin üzerinden geçmeyecek, kesişim olmayacak ve böylelikle kapalı alanlar (holes) oluşmayacaktır.



Şekil 2-48: Kalıntı Birleşimleri (a) Yanlış (b) Doğru [124]

Goldstein Branch Cut Yol İzleme Katlı Fazı Açma Algoritmasında kalıntıların birleştirilerek branch-cut'lar oluşturulurken mümkün olan en yakın farklı polaritedeki kalıntılar birleştirilmeye çalışılır. Algoritma faz değerlerinin kalitesine bakmaksızın yakın komşulukları dikkate alarak kalıntıları birleştirir ve branch-cut'ları oluşturur.

Algoritma kullanılarak Şekil 2-46'daki katlanmış faz açıldığında Şekil 2-49'daki gibi olacaktır. Burada farklı işaretli iki kalıntının birbirine bağlanması kalın siyah çizgi ile gösterilmiştir.



Şekil 2-49: Katlı Fazı Açılmış Piksel Değerleri

Algoritma her zaman interferogramın tamamı için bir çözüm üretememektedir. Uyumun düşük olduğu bölgelerde birbirine çok yakın bağlantılar oluşabilmektedir ve bunun sonucu olarak da bazı hatalı çukurlar (holes) oluşabilmektedir. Oluşan bu hataları engellemek için algoritmaya bir ön adım eklenebilir. Bu ön adım aslında bir çeşit filtreleme adımıdır. Özellikle SNR değerinin düşük yani gürültünün fazla olduğu SAR görüntülerinde olmaması gereken yerlerde kalıntıların oluştuğu görülmektedir. Bu ek kalıntılar yanlış branch-cut'ların oluşmasına ve bazı bölgelerin tamamen faz açma işleminden mahrum kalmasına sebep olmaktadırlar. Bu sebeple interferogram üzerinden tüm kalıntılar hesaplandıktan sonra birbirine komşu olan farklı polaritedeki kalıntılar branch-cut yapılarak sonlandırılır ve daha uzun branch-cut'lar kurmalarına izin verilmez. Böylelikle 2 piksel uzunluğundan birçok branch-cut oluşur. İzole bölgeler oluşması engellenmiş olur ve katlı fazı açma adımının hata miktarı düşürülür.

2.3.7.4.1.1.2. Kalite Rehberi Algoritması

Goldstein yönteminden farklı olarak Kalite Rehberi (Quality Guided) yönteminde fazı açarken izlenecek yolun belirlenmesinde Goldstein yöntemindeki gibi rastgele belirlenmiş bir noktadan fazı açıp izlenecek yol için kısıtlar/bariyerler koymak yerine bu yolun belli bir kalite metriğine göre belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bunun için fazı açılacak interferogramı oluştururken kullanılan SAR görüntü çiftinden üretilen rehber niteliğinde bir kalite haritasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu harita sayesinde hangi pikselden faz açılmaya başlanacağı ve nasıl bir yol izleneceği belirlenecektir. SAR görüntü çiftinden üretilen bu haritadaki kalite metriğine göre en yüksek değerdeki

pikselden başlayarak en düşük değerdeki piksele kadar tüm fazlar sırayla açılacaktır. Bu sayede ilk olarak kaliteli piksellerin fazları açılmış olacağı için hata minimize edilecektir.

Algoritma adım adım incelendiğinde [43], [44], [124];

1. SAR görüntü çifti kullanılarak rehber olarak kullanılacak kalite haritası üretilir.
2. Kalite haritasındaki kalite metriği en yüksek değerden en düşük değere kadar tüm pikseller sıralanarak bir listeye yazılır ve listenin en tepesinden aşağıya doğru pikseller seçilerek faz açma işlemi başlanır.
3. İlk olarak sıralı listenin en tepesinden seçilen ilk piksel ve bu piksele 4 komşu pikselin fazı açılır ve fazı açılan bu komşu pikseller ayrı bir listeye yazılır. Daha sonra sıralı listedeki ikinci piksel seçilir ve onun komşu 4 pikselinin fazı açılır. Ancak bu işlem yapılırken komşu listesi kontrol edilir ve halihazırda fazı açılmış piksellerin fazı bir kat daha açılmaz o pikseller atlanır. Bu işlem sıralı listedeki tüm pikseller için yapılarak interferogramdaki tüm piksellerin fazı açılmış olur.

Burada en önemli olan nokta ise kullanılacak kalite haritasıdır. Zira katlı fazın açılmasında izlenecek yolu bu harita belirlemektedir. Bunun için kullanılan beş farklı harita mevcuttur.

1. Korelasyon Haritası
2. Sözde Korelasyon Haritası
3. Faz Türev Varyansı Haritası
4. En Yüksek Faz Eğimi Haritası
5. Genlik Değişiklik Haritası

Bu haritalar aslında sadece ilgili katlı fazı açma yönteminde rehber olarak kullanılmamaktadır. Ayrıca çakıştırma/hizalama adımının sonucunun doğruluk yüzdesinin kontrol edilmesinde de güçlü bir gösterge olmalarından dolayı her biri SAR İnterferometri tekniğinin daha önceki adımlarında üretilmiş ve teknik detayları paylaşılmıştır.

2.3.7.4.1.1.3. Mask Cut Algoritması

Mask Cut tekniği, Goldstein Branch Cut ve Kalite Rehberi tekniklerinin birleşiminden oluşmaktadır. Bu yönüyle hibrit bir katlı fazı açma yöntemidir. Mask Cut tekniği, her iki yöntemin de avantajlarını birleştirerek yöntemlerin eksik taraflarının önüne geçmeyi hedeflemiştir. Zira Goldstein tekniğinde branch-cut'lar oluşturulurken dikkat edilen tek

ölçüt oluşturulacak branch-cut'ların uzunluğunun mümkün mertebe düşük yani kısa olmasıdır. Bunun dışında herhangi bir kalite metriğine bakılmamaktadır. Rastgele veya kullanıcı tarafından belirlenen herhangi bir pikselden faz açılmaya başlanarak branch-cut'ların üzerinden geçilmeyecek şekilde faz açılarak ilerlenmektedir. Kalite Rehberi yönteminde ise katlı fazın açılmaya başlanacağı piksel ise kullanılan rehber haritaya göre belirlenmektedir. Katlı fazın açılacağı yön ve izlenecek yol da yine rehber haritadaki piksel kalite metriğine göre yüksekten düşüğe doğru ilerlemektedir. Ancak burada da katlı fazı açarken takip edilen yolda herhangi bir bariyer / branch-cut bulunmadığı için ani yükseliş ve/veya düşüşün olduğu ya da binalar gibi insan yapılarının olduğu noktalarda hataya sebep olmaktadır.

Mask Cut tekniğinde ise; Goldstein yöntemindeki gibi kalıntılar çıkarılmaktadır ancak bunlar birleştirilip branch-cut'lar oluşturulurken Kalite Rehberi tekniğindeki gibi bir rehber harita kullanılmaktadır. Böylelikle hem katlı fazı açarken takip edilecek yola dair bir kalite metriği kullanılırken hem de izlenecek yolun üzerindeki bariyerler belirlenmiş olacaktır. Özetle; Kalite Rehberi yönteminde kullanılan rehber harita yardımıyla Goldstein yöntemindeki kalıntıların nasıl birleştirilerek mask-cut'lar oluşturulması gerektiğine karar veren hibrit bir tekniktir. Hibrit bir teknik olmasından dolayı her iki teknikten de faydalanmıştır.

Algoritmada tıpkı Goldstein tekniğinde olduğu gibi ilk olarak kalıntıların birleştirilerek bariyerlerin / mask-cut'ların oluşturulması gerekmektedir. Burada kalıntı haritasındaki bulunan ilk kalıntı için rehber haritadaki ilgili pikselin komşu 4 pikselinin kalite metriğine bakılarak düşük olan yönünde ilerleyip başka bir kalıntıyı bulup toplam kalıntı polaritesini nötr yapana kadar ya da görüntünün sınırına gelene kadar mask-cut uzatılır. Tüm kalıntılar bağlandığında mask-cut'lar oluşmuştur ve tıpkı Kalite Rehberi tekniğindeki gibi rehber haritadaki kalite metriği en yüksek olan pikselden başlayarak faz açılmaya başlanır.

Mask-Cut algoritması adım adım incelendiğinde [44], [126]

1. İnterferogramdaki her pikseldeki faz değerleri kullanılarak kalıntı değerler hesaplanır. Kalıntı haritası (Residue Map) çıkarılır.
2. Daha sonra bu değerler üzerinden interferogram üzerinde piksel piksel gezilerek kalıntılar bulunmaya çalışılır.

3. Sıfırdan farklı ilk değer yani kalıntı bulunduğunda rehber haritadaki (örneğin Faz Türevinin Varyansı Haritası) kalıntıya denk gelen pikselin 4 komşu pikselinin rehber harita kalite metriği değerlerine bakılır ve en düşük olan seçilir.
    A. Eğer kalite metriği düşük olan komşu pikselde farklı bir kalıntı varsa ve
        I. Bu kalıntı ilk bulunan kalıntıdan farklı işaretliyse iki kalıntı birleştirilir (uncharged) ve bağlantı burda sonlandırılır. Mask-cut oluşturulmuştur.
        II. Bu kalıntı ilk bulunan kalıntı ile aynı işaretliyse Adım 3'e dönülür ve bu piksel ve komşu 4 pikseli için aynı işlemler tekrar edilir.
    B. Eğer kalite metriği düşük olan komşu pikselde herhangi bir kalıntı yoksa; Adım 3'e dönülür ve bu piksel ve komşu 4 pikseli için aynı işlemler tekrar edilir.
    C. Eğer kalite metriği düşük olan komşu piksel görüntünün sınır / kenar pikseli ise bağlantı burada sonlandırılır. Mask-cut oluşturulmuştur.
4. Kalıntı haritasındaki tüm kalıntılar kullanılarak mask-cut'lar oluşturulduktan sonra mask-cut haritası oluşmuş olur. Bazı morfolojik işlemler yapılarak mask-cut'lar inceltilebilir. Böylelikle mask-cut denk gelen piksellerin fazla sayıda olması ve bundan dolayı hata yapılması da engellenmiş olur.
5. Mask-cut haritası inceltildikten sonra;
    A. Kalite haritasındaki kalite metriği en yüksek değerden en düşük değere kadar tüm pikseller sıralanarak bir listeye yazılır ve listenin en tepesinden aşağıya doğru pikseller seçilerek faz açma işlemi başlanır.
    B. İlk olarak sıralı listenin en tepesinden seçilen ilk piksel ve bu piksele 4 komşu pikselin fazı açılır ve fazı açılan bu komşu pikseller ayrı bir listeye yazılır. Daha sonra sıralı listedeki ikinci piksel seçilir ve onun komşu 4 pikselinin fazı açılır. Ancak bu işlem yapılırken komşu listesi kontrol edilir ve halihazırda fazı açılmış piksellerin fazı bir kat daha açılmaz ilgili

pikseller atlanır. Bu işlem mask-cut pikseli olmayan tüm pikseller için yapılır.

C. Bu işlem sıralı listedeki mask-cut olmayan tüm pikseller için yapılarak interferogramdaki tüm piksellerin fazı açılmış olur.
D. Son olarak mask-cut piksellerinin de fazı açılarak görüntünün tamamında katlı fazı açma işlemi tamamlanmış olur.

2.3.7.4.1.1.4. Flynn En Düşük Süreksizlik Yaklaşımı Algoritması

İnterferogramda görülen örgeler (fringe) aslında fazın nerde katlandığına dair net bir bilgi içermektedir. Referans noktasından başlayıp örgeler takip edilerek interferogram üzerindeki tüm noktaların fazı izohips haritasındaki gibi açılabilir. Bir örge üzerindeki tüm noktalarda (tıpkı izohips haritalarında eş yükselti olduğu gibi) faz eşit olacaktır. Bu bilgiden hareketle örge tespiti yaparak fazın katlandığı çizgiler tespit edilmeye çalışılmış ve interferogram örgelerin böldüğü bölgelere ayrılarak katlı fazın açılabileceği düşünülmüştür. Bu amaçla interferogram üzerinde kenar bulma ve benzeri algoritmalar denenmiştir. Ancak örgelerdeki geçişler çok net bir şekilde belli olmayabilir. Ayrıca gürültülü verilerde bu işlem daha da zor olmaktadır. Böylelikle örge üzerinde süreksizlikler olacaktır. Bu süreksizleri bağlayarak örgelerin bir döngü oluşturması için eğri oturtma (curve-fitting) gibi bazı yaklaşımlar da denenmiştir. Ancak örge çizgisinin bir halka gibi süreksiz şekilde olması her interfergoram için yine de mümkün olmayabilir ve örge çizgisi üzerinde bazı kopukluklar/süreksizlikler halen kalabilir. Bu tip bir durum da katlı fazın doğru açılmasına engel olmaktadır. Temel sebep ise izole durumdaki kalıntılardır. Bu sorunu çözmek için Flynn örge çizgilerini doğru tespit etmeye çalışmak yerine örge çizgisi üzerinde olması gerekmeyen süreksizlik çizgilerini tespit eden akıllı bir şema çalıştırmıştır. Algoritma; döngüye bağlanan süreksizlik çizgilerini belirleyen ve tüm döngüye 2π eklendiğinde birçok süreksizliği ortadan kaldıran ve bu işlemi iteratif bir şekilde yaparak süreksizlikleri azaltan bir prensiple çalışmaktadır.

$$\varphi_{i,j}^{uw} = \varphi_{i,j}^{w} \pm 2\pi n_{i,j} \qquad 2.99$$

Eşitlik 2.99'daki tamsayı olan $n_{i,j}$ katlanma sayısıdır (wrap count). Katlı fazın açılmasındaki tüm amaç $n_{i,j}$ tamsayısının doğru tahmin edilmesidir. Flynn'in katlı fazı açma algoritması için bilinmesi gereken birkaç terim daha mevcuttur. Bunlardan biri de

süreksizliklerdir (discontinuity). Komşu iki pikselin fazları arasında π'den daha fazla fark varsa orada bir süreksizlik mevcuttur. Komşu pikseller arasındaki farklar ise yatay ve düşey sıçrama sayıları (vertical and horizontal jump counts) olarak isimlendirilmekte ve Eşitlik 2.100 ve Eşitlik 2.101'deki formüller ile belirlenmektedir.

$$v_{i,j} = Int\left(\frac{\varphi^{w}_{i,j} - \varphi^{w}_{i+1,j}}{2\pi}\right) \quad 2.100$$

$$z_{i,j} = Int\left(\frac{\varphi^{w}_{i,j} - \varphi^{w}_{i,j+1}}{2\pi}\right) \quad 2.101$$

Sıçrama sayılarının toplamı ise Eşitlik 2.102'deki gibi ifade edilecektir.

$$E = \sum|v_{i,j}| + \sum|z_{i,j}| \quad 2.102$$

Flynn algoritması Eşitlik 2.102'deki toplamı minimize etmeye çalışmaktadır ve yapılan çalışmalar göstermiştir ki Flynn En Düşük Süreksizlik algoritması yaptığı işlemler sonucunda eşitlikteki minimizasyon problemi için yerel (local) en küçük değere takılmayıp genel (global) bir çözüm üretmektedir [127].

Algoritmada kullanılan diğer iki parametre ise ok (arrow) ve düğümlerdir (node). Düşey ve yataydaki pozitif sıçrama sayıları sırasıyla yatayda ve düşeyde pozitif oklara (arrow / edge) tekabül etmektedir. Negatifte sıçrama sayılarında ise negatif oklar olacaktır. Okları birleştiren noktalara ise düğüm (node) denilmektedir. Başlangıç düğümünden sonra okların pozitif ve negatif olmasına göre düğümlerin değeri değişmektedir.

$$deger(i,j) = \sum_{k=0}^{L-1} \delta V(i_k, j_k, i_{k+1}, j_{k+1}) \quad 2.103$$

$$dval = deger(i,j) + \delta V(i,j,i',j') - deger(i',j') \quad 2.104$$

$\delta V(i,j,i',j')$, *(i,j)* düğümünden *(i',j')* düğümüne kadar olan ok değerlerinin toplamını sembolize etmektedir. Algoritmadaki amaç oklar ile bir döngü (loop) tamamlanmaya çalışmaktır. Döngü sağlandığında tüm oklar kaldırılarak o döngü içerisindeki tüm faz değerlerine 2π kadar eklenecektir. Bu işlem interferogramdaki tüm süreksizlikler yeni

oklar ile tamamlanarak tüm döngüler için süreksizlik sağlanacak ve böylelikle interferogram üzerinde en az sayıda süreksizlik bırakılmaya çalışacaktır.

Özetle Flynn algoritması doğrudan katlanma sayısını hesaplamamaktadır. Aslında sıçrama katsayısı üzerinden dolaylı olarak katlanma sayısını ve böylelikle katlı fazın açılmasını sağlamaktadır.

Algoritma adım adım incelendiğinde [44], [127];

1. İnterferogramdaki her pikseldeki faz değerleri kullanılarak yatay ve düşey sıçrama sayıları (jump count) hesaplanır.
2. Tüm düğüm değerleri sıfır olarak ayarlanır.
3. Düğümler gezilerek,
    A. Eğer ilgili düğümler için denklemdeki *dval* değeri pozitif ise oklar eklenir ve düğüm değerleri bu oklara göre güncellenir.
    B. Herhangi bir döngü bulunursa sıçrama sayısı güncellenir.
    C. İlgili döngü kaldırılır.
    D. Döngünün döngü dışındaki diğer düğümlerle bağlantıları güncellenir.
4. Eklenebilecek yeni bir ok ve katlanma sayısı hesaplanacak bir iç alanı olan yeni bir döngü kalmayana kadar yani süreksizlik sayısı minimuma indirilene kadar Adım 3 iteratif olarak tekrar edilir.
5. Sıçrama katsayıları kullanılarak belirlenmiş olan katlama sayıları ile katlı faz açılmış olur.

Flynn algoritması herhangi bir rehber harita olmadan uygulanabileceği gibi süreksizliklerin rehber harita ile ağırlıklandırılması sağlandıktan sonra da çalıştırılabilir. Böylelikle süreksizlik sayısından daha önemlisi ağırlıklandırılmış süreksizliklerin toplamı Eşitlik 2.105'teki gibi minimize edilmeye çalışılır.

$$E_w = \sum w_{i,j}^{v} \left| v_{i,j} \right| + \sum w_{i,j}^{z} \left| z_{i,j} \right| \qquad 2.105$$

Kalite Rehberi yöntemindeki tüm haritalar Flynn Algoritmasında da kullanılabilir. Hatta ek olarak ikinci türevi veya faz varyansının farklı ölçümlerinin haritası da tercih edilebilir [44]. Rehber harita kullanıldığı durumda faz kalitesi yüksek piksellerde (harita metriği

yüksek olan pikseller) daha az süreksizlik kalması amaçlanarak doğruluk yüzdesi daha yüksek bir katlı fazı açma işlemi uygulanabilir. Ancak bu durumda da tıpkı Kalite Rehberi ve Mask Cut algoritmalarında olduğu gibi rehber haritanın kalitesine bağımlı olunur.

Flynn algoritması global bir çözüm üretiyor olması ve algoritmanın diğer yol izleme algoritmalarına oranla daha karmaşık olmasından dolayı işlem süresi de bir hayli yüksektir. Özellikle geniş alanlar için katlı faz açma işlemlerinde bu sebeple farklı hızlandırma ve/veya paralelleştirme işlemleri yapılması gerekmektedir.

2.3.7.4.1.2. Ağ Akışı Tabanlı Yöntemler

Ağ akışı tabanlı yöntemler ya da bir diğer adıyla minimum maliyet akışı tabanlı yöntemler, katlı fazın açılması problemini tamsayı değişkenleri ile global minimizasyon problemi gibi çözümlemektedir. Tahmin edilen ve bilinmeyen katlı fazın gradient farkları kıyaslandığında arada 2kpi gibi bir fark oluşması koşuluyla global bir minimize optimizasyon problemi oluşacaktır. Bu kısıt ile, hatanın yayılmasını önlenirken, katlı fazı açma sonuçlarının ağırlıklandırılmış maske kullanılmasına karşı daha az hassas olması da sağlanmış olacaktır [51].

2.3.7.4.1.3. En Küçük Kareler Tabanlı Yöntemler

En küçük kareler tabanlı yöntemler; katlı fazın açılması işlemini, tahmin edilen ve katlanmış faz arasındaki farkın mutlak karesinin minimizasyonu ile sağlanmaktadır. En küçük kareler tabanlı yöntemler, Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) tekniği kullanıldığı durumda en verimli hesaplama şeklini alacaktır. Ancak sonuçlar tam doğru olmayacaktır. Çünkü en küçük kare metodu hatayı yayma eğilimindedir ve bu sorunu çözmek için ağırlıklandırılmış katlanmış faz kullanmak iyi bir yol olacaktır. Ancak ağırlıklandırılmış yöntem, ağırlıklandırılmamışa oranla verimsizdir [44].

Çizelge 2-3'ten de görülebileceği üzere 3 tipi bulunmaktadır. Bunlar;

- Ağırlıklandırılmamış En Küçük Kareler Yöntemi,
- Ağırlıklandırılmış En Küçük Kareler Yöntemi ve
- En Küçük L_p Norm Yöntemidir.

2.3.7.4.1.4. Entegre Gürültü Filtreleme ve Faz Açma Yöntemleri

Tek baz uzaklıklı katlı faz açma yöntemlerinin sonuncusu ise entegre gürültü filtreleme ve faz açma yöntemidir. Bu metot diğer tüm katlı faz açma algoritmalarından farklı olarak

interferogram filtreleme işlemini de bünyesinde barındırır [43]. Filtreleme ve faz açma işlemini entegre bir şekilde beraber yapar. Daha ziyade Kalman filtresi benzeri bir uygulama ile açılacak katlı fazın tahminlemesini yapar. Bu tahmin işlemini yaparken hem de filtre uygular. Kalman ve benzeri bir filtre yardımıyla açtığı katlı faz sonucunda sayısal yükseklik modelini oluşturur. Ancak diğer tüm yöntemler gibi hata yapma ihtimali mevcuttur ve bu sebeple yüksek sinyal gürültü oranına sahip SAR görüntüleri kullanmak yöntemin başarı performansını artıracaktır.

2.3.7.4.2. Çoklu Baz Uzaklıklı Katlı Faz Açma Algoritmaları

İnterferometrik ve Radargrametrik SAR tekniklerini kullanarak Sayısal Yükseklik Modeli oluşturmak için aynı bölgeye ait farklı bakış açılarıyla (belli bir baz uzaklıkla) alınmış en az iki adet SAR görüntüsüne ihtiyaç duyulmaktadır. SAR İnterferometri tekniğinde yer yüzeyindeki aynı noktanın baz uzaklık sebebiyle SAR görüntülerindeki faz farklılığı sayesinde ilgili noktanın yükseklik bilgisi çıkarılabilmektedir. Aynı şekilde aynı noktanın SAR görüntülerindeki konumlanma farklılığı paralaks oluşmasına sebep olmakta ve radargrametrik teknik sayesinde yine sayısal yükseklik modeli oluşturulabilmektedir. Faz farkını ya da paralaks değerini hesaplayabilmek için en az 2 adet SAR görüntüsüne ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak aynı bölgeye ait interferometrik tekniğe uygun veya radargrametrik tekniği uygun alınmış ikiden fazla SAR görüntüsü olduğu durumda daha yüksek doğrulukta yükseklik modeli oluşturmak mümkündür [43]. Bu tip bir durumda çoklu baz uzaklıklı katlı faz açma yöntemleri kullanılacaktır.

2.3.7.4.3. Geniş Alanlar için Katlı Faz Açma Algoritmaları

Katlı faz açma işlemi yoğun işlem yükü sebebiyle oldukça fazla kaynak harcayan ve işlem süresi uzun olan bir adımdır. SAR görüntüleri de genel olarak geniş alanları içermektedir. Bu sebeple interferometrik teknik uygulanarak geniş alanların sayısal yükseklik modelinin oluşturulması çok uzun süreler almaktadır. Süreleri kısaltabilmek adına genelde SAR görüntüleri küçük parçalara ayrılmakta ve sadece ilgilenilen alanların sayısal yükseklik modelleri çıkarılmaktadır [43]. Ancak son dönemde gelişen teknoloji ve yüksek işlem gücüne sahip donanımlar sayesinde işlem yükü hafifletilebilmiştir. Bu amaçla algoritmaların hızlandırılması mümkün olmuştur. Hatta Open MP gibi bazı araçlar sayesinde birden fazla CPU işlemci üzerinde algoritma parçalara bölünerek donanımın kaynakları optimize kullanılmaya çalışılmış ve işlem süresi kısaltılmıştır. GPU kartlarının paralelleştirme imkânı daha fazla olması sebebiyle CUDA dilinde

yapılan kodlamalar ile katlı faz açma algoritmaları büyük ölçüde paralelleştirilmiş ve bu sayede algoritma karmaşıklığından kaynaklı uzun işlem süresi kısaltılmıştır. Ancak Open MP ile CPU çekirdeklerinin tamamının eş zamanlı kullanılması ya da GPU işlemcisinin devreye alınması süre problemini çözmeyebilir. Çünkü SAR görüntüleri çok büyük alanları kaplayabilir. Bu yüzden işlem süreleri halen istenilen seviyenin çok üstünde olabilir. Bu amaçla hem algoritma karmaşıklığı ön filtreleme işlemleri ile azaltılmalı hem de FPGA gibi yüksek işlem gücü olan donanımlar kullanılmalıdır.

2.3.8. Yükseklik Hesaplama

SYM üretimi akışının son aşamasında mutlak faz değerleri, baz-uzaklık ve menzil değerleri kullanılarak her piksel için gerçek yükseklik değerleri hesaplanmaktadır. Gerçek yükseklik değerleri hesaplanırken görüntülenen bölgedeki referans noktaların gerçek yükseklik değerleri kullanılmaktadır. Yükseklik bilgisi önceden net olarak bilinen bu referans noktalar sayesinde oluşturulan SYM'deki tüm noktaların gerçek yükseklik bilgisi çıkarılabilecektir.

2.3.9. Coğrafi Konumlandırma

Coğrafi konumlandırmada ise, SAR sisteminin menzil ve çapraz menzil koordinatlarında elde edilen bu yükseklik değerleri harita koordinatlarına dönüştürülerek her bir piksel için Enlem-Boylam-Yükseklik üçlüsü elde edilmektedir.

3. RADARGRAMETRİ

Radargrametri (Stereo SAR veya Stereoskopi) tekniği radar görüntülerinden yükseklik bilgisi üretmek için kullanılan ilk yöntemdir [68]. Stereo yöntem kullanımı 1960'lı yıllarda başlamış olsa da StereoSAR'ın fotogrametri ile olan benzerliği göz önüne alınarak çalışmalar artmış; 1990'lı yıllarda Leberl Radargrametrinin temellerini araştırmıştır. Leberl'e göre Radargrametri tekniği, radar görüntülerinden geometrik bilginin çıkarılması teknolojisidir [7]. Yüksek menzil, farklı modlarda görüntü alabilme olanağı ve farklı geliş açılarına sahip (10º ile 60º arasında değişen) stereo SAR görüntü çiftleri elde edilebilen ilk ticari sistem olan RADARSAT'ın 1995'te göreve başlamasıyla beraber radargrametri teknolojisinin önemi ciddi oranda artmıştır [8].

Fotogrametri, optik kamera fotoğraflarını işlemeye verilen isim iken; radargrametri tekniği radar görüntüleri kullanmaktadır. Ancak radar görüntülerinin sadece büyüklük bilgisi radargrametri tekniği için yeterlidir. SAR interferometri tekniğinden farklı olarak faz bilgisi ile ilgilenmemektedir. Yapılmış tüm radargrametrik çalışmalarda ana amaç, geleneksel optik stereo analiz yöntemlerin başarılı bir şekilde radar görüntülerine nasıl uygulanabileceğinin araştırılmasına yöneliktir [65].

Radargrametri'deki temel mantık radar ile aydınlatılan ve görüntüleri alınan bölgedeki hedeflerin sensörlere olan uzaklıklarının farklı olmasından kaynaklı olarak görüntülerdeki benzer hedeflerin pozisyonlarının eşleştirilmesi sonucunda menzil farkının oluşmasıdır. Hesaplanacak olan bu menzil farkı bilgisine ek olarak sensörlerin bakış açıları ve yükseklik bilgileri kullanılarak görüntülenen bölgenin sayısal yükseklik modeli çıkarılmaktadır. Görüntülerin faz bilgisine ihtiyaç duyulmamaktadır. Sadece genlik bilgisi yeterli olmaktadır. SAR İnterferometi tekniği ise Sayısal Yükseklik Modeli oluştururken faz bilgisi kullanmaktadır. Bu sebeple ilintisizlik, atmosferik karışıklık, bakış açısı farkı ve Doppler gibi birçok etkene maruz kalmaktadır [128]. Radargrametrinin genlik bilgisi kullanmasından dolayı avantajlarından birisi de atmosferik etkilerden SAR interferometri tekniğine oranla daha az etkilenmesidir [66].

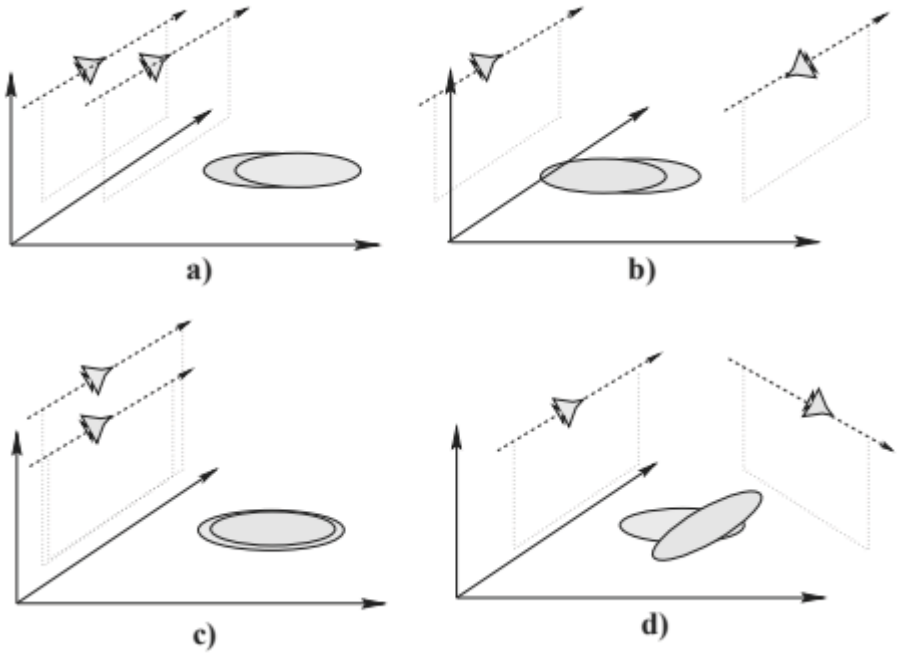
3.1. Radargrametri Prensipleri ve Uygulamaları

Radar görüntülerinin genlik bilgisini kullanan radargrametri tekniğinin temeli, optik sistemlerdeki stereo görü yaklaşımına benzemektedir. SAR görüntülerindeki piksel

değerleri geliş açısına bağlı olarak değişmektedir. Görüntülenen bölgeye ait yükseklik bilgisi optik sistemlerde olduğu gibi bindirmeli SAR görüntülerinden elde edilmektedir.

3.1.1. Radargrametri Geometrik Modeli

Radargrametride interferometriden farklı olarak SAR sensörleri arasındaki baz uzaklık oldukça fazladır ve genellikle 5º ile 45º arasında değişebilmektedir [65]. Buna rağmen aralarında daha yüksek bakış açısı farkı olan stereoskopik SAR görüntü çiftleri de oluşturmak mümkündür. Hatta aynı bölgenin farklı yönlerden alınmış SAR görüntü çiftleri de kullanılarak radargrametrik yöntemleri ile yükseklik modelleri çıkarılabilmektedir. Radargrametrik yöntem için optimum görüntü çifti zıt yönlerden alınmış görüntü çifti olmasına rağmen büyük geometrik ve radyometrik problemlere yol açtığından için literatürde bahsedildiği gibi genellikle aynı yönden aralarında ciddi bir açı farkı olacak şekilde alınmış görüntü çiftleri kullanılmaktadır [64].



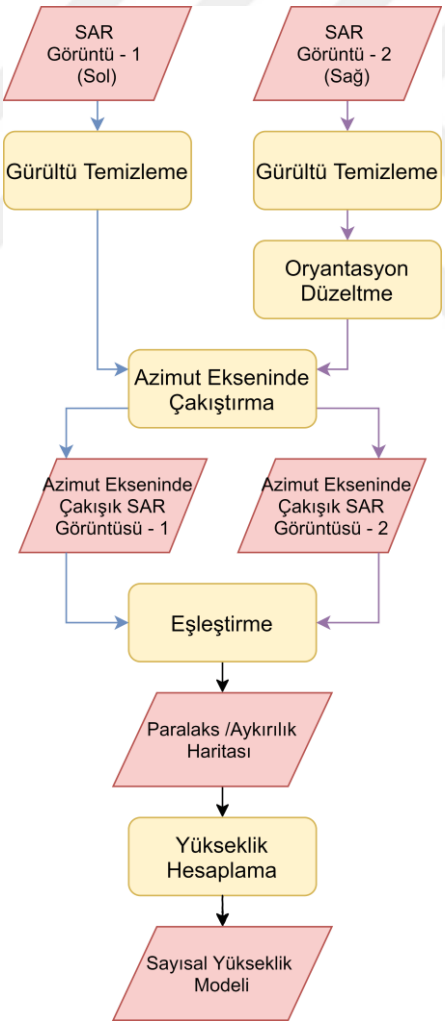
Şekil 3-1: Radargrametri Görüntüleme Geometrileri [63], (a): Aynı yükseklikten ve aynı yönden farklı bakış açıları ile oluşturulan geometri, (b): Aynı yükseklikten, farklı yönlerden ve farklı bakış açıları ile oluşturulan geometri, (c): Aynı yönden, farklı yüksekliklerden farklı bakış açıları ile oluşturulan geometri, (d) Yönler, yükseklikle ve bakış açılarının tamamen farklı olduğu geometri

En sık kullanılan geometri Şekil 3-1'deki uçuş geometrilerinden (a) ve (b) seçeneğidir. Bu geometriler genellikle uydu görüntülemesinde kullanılmaktadır. Ancak (b)

geometrisinde (ascending-descending) çok ciddi eşleşme problemi yaşanmaktadır. Özellikle dağlık bölgelerde alınan görüntülerde (b) geometrisi ile görüntüleme çifti oluşturulduysa dağların farklı cepheleri gölgede kalacak ve oluşturulan yükseklik modelleri büyük ölçüde hatalı olacaktır. (c) geometirisinde yükseklik farkının olması sebebiyle bir oransal (scaling) farklılık ile uğraşılmak zorunda kalınacaktır. (c) geometrisi genellikle uçak kullanılarak oluşturulan görüntülemelerde karşımıza çıkmaktadır. Matematiksel olarak çözülmesi en zor problem ise (d) geometrisidir ve zorunda kalınmadığı sürece kullanılmamaktadır [63].

3.2. Radargrametri Algoritması

Radargrametrik teknik kullanarak Sayısal Yükseklik Modeli Oluşturma algoritmasının işlem adımları Şekil 3-2'de verilmiştir.



Şekil 3-2: Radargrametrik SYM Üretimi İşlem Adımları

3.2.1. Gürültü Temizleme

Radargrametri tekniği uygulamak üzere alınmış SAR görüntü çifti tekniğin diğer adımları öncesinde tıpkı SAR interferometri tekniğinde olduğu filtrelenebilir. Filtreleme işlemi neticesinde görüntüdeki benek gürültüsü azaltılabilir. Opsiyonel bir adımdır. Filtreleme işlemi sonucunda azimut ekseninde çakıştırma ve daha da önemlisi görüntü eşleştirme adımlarının doğruluğu arttırılabilir. Filtreleme işlemi için farklı pencere boyutları kullanılabilir. Medyan veya ortalama gibi alternatif filtre seçenekleri değerlendirilebilir.

3.2.2. Bilinen Açı Farkını Düzeltme

Radargrametri tekniğini uygulamak üzere toplanan SAR görüntüleri Şekil 3-1'deki gibi belli geometrilerde olabilir. Şekil 3-1'de (a), (b) ve (c) seçeneklerinde sensörlerin bağlı bulunduğu platformların güzergahları birbirine paraleldir. (d) seçeneğinde ise oldukça farklı doğrultularda hareket etmektedirler. Böyle bir durumda SAR görüntü çifti arasında önceden bilinen bir açı farkı oluşacaktır. Bu açı farkının da düzeltimesi ve aynı orbit üzerine oturtulması gerekmektedir. Böylelikle görüntüler birbirine paralel iki güzergahta SAR görüntülerini toplamışlar gibi olacak ve azimut ekseninde çakıştırma yaptıktan sonra baz uzaklık mesafesine göre eşleştirme işlemi yapılabilecektir.

3.2.3. Azimut Ekseninde Çakıştırma

SAR görüntü çifti arasındaki bilinen açı farkının düzeltilmesi aslında Şekil 3-1'deki (d) uçuş senaryosunun (a) ya da (c) seçeneklerinde olduğu gibi bir senaryoya dönüşmesini sağlamıştır. Ancak bölgeye ait görüntülemenin an olarak tam ne zaman başlayıp bitirildiğini bilmem mümkün olmayabilir. Aynı anda görüntülemeye başlamadıkları durumda görüntü çifti arasında çapraz menzilde (platformun hareket doğrultusunda) bir kayma gözlemlenecektir. Zaten radargrametrinin doğası gereği baz uzaklık fazla olduğu için menzilde çakıştırma mümkün değildir. Çakıştırma işlemi sadece azimutta yapılacaktır. Tıpkı SAR interferometride olduğu gibi radargrametride de çakıştırma işlemi farklı şekillerde yapılabilir. Geometrik çakıştırma böyle bir durumda tartışmasız en iyi opsiyon olacaktır. Platformların görüntülemeye başladığı ve görüntülemeyi bitirdiği anlar ve o anlardaki koordinat bilgileri kullanılarak SAR görüntü çifti azimut ekseninde kolaylıkla çakıştırılabilecektir. Ancak SAR sensörünün konuşlu olduğu platformlar uydu yerine uçak olduğu durumlarda bu yöntemi uygulamak sağlıklı olmamaktadır. Zira yöntemi uygulamak için gerekli olan zaman ve konum bilgileri

yüksek doğrulukta olmamaktadır. Bu tip durumlarda SAR görüntü çifti geleneksel çakıştırma yöntemi ile azimut ekseninde çakıştırılabilir.

Azimut ekseninde çakıştırma işlemininde SAR görüntüleri Eşitlik 3.1'deki gibi bir bütün olarak çapraz kolerasyon işlemine tabi tutularak tüm görüntü için çapraz menzilde öteleme miktarı hesaplanacaktır.

$$ÇK(i,j) = \left| \sum_{m=1}^{N_M} \sum_{n=1}^{N_A} G_3(m,n).G_4^*(m+i,n+j) \right| \quad 3.1$$

Çapraz korelasyon işlemi zaman düzleminde yapılabildiği gibi frekans düzleminde de yapılabilmektedir. Hatta frekans düzleminde çarpım şeklinde yapılabilmesi sebebiyle çok daha hızlı olmakta ve dolayısıyla kısa sürmektedir. Eşitlik 3.1'deki çapraz korelasyon işlemi frekans düzleminde yazılacak olursa Eşitlik 3.2'deki gibi olacaktır.

$$ÇK = \left| F^{-1}\left\{ F\{G_3\}F^*\{G_4\} \right\} \right| \quad 3.2$$

G_3 ve G_4 SAR görüntü çiftinin boyutları, menzil yönünde N_M, çapraz menzil yönünde (azimutta) N_A boyutundadır. Görüntülerin bir bütün olarak çapraz korelasyonları sonucunda $ÇK$ matrisi hesaplanacaktır. Görüntülerin en yüksek korelasyonda çakıştıkları anda matrisin zirve noktası hesaplanacak ve zirve pikselde en yüksek değer elde edilecektir. İlgili pikselin merkez piksele çapraz menzil yönünde uzaklığına (d_A) göre kaç piksel kaydırılması gerektiği bulunacaktır.

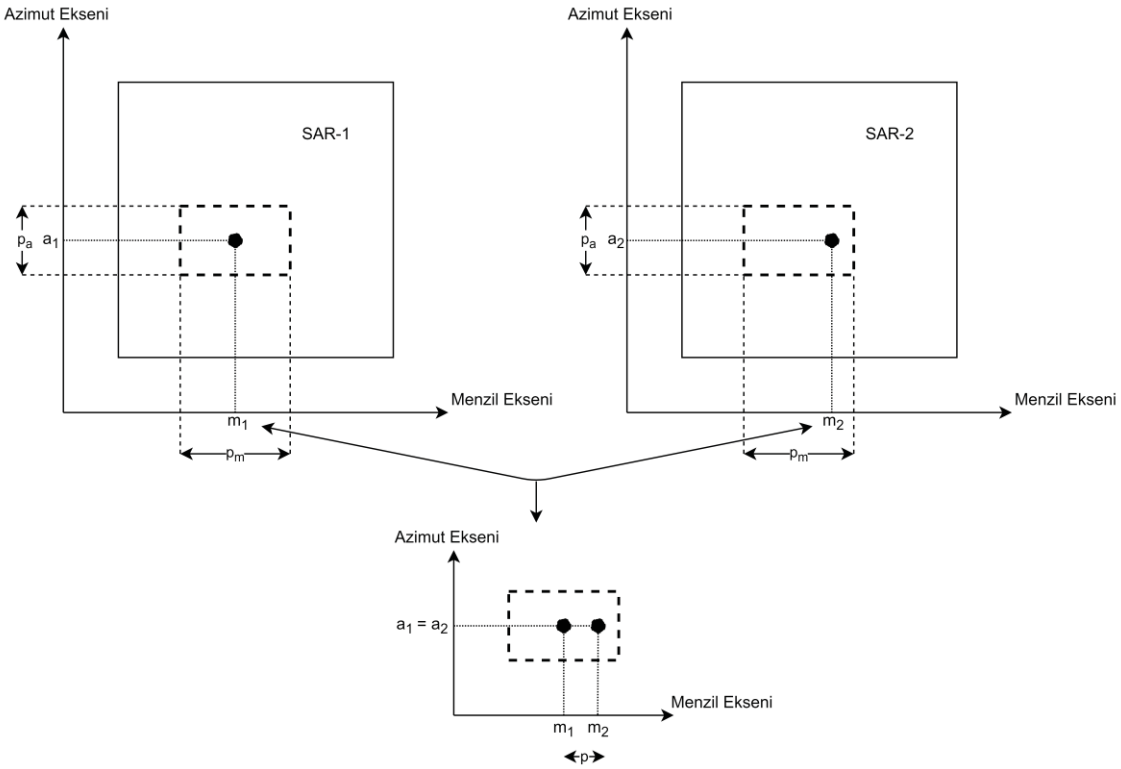
İlgili SAR görüntüsü azimut ekseninde d_A kadar kaydırılacak ve SAR görüntüleri çapraz menzilde çakıştırılmış olacaktır.

3.2.4. Görüntü Eşleştirme

SAR görüntü çifti için, görüntüleme geometrisinden kaynaklı oluşan açısal ofseti düzeltilmiş ve görüntüleme zamanlamasından kaynaklı oluşan azimut eksenindeki kayma giderilmiş ve böylelikle görüntüler çapraz menzilde çakıştırılması sonucu eşleştirme (matching) adımı için hazır hale getirilmiştir.

Sensörler arası baz uzaklık oldukça fazla tutularak, bir diğer deyişle bakış açıları birbirinden oldukça farklı olacak şekilde radargrametri tekniğine uygun alınmış SAR görüntü çiftinde görüntü içerisine düşen aynı nesnelerin bulundukları piksellere homolog pikseller adı verilmektedir. Homolog pikseller arasında menzil yönünde bazı farklar olacaktır. Bu farklar SAR interferometri tekniğinde olduğu gibi menzil yönünde

görüntülerden biri kaydırılarak giderilmemektedir. Zira görüntü içerisindeki farklı noktaların kayma miktarları da birbirinden farklı olmaktadır. Radargrametrinin doğası gereği beklendiği üzere menzilde çakıştırma mümkün değildir. Tam tersine görüntülerden birindeki her pikselin diğer görüntüdeki hangi piksellere denk geldiği yani homolog pikseli bulunacaktır. SAR görüntü çiftinden birindeki piksellerin diğer SAR görüntüsünde homolog pikselinin bulunduğu bu işleme görüntü eşleştirme (matching) denilmektedir. Homolog piksellerin görüntülerdeki indis farkına da paralaks (parallax) ismi verilmektedir. Paralaks değeri sayesinde de ilgili piksel için yükseklik hesaplanabilecektir. Her piksel için paralaks değerinin hesaplanarak görüntü eşleştirme adımı sonunda aykırılık haritası (disparity map) oluşturulmaktadır. Her piksel için paralaks değerinin hesaplandığı ve bu değerlerden oluşan aykırılık haritası üretiminin yapıldığı işlem adımı olan görüntü eşleştirme, radargrametrik yöntemin en kritik adımıdır [56]. Kritik öneme sahip olması sebebiyle eşleştirme adımında yapılacak yanlış hesaplamalar ve hatalar doğrudan üretilecek aykırılık haritasında ve dolaylısıyla sayısal yükseklik modelinde hataya sebep olacaktır.



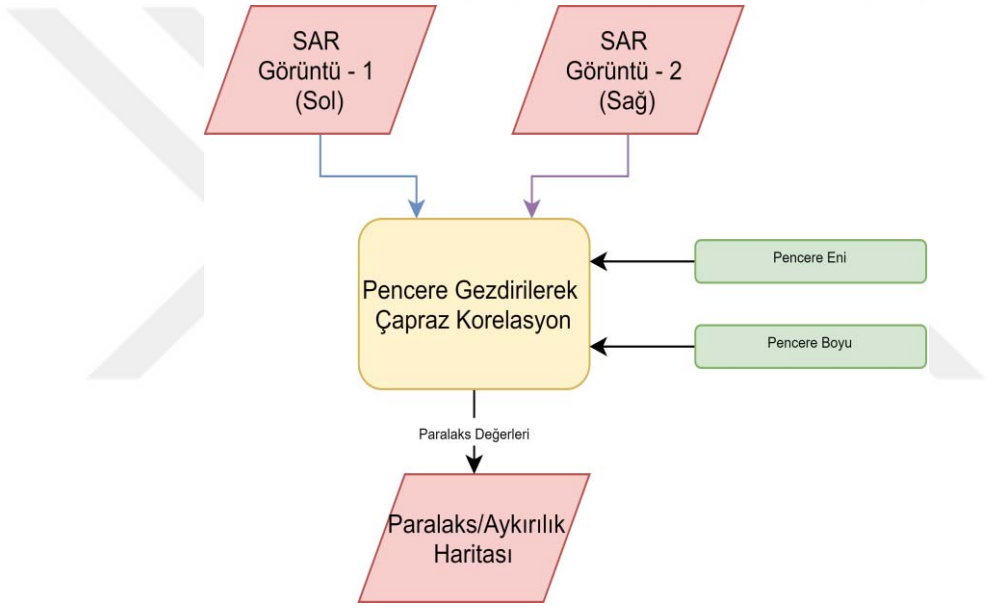
Şekil 3-3: Görüntü Eşleştirme İşlemi

Eşleştirme adımı için birden fazla yöntem bulunmaktadır.

3.2.4.1. Çapraz Korelasyon

Çapraz korelasyon yöntemi, belirli ve eş boyutlarda iki pencere içerisine düşen değerlerin çapraz korelasyon işlemine tabi tutularak pencereler arasındaki en yüksek benzerliğin sağlanabilmesi için gereken düşey ve yatay doğrultudaki kayma değerlerin hesaplanması işleminden oluşmaktadır. Zaman düzleminde yapılabildiği gibi frekans düzleminde de yapılabilmektedir.

Görüntü eşleştirme adımında SAR görüntülerindeki homolog piksellerin indislerinin ve sonrasında da indisleri arasındaki farkın yani paralaks değerinin hesaplanabilmesi için çapraz korelasyon yöntemi uygulanabilir [58]. Çapraz korelasyon yöntemi ile eşleştirme algoritması akış şeması Şekil 3-4'te verilmiştir.



Şekil 3-4: Eşleştirme Algoritması

Görüntüler üzerinde belli boyutlarda pencereler gezdirilerek çapraz korelasyon işlemine tabi tutulur ve Eşitlik 3.3'teki gibi korelasyon katsayısı hesaplanır.

$$\rho = \frac{E[P_1P_2] - E[P_1]E[P_2]}{\sqrt{S(P_1)S(P_2)}} \qquad 3.3$$

Eşitlik 3.3'teki P_1 ve P_2 Radargrametrik SAR görüntülerinde (G_3 ve G_4) gezdirilen pencerenin genlik bilgilerini içermektedir. Eşitlik 3.3'te yer alan ifadeler (ortalama ve standart sapma) Eşitlik 3.4 ve Eşitlik 3.5'te açıklanmıştır.

$$E\left[P_{1,2}\right] = \frac{1}{p_M p_A} \sum_{i=1}^{p_M} \sum_{j=1}^{p_A} P_{1,2}(i,j) \quad 3.4$$

$$S\left(P_{1,2}\right) = E\left[\left(P_{1,2} - E\left[P_{1,2}\right]\right)^2\right] \quad 3.5$$

Korelasyon katsayısı (ρ) pencereinin içerisine düşen tüm pikseller için hesaplanır. Korelasyon katsayısısının en yüksek olduğu pikselin $\{\rho(M_{çk}, A_{çk})\}$ merkeze olan uzaklıkları menzilde Eşitlik 3.6'daki gibi, azimutta ise Eşitlik 3.7'deki gibi bulunacaktır.

$$par_M = \left|M_{çk} - \frac{p_M}{2}\right| \quad 3.6$$

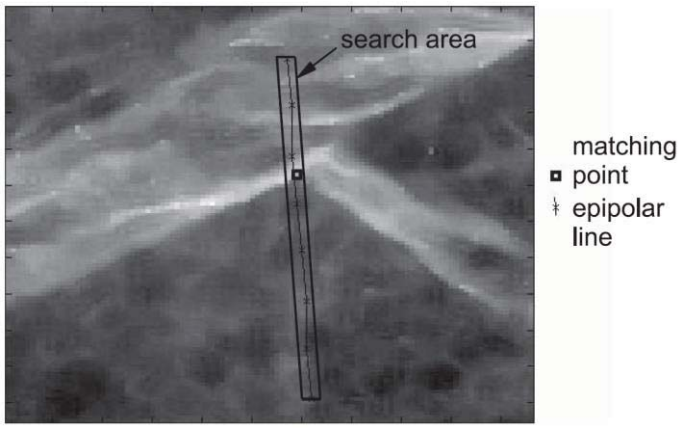
$$par_A = \left|A_{çk} - \frac{p_A}{2}\right| \quad 3.7$$

Bu işlem neticesinde çapraz korelasyon işlemi ile elde edilen sonucun en yüksek değerinin olduğu noktanın pencere merkezine olan uzaklığı menzil ve azimut yönünde hesaplanmış oluır. Hesaplanan bu değerler ilk SAR görüntüsünde gezdirilen pencerenin merkezindeki piksela ait indisin ikinci SAR görüntüsündeki homologunun indisi ile olan farklarını vermektedir. Kısacası ilgili piksel için paralaks değerleri bulunmuştur. Bu işlem tüm pikselleri kapsayacak şekilde yapılmaktadır ve böylelikle aykırılık haritası oluşturulmaktadır [63]. Ancak azimut ekseninde çakıştırılma yapıldığı için azimut yönünde herhangi bir paralaks değerinin çıkması beklenmemektedir.

Burada dikkat edilmesi gereken çok önemli bir nokta bulunmaktadır. Gezdirilen pencerenin boyutları büyük önem arz etmektedir. Zira homolog piksellerin indisleri ve indisler arası fark yani paralaks değerinin bulunabilmesi için gezdirilen pencerelerin içerisine aynı anda iki görüntüde birden homolog piksellerin girmesi gerekmektedir. Homolog piksellerin görüntüler üzerindeki konumları arasında büyük bir fark bulunuyorsa ve pencerelerin içerisine aynı anda girmiyorlarsa çapraz korelasyon işlemi sonucunda hata yapılacaktır. Bunu önlemek için pencere boyutlarını büyütmek gerekecektir ve bu pencere boyutlarını büyütme işlemi ciddi bir hesaplama yükü getirecektir. Zira görüntülerdeki tüm piksellerin her biri için çok büyük boyutlarda pencereler çapraz korelasyon işlemine tabi tutulacaktır. Bu sebeple alternatif yöntemler kullanılmaktadır.

3.2.4.2. Epipolar Geometri

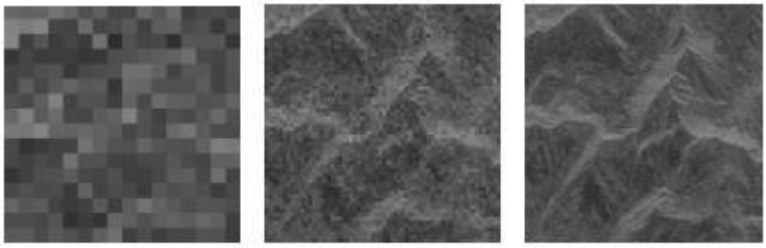
Çapraz korelasyon işleminde bahsedildiği üzere homolog piksellerin iki görüntüdeki konumları arasındaki fark büyük olduğunda bu iki pikseli birden kapsayacak boyutta bir pencere gerekmektedir. Çapraz korelasyon işleminde genellikle kare veya kareye yakın pencere boyutu kullanıldığı düşündüğünde pencere boyutlarını büyütmek işlem yükünü çok fazla arttıracaktır. SAR sensörü taşıyan platformların uçuş doğrultuları paralel veya paralele yakındır. Paralel olmadığı durumlarda da açı düzeltmesi ile görüntüler aynı doğrultuya çekilmektedir. Sonrasında da çapraz menzil ekseninde çakıştırma yapılmaktadır. Bu durumda homolog pikselleri çapraz menzil yönünde aramaya gerek kalmamaktadır. Büyük olasılıkla aynı veya çok yakın azimut indislerinde bulunmaktadırlar. Böylelikle pencere boyutu azimut doğrultusunda ciddi anlamda küçültülebilir. Platformun yönü ve hızının bilindiği varsayılarak bir görüntüdeki pikselin diğer görüntüde nereye düşebileceği de az çok tahmin edilebilir düzeydedir. Bu şekilde menzil yönünde de hangi uzunlukta bir pencereye ihtiyaç duyulduğu güvenli tarafta kalınarak mümkün mertebe arttırılabilir. Özetle, görüntüler üzerinde gezdirilen pencereler Şekil 3-5'teki gibi menzil doğrultusunda uzanan ince bir çubuk şeklinde olabilir. Benzer işlemler bu pencere üzerinde yapılarak menzil yönünde paralaks hesaplanacaktır. Bu şekilde aranan alanın azaltıldığı, pencerenin azimut doğrultusunda küçültüldüğü şekle epipolar geometri adı verilmektedir [129]. Epipolar geometri yöntemine ilişkin algoritma akış şeması Şekil 3-4'te verilen çapraz korelasyonun aynısıdır. Sadece azimut ekseninde girilen pencere boyutu menzile göre oldukça küçük seçildiği durumda yöntemin ismi epipolar geometri olmaktadır.



Şekil 3-5: Epipolar Arama Alanı [56]

3.2.4.3. Piramit Yaklaşımı

Çok geniş alanların yer aldığı SAR görüntülerinde işlem zamanından tasarruf etmek için hiyerarşik bir strateji izlenebilir [63]. Görüntü eşleştirme adımında da homolog piksellerin eşleştirmesini yapmak için görüntünün orijinalini kullanmak yerine piramit yaklaşımını kullanarak Şekil 3-6'daki gibi daha düşük çözünürlükteki versiyonlarından tarama başlatılır ve sırasıyla ilerlenerek görüntünün orijinaline kadar gelinir [130].



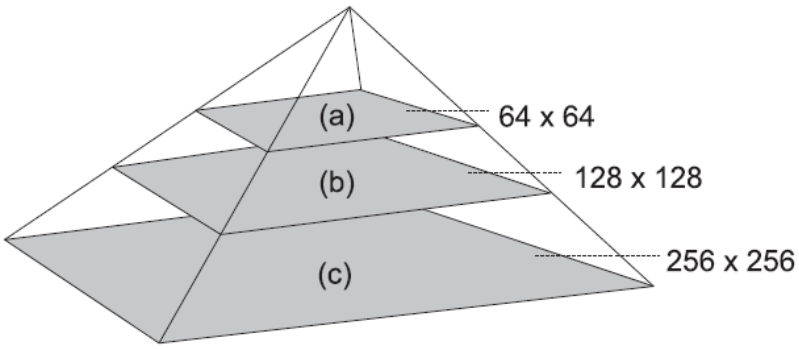
Şekil 3-6: Aynı SAR Görüntüsünün Farklı Çözünürlüklerdeki Versiyonları [58]

Piramit yaklaşımında ilk olarak Şekil 3-7'deki gibi görüntünün orijinalinden başlanarak 2^k oranında küçültülmüş versiyonları üretilir. Bu versiyonlar üretilirken farklı yöntemler tercih edilebilir. Örneğin en basit haliyle her 4 pikselin değeri kullanılarak bir piksel değeri hesaplanabilir. Ya da alçak geçirgen filtre (Low Pass Filter) tercih edilebilir. Böyle bir tercih için oluşacak görüntü denklemi Eşitlik 3.8'de verilmiştir [63].

$$G_3^k(x,y) = \int\int G_3(x-t, y-u) w_k(t,u) dtdu \qquad 3.8$$

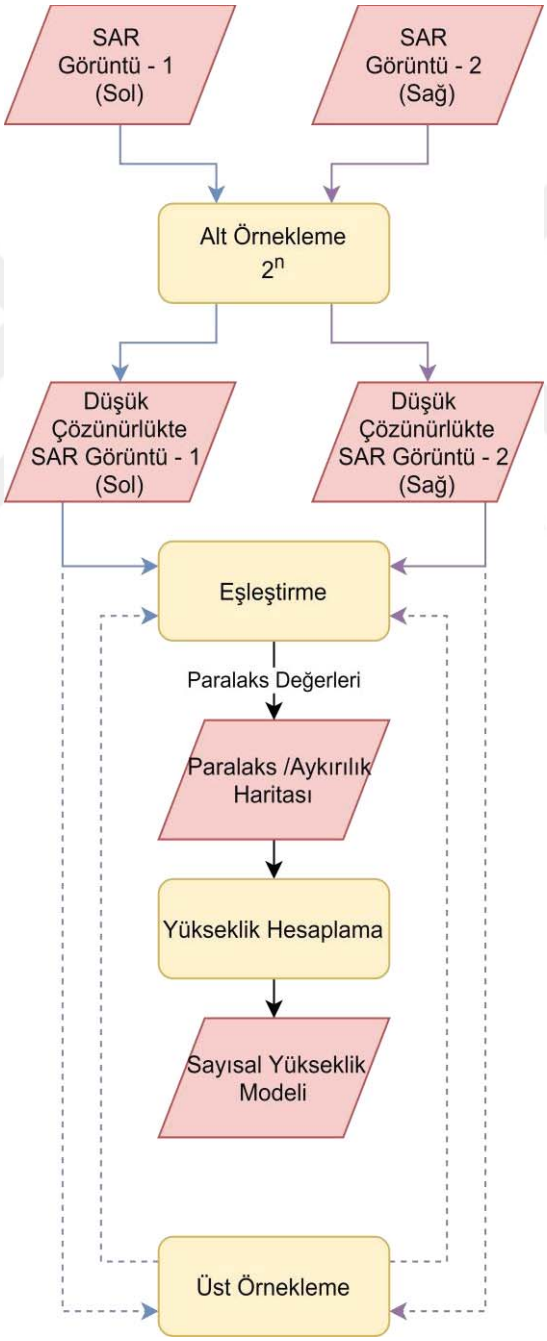
İyi bir piramit aracı olarak Eşitlik 3.8'de yer alan w_k ise bir Gauss filtre seçilebilir.

$$w_k(x,y) = \frac{1}{2^k \sigma\sqrt{2\pi}} exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2^{2k}\sigma^2}\right) \qquad 3.9$$



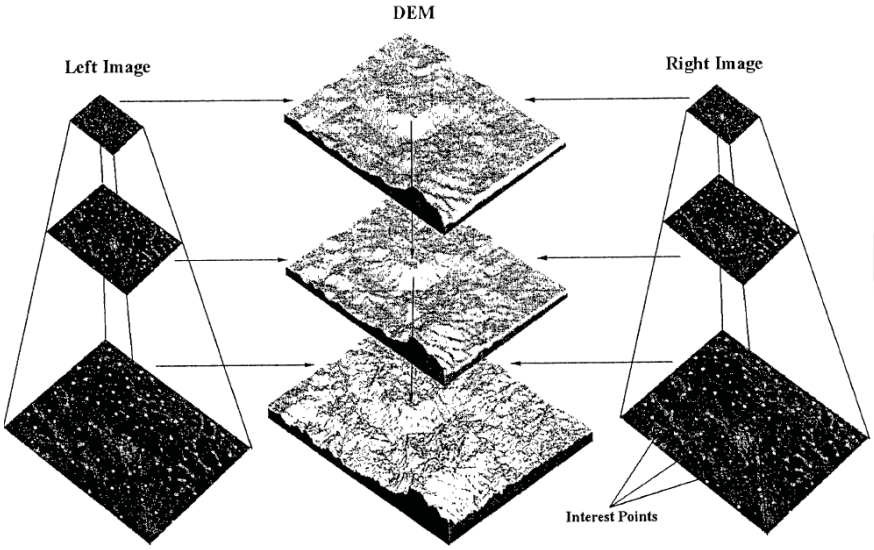
Şekil 3-7: Piramid Yaklaşımında İyileşen Çözünürlükler

Piramit yaklaşımında daha sonra eşleştirme işlemi ilk olarak görüntülerin çözünürlüğü en düşük versiyon olan görüntü çifti üzerinden yapılır. İşleme başlanılan bu en küçük görüntü çifti güçlü bir şekilde filtrelenmiş, benek (speckle) gürültüsü etkisinin oldukça düşük olduğu ve korelasyonun yüksek olduğu görüntü çiftidir. Bu görüntü çiftindeki her nokta için paralaks değeri hesaplanıp aykırılık haritası ve Şekil 3-9'daki gibi sayısal yükseklik modeli oluşturulur. SYM üretildikten sonra bir yüksek çözünürlükteki SAR görüntü çiftine geçilir ve buradaki tüm piksel değerleri için aynı işlemler tekrar edilir. Bu işlemler görüntünün orijinal haline ulaşana kadar devam ettirilir.



Şekil 3-8: Piramit Yaklaşımı Algoritması

Görüntülerin en düşük çözünürlüklü halinden orijinal çözünürlük seviyesindeki hallerine kadar tüm versiyonları için aykırılık haritası ve Sayısal Yükseklik Modeli Şekil 3-8'deki gibi oluşturulur. Piramit yaklaşımındaki amaç hesaplanacak paralaks değerine dair bilginin bir önceki çözünürlüğü düşük olan versiyonda hesaplanan paralaks değerine bakarak yaklaşık tahmin edilebilmesidir. Örneğin bir homolog piksel çifti için herhangi bir çözünürlük seviyesinde hesaplanan paralaks değeri 10 piksel ise bir üst çözünürlük seviyesinde bu değer 19-21 arasında bir değer olacaktır. Diyelim ki 21 olarak hesapladık ve bir üst çözünürlük seviyesine geçtik. Bu seviyede ise ilgili homolog piksel çifti için hesaplanacak paralaks değeri 41-43 arasında olmalıdır. Böylelikle daha önceki düşük çözünürlük seviyesindeki versiyonlarda bulunan kabaca değerin yardımıyla aranacak piksel sayısı oldukça azaltılmış olmaktadır. Sonuç olarak görüntülerin orijinal halinde yapılan görüntü eşleştirme işleminin hesaplama yükü ciddi seviyede azalacaktır.



Şekil 3-9: Piramit Yaklaşımı ve Üretilen Sayısal Yükseklik Modelleri [8]

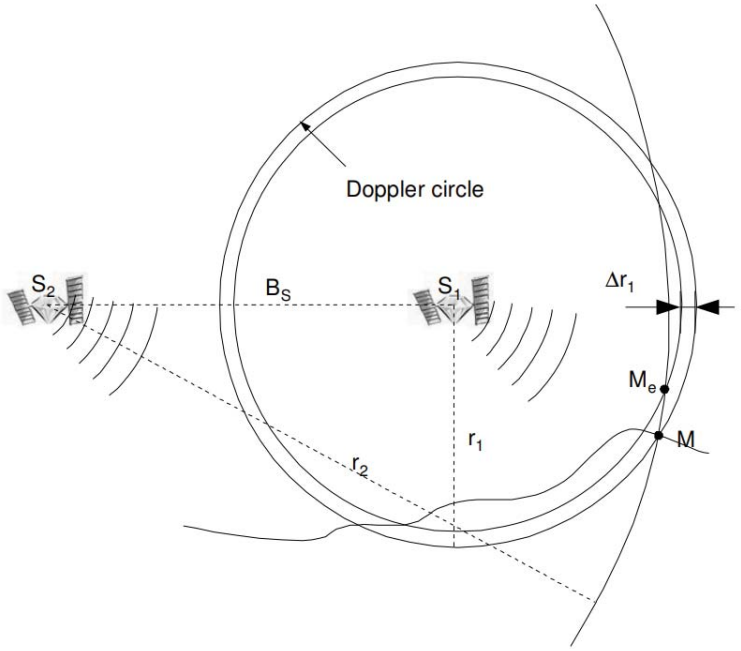
Geniş alanların radargrametri tekniği ile Sayısal Yükseklik Modeli çıkarılırken işlem süresi uzun sürebilmektedir. Eğer daha düşük çözünürlükte bir Sayısal Yükseklik Modeli yeterli ise piramit yaklaşımında istenilen çözünürlük seviyesinde eşleştirme işlemi durdurulur ve o seviyedeki SYM üretilerek kullanılabilir. Böylelikle süreden ciddi anlamda kazanç sağlanmış olur. Aynı şekilde daha hassas bir Sayısal Yükseklik Modeli ihtiyacını gidermek adına piramit yaklaşımıyla orijinal görüntülerin üst örnekleme ile daha hassas görüntü çiftleri oluşturulabilir ve böylelikle piksel altı seviyede eşleştirme işlemi yapılıp ve daha yüksek çözünürlüğe sahip Sayısal Yükseklik Modelleri oluşturulabilecektir. Ancak bu durumda üst örnekleme işleminde seçilen interpolasyon tipine bağlı olarak da bazı ek hatalar oluşacaktır.

3.2.5. Yükseklik Hesaplama

Aykırılık haritası çıkarıldıktan sonra görüntülenen bölgenin yükseklik bilgisini üretebilmek için iki farklı yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan ilki sensörlerin bulunduğu platformların koordinat ve hız bilgilerini kullanmaktadır. İkinci yöntem ise sensörlerin bakış açılarını ve yükseklik bilgilerini kullanmaktadır. Her iki yöntem de aykırılık haritasında hesaplanmış olan her nokta için paralaks değerine ihtiyaç duymaktadır.

3.2.5.1. Radar Stereo Modelin Hesaplanması

SAR sensörü konuşlu olan platformların anlık olarak koordinatları ve hızları bilindiği durumda görüntülenen alandaki herhangi bir noktaya ait koordinat bilgileri geometrik olarak çıkarılabilir. Bunun için Şekil 3-10'daki gibi bir senaryo ele alınabilir. Her iki sensör merkezde olacak şekilde görüntülenen bölgedeki M noktasına çemberler çizilebilir. Böylelikle farklı yarıçaplarda iki çember oluşur.



Şekil 3-10: Aynı Taraftan Bakışlı Radargrametri Geometrisi [58]

Bu iki çember iki farklı noktada kesişeceklerdir ve bu kesişimlerden bir tanesi M noktasıdır. İlgili çember denklemleri Eşitlik 3.10 ve Eşitlik 3.11'de verilmiştir.

$$(x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2 + (z - Z_1)^2 = R_1^2 \quad 3.10$$

$$(x - X_2)^2 + (y - Y_2)^2 + (z - Z_2)^2 = R_2^2 \quad 3.11$$

Eşitlik 3.10 ve Eşitlik 3.11'deki (x,y,z) değişkenleri M noktasının koordinatlarını, (X_1,Y_1,Z_1) değişkenleri 1. sensörün koordinatlarını ve (X_2,Y_2,Z_2) değişkenleri ise 2. sensörün koordinatlarını sembolize etmektedir. Eşitliklerdeki (R_1 ve R_2) değişkenleri de sensörlerin M noktasına olan uzaklıklarını yani çemberlerin yarıçaplarını sembolize etmektedir. Sensör koordinatları bilinmiş olduğu durumda bile halen M noktasına ait koordinatların bulunabilmesi için ekstra denkleme ihtiyaç bulunmaktadır. Zira 3 bilinmeyen varken 2 denklem bulunmaktadır. Sensörlerin konuşlu olduğu platformlara ait hız bilgileri de kullanıldığı durumda Eşitlik 3.12 ve Eşitlik 3.13'te elde edilecektir.

$$(x - X_1)\dot{X}_1 + (y - Y_1)\dot{Y}_1 + (z - Z_1)\dot{Z}_1 = 0 \qquad 3.12$$

$$(x - X_2)\dot{X}_2 + (y - Y_2)\dot{Y}_2 + (z - Z_2)\dot{Z}_2 = 0 \qquad 3.13$$

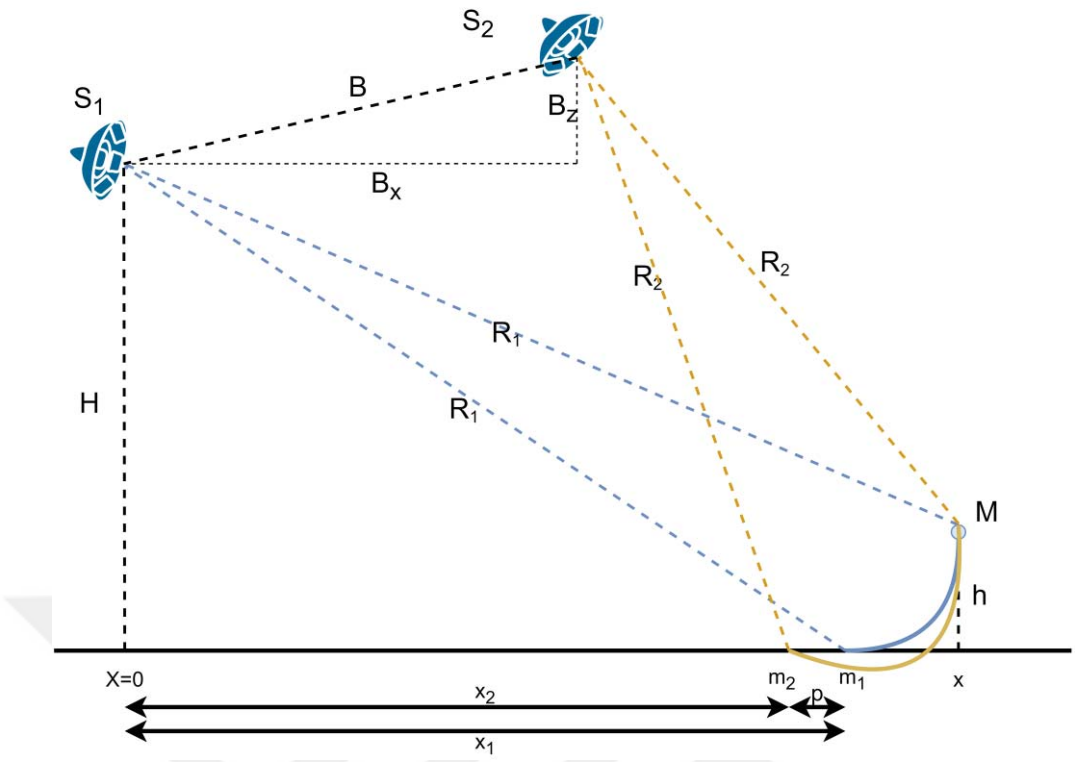
Eşitlik 3.12 ve Eşitlik 3.13'teki ($\dot{X}_1$, $\dot{Y}_1$, $\dot{Z}_1$) değişkenleri, 1. sensörün hız vektörlerini ve ($\dot{X}_2$, $\dot{Y}_2$, $\dot{Z}_2$) değişkenleri ise 2. sensörün hız vektörlerini sembolize etmektedir. Çember denklemleri ve hız vektörleri ile yazılmış 4 denklem çözüldüğü durumda çözümlerden biri (çemberler 2 noktada kesişmektedir) M noktasının koordinatlarını vermektedir. Böylelikle görüntülenen bölgedeki noktaya ait koordinat bilgileri 3 boyutlu olarak çıkarılmıştır. Aydınlatılan bölgedeki tüm noktalar için ilgili denklemler çözüldüğünde bölgeye ait Sayısal Yükseklik Modeli üretilmiş olacaktır.

Pratik uygulamalarda sensör pozisyonunun belirsizliği oluşturulan sayısal yükseklik modelinde hatalara sebep olmaktadır. Bu tip sistematik hataların düzeltilmesi için yer kontrol noktası (Ground Control Points) kullanılmaktadır. Konumu ve yüksekliği net olarak bilinen bu yer kontrol noktaları sayesinde hatalar minimize edilmektedir.

3.2.5.2. Geometrik Geriçatım

Sensör yükseklikleri, bakış açıları ve aykırılık haritasında hesaplanmış olan paralaks değerleri kullanılarak görüntülenen bölgenin geometrik geriçatımı yapılıp bölgeye ait Sayısal Yükseklik Modeli oluşturulabilir. Geometrik geriçatımda kullanılan değişkenlerin ifade ettiği bilgiler Şekil 3-11'de verilmiştir. Geometrik geriçatım ile görüntülenen bölgedeki bir noktaya ait yükseklik bilgisi diğer değişkenler yardımıyla bulunacaktır. Bunun için 3 farklı hesaplama yöntemi mevcuttur.

İlk hesaplamada sensörlerin yükseklikleri birbirinden farklıdır. İkinci sensör ilkinden B_z kadar yüksekte durmaktadır.



Şekil 3-11: Stereo Görüntüleme Uçuş Geometrisi

Birinci sensörün M noktasına olan uzaklığı ile yüksekliği sıfır olan m_1 noktasına olan uzaklığı aynıdır ve R_1 kadardır. İkinci sensörün M noktasına olan uzaklığı ile yüksekliği sıfır olan m_2 noktasına olan uzaklığı aynıdır ve R_2 kadardır. Her iki sensörden elde edilen SAR görüntülerinde M noktasının denk geldiği piksellerin indisleri arasındaki fark eşleştirme işlemi sonucunda hesaplanacaktır p bulunacaktır. Bu iki nokta arasında hesaplanan farka, paralaks denilmektedir. Bu farkın oluşmadığı durumda ise ilgili noktanın yüksekliğinin sıfır olduğu anlaşılmalıdır. Şekil 3-11'deki şekilden yararlanarak R_1 uzunluğunun hipotenüs olduğu iki dik üçgen için Pisagor denklemlerini yazarsak Eşitlik 3.14 ve Eşitlik 3.15 elde edilir.

$$(H-h)^2 + x^2 = R_1^2 \qquad 3.14$$

$$H^2 + x_1^2 = R_1^2 \qquad 3.15$$

R_2 uzunluğunun hipotenüs olduğu iki dik üçgen için Pisagor denklemlerini yazarsak Eşitlik 3.16 ve Eşitlik 3.17 elde edilir.

$$(H+B_z)^2 + (x_2 - B_x)^2 = R_2^2 \qquad 3.16$$

$$(H-h+B_z)^2 + (x - B_x)^2 = R_2^2 \qquad 3.17$$

Paralaks değerini hesaplamak için ise Eşitlik 3.18 kullanılacaktır.

$$p = x_1 - x_2 \tag{3.18}$$

Eşitlik 3.14 ve Eşitlik 3.15 kullanılarak x_1 değişkeninin çekildiği denklem Eşitlik 3.19 verilmiştir.

$$x_1 = \sqrt{x^2 - (H-h)^2 - H^2} \tag{3.19}$$

Eşitlik 3.16 ve Eşitlik 3.17 kullanılarak x_2 değişkeninin çekildiği denklem Eşitlik 3.20 verilmiştir.

$$x_2 = \sqrt{(H-h+B_z)^2 + (x-B_x)^2 - (H+B_z)^2} + B_x \tag{3.20}$$

Eşitlik 3.19 ve Eşitlik 3.20 kullanılarak Eşitlik 3.18 yeniden yazılırsa Eşitlik 3.21 elde edilecektir.

$$p = \sqrt{x^2 - (H-h)^2 - H^2} - \sqrt{(H-h+B_z)^2 + (x-B_x)^2 - (H+B_z)^2} - B_x \tag{3.21}$$

Ancak hesaplanmak istenen değer M noktasının yüksekliği olan *h* değeridir. Bu sebeple denklem yükseklik değerini verecek şekilde dönüştürüldüğünde Eşitlik 3.22'deki gibi olacaktır.

$$h = \frac{2H(B_x+p)^2 - (p^4+4\Delta)^{1/2}(B_x+p) + 2B_xB_z(x+p) + B_zp^2}{2(B_x^2 - B_z^2 + 2pB_x + p^2)} \tag{3.22}$$

Eşitlik 3.22'de geçen Δ değeri Eşitlik 3.23'te verilmiştir.

$$\begin{aligned}\Delta = {} & -x^2p^2 + p^3B_x + H^2(B_x+p)^2 + B_x^2p^2 + HB_zp^2 \\ & + x^2B_z^2 + xB_xp(B_x - 2x + p) + 2HB_xB_z(x+p)\end{aligned} \tag{3.23}$$

Ancak denklemlerden görüldüğü üzere yükseklik değerini hesaplamak için oldukça fazla işlem yapmak gerekmektedir. Bu sebeple ikinci hesaplama yönteminde denklemleri sadeleştirmek için B_z değeri sıfıra yakın olacak şekilde uçuşlar yapılmaya çalışılarak *h* değeri daha kolay hesaplanabilir hale getirilmiştir. Her iki uçuşunda aynı yükseklikten yapıldığı bu görüntüleme geometrisinde B_z değeri otomatikman sıfır olacaktır ve Eşitlik 3.22 ve 3.23 böylelikle Eşitlik 3.24 ve 3.25'e dönüşecektir.

$$h = \frac{2HB_x + 2Hp - \sqrt{4H^2B_x^2 + p\Lambda}}{p + B_x} \qquad 3.24$$

$$\Lambda = 8B_x(H^2 - x^2 + xB_x) + p(4B_x^2 + p^2 + 4pB_x) + 4p(H^2 - x^2 + xB_x) \qquad 3.25$$

Son hesaplama yönteminde ise birçok değişken ihmal edilmektedir. Uydu görüntülemelerinde H değeri (uyduların yerden yüksekliği), h değerine (noktanın yüksekliği) ve p değerine (paralaks) göre çok büyük olduğu için denklem Eşitlik 3.26'daki gibi en sade haline getirilebilecektir.

$$h = \frac{p}{\cot(\theta_1) - \cot(\theta_2)} \qquad 3.26$$

Eşitlik 3.26'daki θ_1 ve θ_2 de sensörlerin bakış açılarıdır.

3.2.6. Coğrafi Konumlandırma

Üretilen Sayısal Yükseklik Modeli 3 boyutlu koordinatlara (x,y,z) sahiptir. Bunlar koordinat dönüşümleri ile yeryüzü coğrafi koordinatlara (Lat, Lon, Height) dönüştürülebilirler. Yükseklik modelinin coğrafi konumlandırması yapılırken yeryüzü koordinatları önceden kesin olarak bilinen yer kontrol noktalarının da yardımıyla test edilir. Buna ek olarak alçak geçirgen Wiener filtre yardımıyla haritadaki artık hataların elenmesi sağlanır [56].

4. SAR İNTERFEROMETRİ – RADARGRAMETRİ FÜZYONU

SAR sensörü ile hedeften geri yansıyan sinyaller iki boyutlu genlik ve faz bilgisine sahip kompleks sinyaller olarak kaydedilip işlenerek görüntü verisine dönüştürülmektedir. Farklı yörüngelerden elde edilmiş kompleks SAR görüntüleri arasındaki faz farkı bilgisi kullanılarak interferometrik yöntemler yardımıyla yer yüzeyinin topografik ölçümü yapılabilmekte, yeryüzünde zaman içinde veya bir olay sonrası meydana gelen değişimler tespit edilebilmektedir [87].

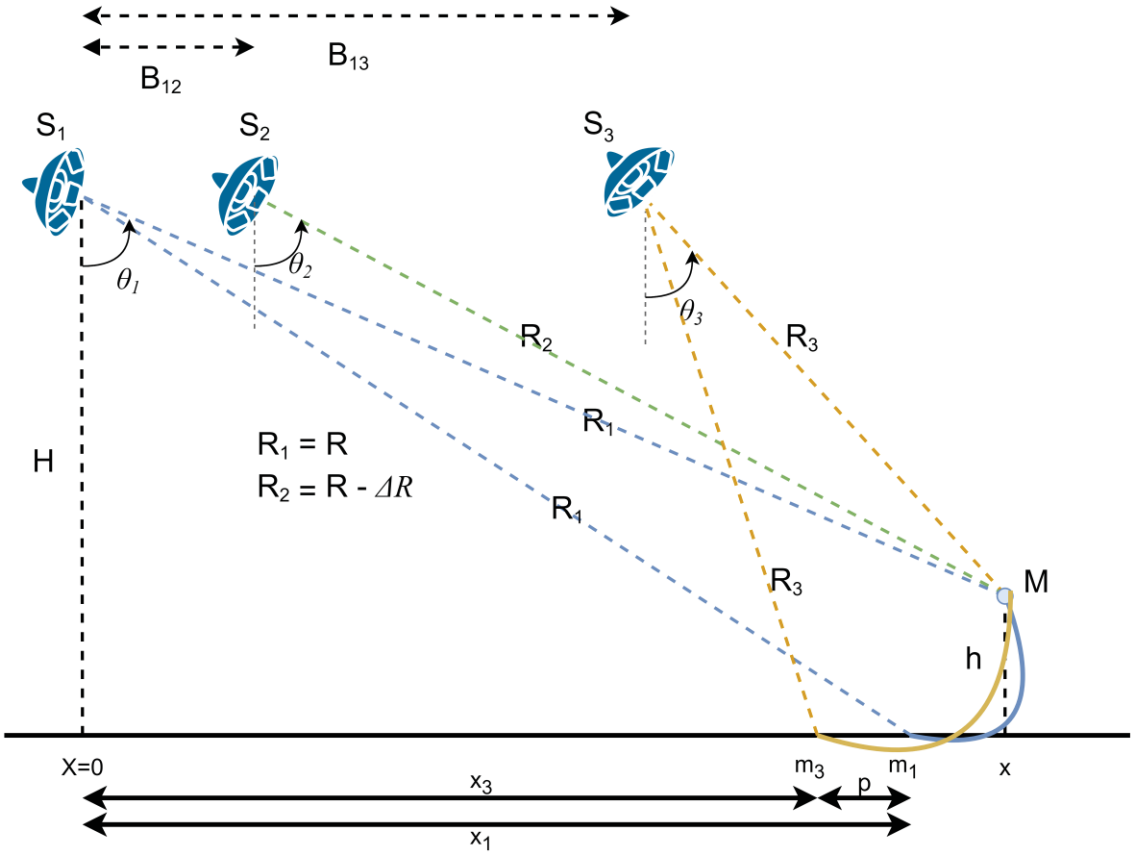
Aralarında büyük bir baz uzaklık olacak şekilde oldukça farklı iki açıdan alınmış iki SAR görüntüsünde görüntülenen bölgedeki yeryüzü şekillerinin görüntülerde farklı konumlarda (piksellerde) olması beklenen bir durumdur. İki görüntüdeki aynı noktaya ait pikselin farklı konumda olması ilgili noktanın yüksekliği ile ilintilidir. Görüntüler arasındaki bu farkın (paralaks) hesaplanarak uyduların yükseklik ve bakış açıları bilgisi ile beraber kullanılmasıyla görüntülenen bölgedeki tüm noktaların yükseklik bilgisinin çıkarılmasına radargrametri tekniği denilmektedir.

Radargrametri, görüntülerdeki benzer hedeflerin pozisyonlarının eşleştirilmesi sonucunda oluşan ofset menzil farkının hesaplaması işlemi iken, SAR İnterferometri iki görüntü arasındaki faz farkının hesaplanması işlemidir [131], [132]. Her iki teknik de girdi olarak SAR görüntü çifti alıp, görüntülenen bölgenin yükseklik modelini oluşturmaktadır. Dolayısıyla radargrametri ve SAR interferometri teknikleri, SAR görüntü çiftlerinden Sayısal Yükseklik Modeli oluşturmak için kullanılan yöntemlerdir. Birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları olan bu iki tekniğin birlikte kullanıldığı durumlarda ise her iki tekniğin tek başına kullanıldığı durumdan daha iyi sonuçlar alınabilmesi muhtemeldir. Bu sebeple aynı bölgenin SAR interferometri ve radargrametri tekniğine uygun geometride alınmış SAR görüntüleri elde edildiği sürece bu iki yöntem bütünleştirilerek (füzyon) ilgili bölgenin yüksek doğrulukta sayısal yükseklik modeli oluşturulabilecektir.

Kritik olan nokta, aynı bölgeye ait tekniklere uygun görüntü çiftlerinin bulunuyor olmasıdır. SAR interferometri tekniği için, düşük baz uzaklıkla toplanmış ve kompleks SAR görüntü çiftine ihtiyaç duyulurken; radargrametri tekniği için, büyük baz uzaklıkla toplanmış, genlik bilgisinden oluşan ve mümkün mertebe gölgede kalan alanı az olan SAR görüntü çifti gerekmektedir.

4.1. SAR İnterferometri ve Radargrametri Ortak Geometrik Modeli

SAR interferometri ve Radargrametri, Sayısal Yükseklik Modeli oluşturmak için kullanılan iki farklı tekniktir. Teknikleri uygulamak için SAR sensörlerinin aynı bölgeyi farklı bakış açılarıyla görüntülemesi gerekmektedir. Şekil 4-1'de SAR interferometri ve radargrametri teknikleri ile SYM üretebilmek için gerekli geometriler paylaşılmıştır.



Şekil 4-1: Stereoskopik ve İnterferometrik Görüntü Geometrisi

Şekil 4-1'de yer alan S_1 ve S_2 uyduları ile bu uyduların M noktasına olan R_1 ve R_2 uzaklıkları SAR interferometri tekniği ile SYM oluşturma algoritması için gerekli geometriyi göstermektedir. S_1 ve S_2 uyduları arasındaki baz uzaklık B_{12} ile gösterilmiştir. ΔR ise interferometrik ölçümdeki faz farkını oluşturan menzil farkını ifade etmektedir. Aynı şekilde S_1 ve S_3 uyduları ile bu uyduların M noktasına olan R_1 ve R_3 uzaklıkları radargrametri tekniği ile SYM oluşturma algoritması için gerekli geometriyi göstermektedir. S_1 ve S_3 uyduları arasındaki baz uzaklık B_{13} ile gösterilmiştir.

Şekil 4-1'deki görüntü geometrisinden de anlaşılacağı üzere, interferometrik görüntü çifti oluştururken görüntülerin alındığı bakış açıları arasındaki fark oldukça düşüktür ve böylelikle uydular arasındaki baz uzaklık kısadır.

Daha anlaşılır ve açık olması için Şekil 4-1'deki uçuşların aynı yükseklikten yapılmış olduğu ve yörüngelerinin birbirine paralel olduğu varsayılmıştır. Stereo görüntü çifti için sensör pozisyonları S_1 ve S_3 ve bakış açıları θ_1 ve θ_3 olacaktır. Sensör pozisyonları ve açılarının farklı olmasından kaynaklı olarak yerel topoğrafyadaki bir noktanın iki görüntüde farklı konumlarda görülmesi beklenen bir sonuçtur. Aynı noktanın görüntüler arasındaki konum farkına paralaks (p) ismi verilmektedir. Bahsi geçen parametreler arasındaki ilişki Eşitlik 4.1'de verilmiştir.

$$p \approx (cot\theta_3 - cot\theta_1)h \tag{4.1}$$

Eşitlik 4.1 yeniden düzenlendiğinde Eşitlik 4.2 gibi olacaktır.

$$p \approx \left(\frac{tan\theta_1}{tan\theta_3} - 1\right) cot\theta_1 h \tag{4.2}$$

İnterferometrik görüntü çifti Şekil 4-1'deki gibi sensör S_1 ve S_2 kullanılarak oluşturulmaktadır ve aralarındaki baz uzaklık $B_{12}=B$ ile gösterilmiştir. İnterferogramdan ölçülen faz farkı ($\Delta\varphi$) Eşitlik 4.3'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$\Delta\varphi = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)\Delta R \tag{4.3}$$

Ayrıca Eşitlikte 4.4 ile fazdaki topografik etkinin ($\Delta\varphi$) baz-uzaklık (B) ve yükseklikle (h) ilişkisi verilmektedir.

$$\Delta\varphi - \varphi_{flat} \approx \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)\left(\frac{B}{R}\right) cot\theta_1 h \tag{4.4}$$

Eşitlik 4.5'te ise menzilin (R) diğer parametreler ile ilişkisi verilmektedir.

$$\Delta R - R_{flat} \approx \left(\frac{B}{R}\right) cot\theta_1 h \tag{4.5}$$

Eşitlik 4.2 ve Eşitlik 4.5'i dikkate alarak interferometri ve radargrametri için Eşitlik 4.6 gibi ortak bir denklem yazılabilir [65].

$$\Delta x \approx K cot\theta_1 h \tag{4.6}$$

Radargrametri için;

$$\Delta x = p \tag{4.7}$$

$$K = \left(\frac{tan\theta_1}{tan\theta_3} - 1\right) \quad 4.8$$

İnterferometri için ise;

$$\Delta x = \Delta R - R_{flat} \quad 4.9$$

$$K = \left(\frac{B}{R}\right) \quad 4.10$$

eşitlikleri geçerli olacaktır.

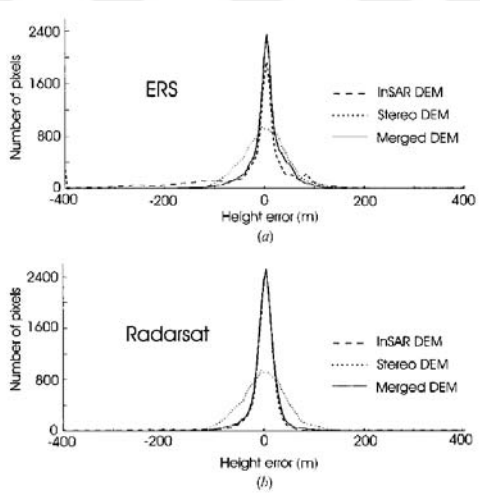
K parametresi iki yöntem arasındaki temel farkı oluşturan öğedir. Radargrametri yönteminde paralaks değeri hesaplanırken; interferometride ise faz ölçümü yapılırken sistem gürültü hassasiyeti baz uzaklık azaldıkça artmaktadır. Yüksek baz uzaklık mesafesi çözünürlüğü iyileştirirken, görüntü çiftleri arasındaki geometrik benzerliği de azaltmaktadır [65]. Bu durum interferometrik baz uzaklık ilintisizliğine ve stereo görüntü çiftleri arasında geometrik ve radyometrik farklılıklara sebep olmaktadır ki böylelikle radargrametrideki eşleşme (matching) adımı ve interferometrideki hizalama/çakıştırma (coregistration) adımı zorlaşmaktadır. Ayrıca SAR interferometri için büyük baz uzaklık mesafesi daha büyük faz belirsizliğine ve dolayısıyla katlanmış fazın açılmasının daha da zorlaşmasına sebep olmaktadır. Radargrametri tekniği için büyük baz uzaklık değeri üretilecek SYM'nin teorik olarak daha yüksek doğrulukta olmasını sağlarken, görüntüler arası ilintisizliği arttıracak ve eşleştirme adımında hataya sebep olacaktır. Bu sebeplerle seçilecek en iyi baz uzaklık mesafesi ve görüntü alma geometrisi; bahsi geçen etkiler, uydu yükseklikleri ve görüntülenen alanın topoğrafyası dikkate alınarak belirlenmelidir.

4.2. Füzyon Algoritmaları

Aynı bölgenin radargrametri ve SAR interferometri tekniklerine uygun geometrilerde SAR görüntü çiftleri alınmış ise her iki teknik de kullanılarak Sayısal Yükseklik Modelleri oluşturulabilir. Birbirlerine göre artı ve eksi yönleri olan bu iki tekniğin birlikte kullanıldığı durumlarda ise her iki tekniğin tek başına üreteceği Sayısal Yükseklik Modelinden daha yüksek doğrulukta sonuçlar alınabilmesi mümkündür. İki teknik farklı füzyon algoritmaları ile bütünleştirilerek ilgili bölgenin daha yüksek doğrulukta Sayısal Yükseklik Modeli oluşturulabilecektir.

Radargrametrik teknik ve SAR interferometri tekniği kullanılarak üretilmiş Sayısal Yükseklik Modelleri birbirine göre farklı özellikler taşımaktadırlar. Radargrametri tekniği ile üretilmiş Sayısal Yükseklik Modellerinin çözünürlükleri düşük, ortalama hata miktarı yüksekken; SAR interferometri tekniği kullanılarak üretilmiş Sayısal Yükseklik Modellerinin çözünürlükleri yüksek olup, ortalama hata değerleri düşüktür.

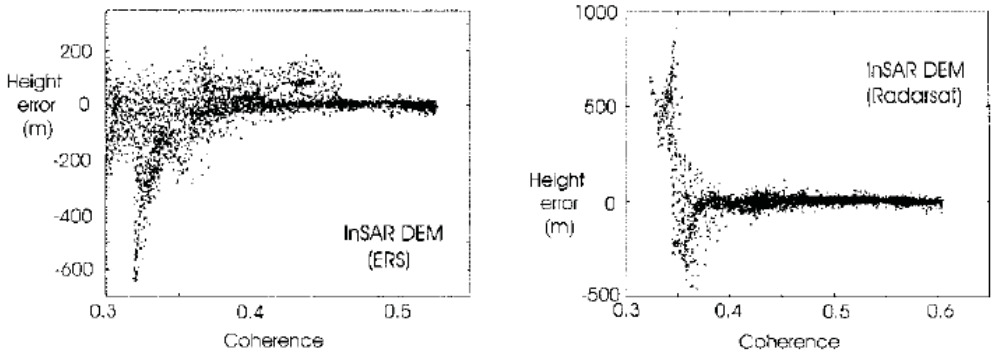
Literatürde bu tip bir karşılaştırma farklı uyduların SAR görüntüleri kullanılarak yapılmıştır. Gelautz ve arkadaşları çalışmalarında [65]; RADARSAT uydusuna ait SAR görüntülerini kullanarak bir bölgenin radargrametri (Stereo) tekniği ile Sayısal Yükseklik Modellerini üretmişlerdir. Ayrıca hem RADARSAT hem de ERS uydusuna ait aynı bölgenin SAR görüntü çiftlerini kullanarak SAR interferometri (InSAR) tekniği ile 2 adet SYM daha üretmişlerdir. Çalışmanın sonunda da her iki teknikle üretilen modelleri füzyon işlemine tabi tutmuşlardır. Şekil 4-2'de görüleceği üzere Stereo DEM yöntemi ile üretilmiş SYM'lerin yükseklik hatası interferometriye göre fazladır. Bu durum, her iki uydu için de geçerlidir ve teorik olarak beklenen bir sonuçtur.



Şekil 4-2: İnterferometri, Radargrametri ve Füzyon SYM Hata Miktarları [65]

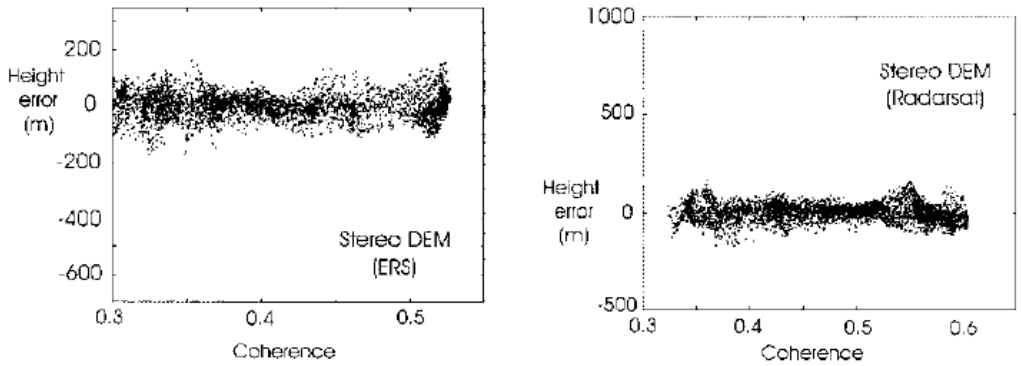
Ancak SAR interferometri tekniği kullanılarak üretilen SYM'nin çözünürlüğünün yüksek ve toplam hata miktarının düşük olmasına rağmen, katlı fazın açılmasında yaşanan zorluklar ve bu adımda karşılaşılan problemlerden dolayı bölgesel büyük hatalar olabilmektedir. Bu tip durumlarda ilgili bölgeye ait hata değeri, radargrametri tekniği ile üretilmiş SYM'deki aynı bölgenin hata değerine göre daha yüksek olmaktadır. Ayrıca SAR interferometri tekniği ile Sayısal Yükseklik Modeli oluşturulurken SAR görüntülerindeki faz bilgisini kullanılmaktadır. Ancak faz bilgisi, büyüklük bilgisine göre atmosferik etkilerden çok daha fazla etkilenmektedir. Bu sebeple iki yöntemin çıktıları

arasında birbirinden farklı hatalar bulunabilmektedir. SAR interferometri tekniği ile SYM üretimi sırasında gerçekleşen bölgesel büyük hataların sebeplerinden bir diğeri de girdi SAR görüntüleri arasındaki düşük uyum değerine sahip bölgelerdir. Hata sebebine geçmeden evvel uyum değeri konusuna değinmek gerekmektedir. Uyum değeri, sadece SAR interferometri tekniğine girdi olacak SAR görüntü çifti için anlamı olan bir kavramdır. SAR interferometri tekniğinde SAR sensörleri arası baz uzaklık, sensörlerin görüntülenen bölgeye uzaklıklarına göre oldukça küçüktür. Bu sebeple sensörlerden alınan ve çakıştırılan SAR görüntü çiftindeki tüm karşılıklı pikseller görüntülenen bölgedeki aynı noktaları (benzer bilgileri) içermektedirler. Radargrametride ise tam tersi bir durum söz konusudur. Aynı nokta iki SAR görüntüsünde farklı konumlardaki piksellerde bulunmaktadır ve bu farklılık sayesinde ilgili noktanın yükseklik bilgisi çıkarılmaktadır. Tüm bu sebeplerle SAR interferometri tekniğine girdi olan SAR görüntü çiftinde pikseller arası uyum değeri hesaplanabilir iken radargrametri tekniğine girdi olan SAR görüntü çiftinde uyum değeri hesaplamak anlamlı değildir. SAR interferometri tekniğine girdi olan SAR görüntülerinde her karşılıklı pikselin uyum değeri yüksek değildir. Uyum değerinin nasıl hesaplanacağı *2.3.5.1 Korelasyon Haritası Oluşturma* bölümünde detaylı olarak anlatılmıştır. Düşük uyum değerinin birçok sebebi bulunmaktadır. Örneğin görüntülerin alınma zamanları arasında fark bulunması durumunda uyum değeri düşük çıkan piksele denk gelen bölgede fiziksel/coğrafi değişiklikler olmuş veya ilgili bölge görüntülerden birinde bölge gölgede kalmış olabilir. Bu gibi sebeplerle uyum değeri düşük olan pikseller bulunabilmektedir. Düşük uyum değeri de ilgili pikselin faz bilgisinde de hata olabileceğine işarettir ve bu bölgelerin katlı faz açma işleminde hata yapmaya aday bölgeler olduğunu söylemek mümkündür. Nitekim Gelautz ve arkadaşları çalışmalarında bu durumu net olarak gözler önüne sermişlerdir. Çalışmada [65], her iki uydunun görüntü çiftleri için, faz uyum değeri ile üretilen yükseklik modelinin hatası grafiği çizdirilmiştir.



Şekil 4-3: İnterferometrik SYM için Uyum – Yükseklik Hatası Grafikleri [65]

Şekil 4-3'te net bir şekilde görülmektedir ki interferometrik sayısal yükseklik modellerinde girdi SAR görüntüsündeki uyum (coherence) değeri düşük olan piksellerden üretilen yükseklik değerlerindeki hata oranı fazlayken, uyum değeri yüksek olan pikseller kullanılarak üretilen yükseklik değerlerinin hata oranı ise düşüktür. Özetle; uyum değeri azaldıkça hesaplanan yükseklik bilgisindeki hata oranı artmakta, uyum değeri arttıkça hata oranı azalmaktadır. İnterferometrik yöntemin temel mantığı düşünüldüğünde bu beklenen bir sonuçtur. Çünkü pikseller arası uyum düşük olduğunda ilgili pikseller kullanılarak doğru bir yükseklik değeri hesaplamak zorlaşmaktadır.



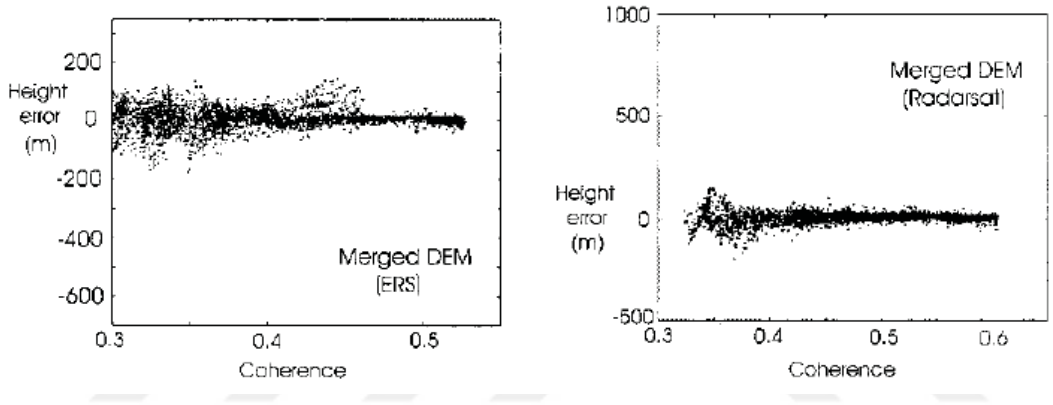
Şekil 4-4: Radargrametrik SYM için Uyum – Yükseklik Hatası Grafikleri [65]

Benzer şekilde Şekil 4-4'teki radargrametrik yöntem için SAR interferometri algoritmasına girdi olan SAR görüntülerinin uyum haritasına bakılırsa hata oranının ilgili piksellerin her iki uydudan alınmış SAR görüntü çiftleri kullanılarak oluşturulan interferometrik uyum değeri ile herhangi bir ilintisinin olmadığı net bir şekilde gözlenebilecektir. Uyum değeri düşükken veya yüksekken üretilen yükseklik değerinin hata miktarı benzer aralıkta kalmaya devam etmektedir. Bu durum beklenen bir sonuçtur. Zira interferometrik uyum değeri ile radargrametri tekniğinde hesaplanan yükseklik değerinin hehangi bir ilintisi bulunmamaktadır.

Çalışmada [65] her iki teknikle üretilen SYM'ler füzyon işlemine tabi tutulmuşlardır. Füzyon işlemi için belirlenen prosedürde interferometrik uyum haritası ve uyum değerleri baz alınmıştır. Uyum değerleri için iki adet eşik değer belirlenmiş ve bu eşik değerlerden büyük olanın üstünde uyum değerine sahip olan pikseller için SAR interferometri tekniğinin hesapladığı yükseklik bilgisi kullanılmıştır. Belirlenen eşik değerlerinden küçük olanın altında kalan uyum değerine sahip pikseller için, radargrametri tekniğinin hesapladığı yükseklik bilgisi kullanılmıştır. Böylelikle SAR interferometri tekniğine girdi olan SAR görüntülerindeki uyum değeri düşük olan piksellere denk gelen yükseklik

bilgileri radargrametriden alınmıştır. Son olarak iki eşik değerinin arasında kalan uyum değerine sahip pikseller için, her iki tekniğin hesapladığı yükseklik bilgisi ağırlıklandırılarak kullanılmıştır. Bu işlem, RADARSAT uydusuyla alınan ve radargrametrik teknik kullanılarak üretilen SYM ile hem ERS hem de RADARSAT uydularıyla alınan ve interferometrik teknik kullanılarak üretilen iki ayrı SYM için ayrı ayrı uygulanmış ve böylelikle yeni iki Füzyon Sayısal Yükseklik Modeli oluşturulmuştur.

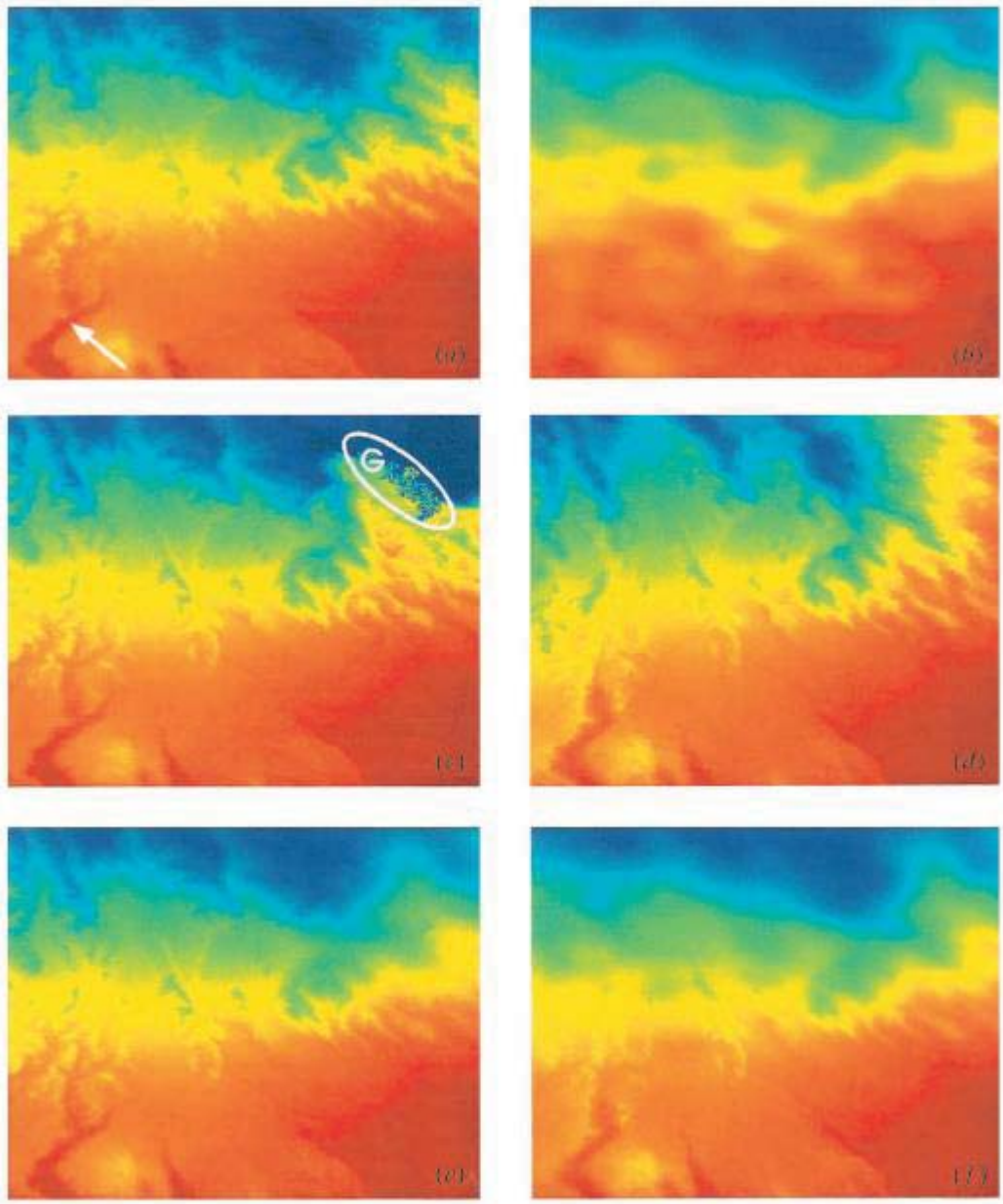
Gelautz ve arkadaşlarının interferometrik uyum değeri üzerinden iki farklı eşik belirleyerek Sayısal Yükseklik Modellerini füzyon işlemine tabi tutarak ürettikleri yeni Füzyon Sayısal Yükseklik Modellerindeki hata miktarının uyum değeri ile olan ilinti grafikleri Şekil 4-5'te verilmiştir.



Şekil 4-5. Füzyon SYM için Uyum – Yükseklik Hatası Grafikleri [65]

Üretilen Füzyon SYM'lerin uyum değeri düşük olan bölgelerde de düşük hata değerine sahip olduğu Şekil 4-5'te görülmektedir. Füzyon işlemi sonucunda SAR interferometri tekniğinin düşük uyum olan piksellerde yaptığı hata, radargrametri tekniğinin çıktısı olan SYM'den takviye alınarak azaltılmıştır. Böylelikle daha düşük ortalama hata değerine sahip yeni bir SYM elde edilmiştir. Teknikler kullanılarak üretilen SYM'ler ve füzyon işlemi sonucu üretilen yeni SYM'ler Şekil 4-6'da paylaşılmıştır. Şekil 4-6'da verilen (a) görüntüsü Spot referans Sayısal Yükseklik Modelini göstermektedir. (b) görüntüsü ise radargrametrik teknik kullanılarak üretilen SYM'dir ve kırmızı bölgelerde (Referans görüntüde (a) ok ile gösterilen detaylar) bazı kayıplar görülmektedir. (c) ve (d) görüntüleri sırasıyla RADARSAT ve ERS uydularından alınan SAR görüntülerinden SAR interferometri tekniği kullanılarak üretilen SYM'lerdir. Dikkat edilirse radargrametri çıktısı olan SYM'ye göre çok daha detaylı ve hassas modeller oluşmuştur. Ancak (c) modelinde G bölgesi diye tarif edilen bölgede birtakım bozulmalar mevcuttur.

Son olarak (e) ve (f) görüntüleri ise radargrametrik SYM ile interferometrik iki SYM'nin füzyon işlemine tabi tutulması sonucu üretilen Füzyon SYM'lerdir.



Şekil 4-6. Radargrametri ve SAR İnterfeometri SYM Çıktıları [65], (a): Spot Referans SYM, (b): RADARSAT SAR Görüntülerinden Radargrametri Tekniği ile Üretilen SYM, (c): RADARSAT SAR Görüntülerinden SAR İnterferometri Tekniği ile Üretilen SYM, (d): ERS SAR Görüntülerinden SAR İnterferometri Tekniği ile Üretilen SYM, (e): RADARSAT SAR Görüntülerinden Füzyon Sonucu Üretilen SYM, (f): RADARSAT ve ERS SAR Görüntülerinden Füzyon Sonucu Üretilen SYM

Füzyon işlemi, her iki yöntemin eksik kalan yönlerini, tekniklerin birbirini bütünleyen özelliklerini güzel bir şekilde kullanarak Şekil 4-6 (e)'de olduğu gibi çözmüştür. Ancak

Füzyon SYM'lerin bazı bölgelerinde büyük hata olmamasına rağmen çözünürlükleri azalmıştır. Bu bölgeler, genellikle radargrametri tekniği ile üretilen SYM'den alınan yükseklik bilgilerinin olduğu kısımlardır. Bu durum beklenen bir sonuçtur. Ayrıca her iki teknikle üretilen Sayısal Yükseklik Modellerinin benzer bölgeleri yüksek hatalı olabilir. Bu durumda füzyon sonucunda aynı bölge yine yüksek hatalı olacaktır. Bu tip durumların etkisini azaltmak için tez çalışması kapsamında farklı öneriler yapılmıştır.

Gelautz ve arkadaşlarının çalışması [65] SYM'lerin füzyon işlemine tabi tutulması anlamında bu tez çalışmasına ilk adım olmuştur. Zira iki farklı teknikle elde edilen iki SYM'nin nasıl bir prosedür ilke edinilerek birleştirilmesi konusunda ilham verici bir çalışmadır. Ancak çok kısıtlı bir füzyon algoritması içermektedir ve füzyon işlemi neticesinde üretilen nihai SYM halen büyük hatalar içerebilmektedir. Bu sebeple bu tez kapsamında, çeşitli füzyon algoritmaları teorik arkaplanlarıyla beraber detaylı olarak irdelenmiştir.

4.2.1. Füzyon Algoritmaları Öncesi İşlemler

Aynı bölgeye ait SAR görüntü çiftleri kullanarak iki farklı teknikle üretilen Sayısal Yükseklik Modellerini füzyon işlemine tabi tutmadan önce bazı hazırlık işlemleri yapmak gerekebilmektedir. Tekniklere girdi olan SAR görüntü çiftlerinin kendi içlerinde çözünürlükleri ve yönelimleri eşit olmaktadır fakat çiftler arası yönelimler ve çözünürlük değerleri farklılık gösterebilir. Böyle bir durumda tekniklerin çıktısı olan SYM'lerin de yönelimleri ve çözünürlükleri birbirinden farklı olacaktır. Başarılı bir füzyon işlemi için ilk olarak füzyon işlemine girdi olacak SYM'lerin oluşturulması ve daha sonra yönelim ve çözünürlüklerinin eşitlenerek hazırlanması gerekmektedir.

4.2.1.1. Çözünürlük Eşitleme

Radargrametrik teknik kullanılarak oluşturulan Sayısal Yükseklik Modeli ile SAR interferometri tekniği kullanılarak oluşturulan SYM aynı çözünürlük değerinde olmayabilir. Zira tekniklere girdi olan SAR görüntü çiftleri kendi içlerinde aynı çözünürlükte olsalar bile çiftler arası çözünürlük farkı olabilir. Böyle bir durumda füzyon algoritmalarına SYM'lerin beslenebilmesi için çözünürlükleri eşitlenmelidir. Çözünürlük eşitleme işlemi iki farklı şekilde yapılabilir. İlk alternatif, teknikler neticesinde üretilen Sayısal Yükseklik Modellerinden düşük çözünürlüklü olan üst örnekleme ile çözünürlük seviyesi arttırılarak yüksek çözünürlüklü Sayısal Yükseklik Modelinin çözünürlük seviyesi yakalanmasıdır. Diğer yol ise düşük çözünürlüklü SYM üreten teknikte

kullanılan SAR görüntü çiftinin çözünürlükleri tekniğe girdi olarak verilmeden evvel üst örnekleme ile istenen çözünürlük seviyesine çekilmesidir. Her iki seçenekte de bir interpolasyon tipi seçilerek üst örnekleme yapılacaktır. Seçilecek interpolasyon tipine göre çıktıda bazı bozucu etkiler görülmesi muhtemeldir. Örneğin üst örnekleme için Sinc interpolasyon yöntemi seçildiğinde, çıktıda "Gibbs Fenomeni" etkisi gözlemlenecektir. Bu etkiyi azaltmak için Hamming, Hanning veya Kasier pencereler kullanılması gerekmektedir. Üst örnekleme işlemi sonucunda Sayısal Yükseklik Modelleri aynı çözünürlük seviyesine gelmiş olacaklardır. Eğer tekniklerin ürettiği Sayısal Yükseklik Modellerinin veya tekniklere girdi olan SAR görüntülerinin çözünürlük seviyeleri zaten eşit ise bu çözünürlük eşitleme işlemine gerek kalmayacaktır.

4.2.1.2. Yönelim Düzeltme

Tekniklere girdi olan SAR görüntü çiftlerinin kendi içlerindeki ortak yönelimleri benzer olabilir veya tekniğin algoritmasının en başında girdi SAR görüntülerinin yönelimleri *2.3.2 SAR Görüntüleri Arasında Bilinen Açı Farkını Düzeltme* bölümünde anlatıldığı gibi ortaklanabilir. Ancak bu yönelimler teknikler bazında yani SAR görüntü çiftleri arasında birbirinden farklı olabilir. Bunun sonucunda da teknikler kullanılarak üretilecek Sayısal Yükseklik Modellerinin de yönelimleri farklılık gösterecektir. Füzyon işlemini gerçekleştirebilmek için Sayısal Yükseklik Modellerinin yönelimlerinin aynı olması gerekmektedir. Yönelim farklılığını gidermenin de tıpkı çözünürlükleri eşitlemede olduğu gibi iki yolu bulunmaktadır. İlk seçenek olarak teknikler için gereken algoritmalar çalıştırılmaya başlanmadan tekniklerde kullanılacak SAR görüntülerinin tamamının yönelimleri aynı hizaya getirebilir. Böylelikle teknikler çalıştırılıp Sayısal Yükseklik Modelleri oluşturulduğunda bu SYM'lerin her ikisi de aynı yönelimde olacaklardır. Bir diğer yol ise radargrametri tekniği kullanılarak üretilmiş Sayısal Yükseklik Modelinin yöneliminin SAR interferometri ile üretilecek olan SYM ile aynı olacak şekilde düzeltilmesidir. Eğer tekniklerin ürettiği Sayısal Yükseklik Modellerinin veya tekniklere girdi olan SAR görüntülerinin yönelimlerinde halihazırda bir fark bulunmuyorsa bu adıma gerek kalmayacaktır.

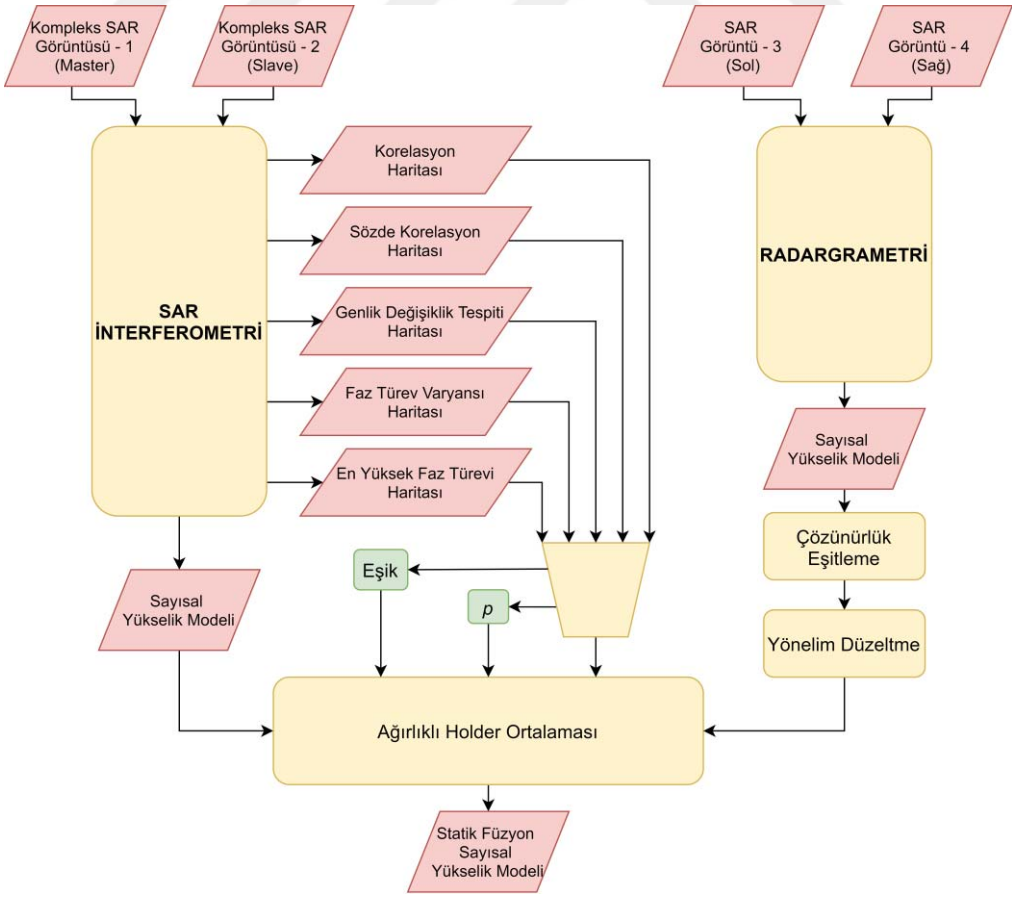
Çözünürlükleri eşitlenen ve yönelimleri ortaklanan farklı tekniklere ait çıktı Sayısal Yükseklik Modelleri böylelikle füzyon algoritmalarına girdi olarak beslenebilecek hale getirilmiş olacaktır.

Füzyon algoritmaları tıpkı Gelautz ve arkadaşlarının çalışmasında [65] olduğu gibi iki farklı tekniğin nihai çıktısı olan Sayısal Yükseklik Modellerinin farklı prosedürler uygulanarak birleştirilmesi ve yeni bir Sayısal Yükseklik Modeli üretilmesi şeklinde yapılabilir. Bu tez kapsamında bu tip geleneksel füzyon işlemine Statik Füzyon ismi verilmiştir. Ayrıca yine bu tez kapsamında Radargrametri ve SAR interferometri tekniklerinin birbirinin içine geçecek şekilde tek bir algoritma gibi çalıştırılması ve geri besleme mekanizması kullanılarak nihai tek bir adet SYM üretilmesi işlemine ise Dinamik Füzyon denilmiştir.

4.2.2. Statik Füzyon

Genel bir tanımlamayla Statik Füzyon, radargrametri ve SAR interferometri teknikleri kullanılarak üretilen Sayısal Yükseklik Modellerini girdi olarak alıp yeni bir SYM üretmeyi amaçlayan geleneksel füzyon işlemidir. Tez kapsamında farklı statik füzyon algoritmaları önerilmiştir. Bu algoritmalar, kullanılacak olan rehber haritaya, eşik değer kullanılma durumuna ve ağırlıklandırma oranına göre değişiklik gösterebilmektedir.

Statik Füzyon algoritmasına ait blok şema Şekil 4-7'de verilmiştir.



Şekil 4-7: Statik Füzyon Algoritması

SAR interferometri ve Radargrametri tekniklerinin çıktısı olan Sayısal Yükseklik Modellerini füzyon işlemine tabi tutup nihai bir SYM elde edebilmek için ilk olarak bir füzyon algoritması belirlenmelidir. Girdi SYM'lerin hangisinden ne oranda alınarak yeni SYM elde edileceği Statik Füzyon algoritmalarını oluşturmaktadır. Bunun için Gelautz ve arkadaşlarının çalışmasından [65] feyz alınarak SAR interferometri görüntü çiftinden elde edilen korelasyon haritası ve uyum değeri baz alınarak füzyon algoritmalarına kriter getirilebilir. Ancak tez kapsamında [65] numaralı çalışmadan farklı olarak diğer tüm rehber haritaların da kullanılabileceği ve tüm haritaların uyum değerlerinin kalite metriği olarak kullanılabileceği değerlendirilmiştir. Statik füzyonda kullanılmaya karar verilen harita ve kalite metriği seçimi yapıldıktan sonra metriğin nasıl ve ne oranda kullanılması gerektiği de kritik bir öneme sahiptir. Bu aşamada ise kalite metriği üzerinden bir veya daha fazla eşik değer belirlenebileceği gibi metrik değeri üzerinden girdi SYM'ler ağırlıklandırma yapılarak da statik füzyon işlemi gerçekleştirilebilir.

4.2.2.1. Eşik Değerler

Eşik değer kullanarak statik füzyon işlemi için ilk olarak SAR interferometri tekniği için bir kalite metriği seçimi yapılmalıdır. Bunun için kullanılabilecek birden fazla metrik tanımlamak mümkündür. SAR interferometri tekniği adımlarından olan harita oluşturma adımındaki her bir harita tipi bir kalite metriği olarak kullanılabilir. Ancak literatürde en çok tercih edileni uyum (coherence) değeridir. SAR interferometri tekniğine girdi olan SAR görüntü çifti kullanılarak tüm piksel değerleri için seçilen kalite metriğine uygun parametre (örneğin uyum değeri (γ) veya sözde korelasyon değeri) hesaplanır. Hesaplanan değerler 0 ile 1 arasında olacaktır. Örneğin uyum (ya da sözde korelasyon) değeri seçildiği durumda kalite metriği faz ile ilintili olacağı için SAR interferometri tekniği yüksek uyum değerinin olduğu piksellerde yüksek doğrulukta sonuç üretecektir denilebilir. Öte yandan SAR interferometrinin kalite metriğinin düşük olduğu piksellerde ise büyük hatalar yapma ihtimali fazla olacaktır. Böyle bir durumda bir eşik (γ_{th}) belirlenerek kalite metriği eşikten düşük olan piksellerde SAR interferometri tekniği ile üretilmiş SYM'nin bilgisi yerine radargrametri tekniği ile üretilmiş yükseklik bilgileri kullanılır. Böylelikle ortaya çıkacak yeni Sayısal Yükseklik Modeli SAR interferometri ve radargrametri teknikleriyle üretilmiş SYM'lerin Eşitlik 4.11'deki statik füzyon işlemiyle birleştirilmiş versiyonu olacaktır.

$$SYM_{sf}(x,y) = \begin{cases} SYM_{InSAR}(x,y) & , \quad Eğer \quad \gamma(x,y) \geq \gamma_{th} \\ SYM_{Rdrgr}(x,y) & , \quad Eğer \quad \gamma(x,y) < \gamma_{th} \end{cases} \qquad 4.11$$

Eşitlik 4.11'de belirlenen γ_{th} değişkeni tek eşiktir ve oluşturulan yeni SYM'de bu eşiğin üstünde kalite metriği olan pikseller için SAR interferometrinin ürettiği yükseklik bilgisi kullanılırken, tersi durumda radargrametri tekniğinin ürettiği yükseklik bilgisi kullanılmaktadır.

Statik Füzyonda eşik olarak tek bir değer yerine iki farklı değer de seçilebilir. Örneğin Gelautz ve arkadaşlarının çalışmasında [65] iki eşik belirlenmiş ve kalite metriği olarak da uyum değeri seçilmiştir.

$$SYM_{sf}(x,y) = \begin{cases} SYM_{InSAR}(x,y) & , \quad Eğer \quad \gamma(x,y) \geq \gamma_{th1} \\ \dfrac{\left[SYM_{InSAR}(x,y) + SYM_{Rdrgr}(x,y)\right]}{2} & , \quad Eğer \quad \gamma_{th2} \leq \gamma(x,y) < \gamma_{th1} \\ SYM_{Rdrgr}(x,y) & , \quad Eğer \quad \gamma(x,y) < \gamma_{th2} \end{cases} \qquad 4.12$$

Eşitlik 4.12'de iki eşik değer (γ_{th1}, γ_{th2}) kullanılarak statik füzyon işlemi anlatılmıştır. Bu eşik değerleri 0 ve 1 arasında iki eşik değeridir ve $\gamma_{th2} < \gamma_{th1}$ şeklindedir. Füzyon haritasını oluştururken;

- SAR interferometri uygulanan görüntü çifti kullanılarak tüm pikseller için hesaplanmış olan uyum değeri γ_{th1}'den büyük olan piksellere denk gelen yükseklik değerleri sadece interferometrik teknikle üretilmiş modelden alınır ve bu piksellerde radargrametrik yöntemle üretilmiş herhangi bir yükseklik bilgisi bulunmaz.
- Aynı şekilde interferometrik uyum değeri γ_{th2}'den küçük olan piksellerden üretilen sayısal yükseklik değerlerinde de tüm bilgi radargrametri tekniği ile üretilmiş modelden alınır ve bu pikseller için interferometrik yöntemle elde edilmiş yükseklik bilgisi hiç kullanılmaz.
- İnterferometrik uyum değeri γ_{th2} ve γ_{th1} arasında kalan pikseller için ise iki tekniğin modelleri ortaklaşa kullanılır ve her piksel için yükseklik değeri aritmetik ortalama ile hesaplanır.

Sonuç olarak her iki tekniğin bilgisini de içeren yeni bir Sayısal Yükseklik Modeli oluşturulmuş olur.

4.2.2.2. Ağırlıklandırılmış Holder Ortalaması

Radargrametri ve SAR interferometri tekniklerinin ürettikleri SYM'leri birleştirilebilmenin bir yolu da ağırlıklandırılmış Holder Ortalaması kullanmaktır. Güç ortalaması veya Holder ortalaması; aritmetik ortalama, geometrik ortalama ve harmonik ortalama gibi Pisagorik ortalamalarını, aynı tanım formülünde birleştirip kapsayan bir abstre genelleştirmedir [136].

Eğer p sıfır olmayan bir pozitif reel sayı ise, p üslü Holder ortalama Eşitlik 4.13'teki ifadeye uyan $x_1, x_2, \dots, x_n$ pozitif reel sayılarıdır.

$$M_p(x_1, x_2, \dots, x_n) = \left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i^p\right)^{1/p} \qquad 4.13$$

Eşitlik 4.13'te yer alan p parametresinin aldığı değere göre Holder ortalaması Pisagorik ortalamalara dönüşmektedir.

p parametresi $-\infty$ olursa, Holder ortalaması Eşitlik 4.14'e dönüşecektir. Eşitlik 4.14 dizideki en küçük değerin seçilmesi anlamına gelmektedir.

$$\lim_{p\to-\infty} M_p(x_1, x_2, \dots, x_n) = min\{x_1, x_2, \dots, x_n\} \qquad 4.14$$

p parametresi -1 olursa, Holder ortalaması Eşitlik 4.15'e dönüşecektir. Eşitlik 4.15 harmonik ortalamanın formülüdür.

$$M_{-1}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{1}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \dots + \frac{1}{x_n}} \qquad 4.15$$

p parametresi 0 olursa, Holder ortalaması Eşitlik 4.16'ya dönüşecektir. Eşitlik 4.16 geometrik ortalamanın formülüdür.

$$\lim_{p\to0} M_p(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sqrt[n]{x_1 x_2 \dots x_n} \qquad 4.16$$

p parametresi 1 olursa, Holder ortalaması Eşitlik 4.17'ye dönüşecektir. Eşitlik 4.17 aritmetik ortalamanın formülüdür.

$$M_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \qquad 4.17$$

p parametresi 2 olursa, Holder ortalaması Eşitlik 4.18'e dönüşecektir. Eşitlik 4.18 kuadratik ortalamanın formülüdür.

$$M_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2}{n}} \qquad 4.18$$

p parametresi ∞ olursa Holder ortalaması Eşitlik 4.19'a dönüşecektir. Eşitlik 4.19, dizideki en büyük değerin seçilmesi anlamına gelmektedir.

$$\lim_{p\to\infty} M_p(x_1, x_2, \dots, x_n) = max\{x_1, x_2, \dots, x_n\} \qquad 4.19$$

Ayrıca $x_1, x_2, \dots, x_n$ değişkenleri, toplamları 1 olacak şekilde w_i katsayılarıyla ($\sum_i w_i = 1$) ağırlıklandırılarak ağırlıklandırılmış Holder ortalaması genel formülasyonu Eşitlik 4.20'deki şekilde elde edilir.

$$M_p(x_1, x_2, \dots, x_n) = \left(\sum_{i=1}^{n} w_i x_i^p\right)^{1/p} \qquad 4.20$$

Ağırlıklandırılmış Holder ortalamalarının statik füzyon kapsamında SAR interferometri ve radargrametri tekniklerinin çıktısı olan SYM'lere uyarlanmış formülasyonları verilmiştir. Katsayı için ilk olarak bir kalite metriği seçimi yapılmalıdır. Eşik değer kullanımında olduğu gibi SAR interferometri tekniğine girdi olan SAR görüntü çifti kullanılarak tüm piksel değerleri için seçilen kalite metriği (γ) hesaplanır.

Holder ortalaması genel formülasyonu SAR interferometri ve radargametri tekniklerinin Statik Füzyonu için uyarlandığında Eşitlik 4.21 gibi olacaktır.

$$SYM_p(x, y) = \left(\gamma\left(SYM_{InSAR}(x, y)\right)^p + (1 - \gamma)\left(SYM_{Rdrgr}(x, y)\right)^p\right)^{1/p} \qquad 4.21$$

Eşitlik 4.21'de belirlenmiş bir eşik değeri bulunmamaktadır. Bunun yerine belirlenen kalite metriği (γ) değeri belirleyici kriterdir. Bu değer yüksek oldukça füzyon sonucu üretilen modele interferometri daha fazla katkı verecektir. Aksine kalite metriği değeri düşükken radargrametri tekniği ile üretilmiş SYM'nin yükseklik bilgisi füzyon işleminde daha fazla kullanılacaktır.

Eşitlik 4.21'de yer alan p parametresinin aldığı değere göre ağırlıklandırılmış Holder ortalaması Pisagorik ortalamalara dönüşecek ve farklı Statik Füzyon formülleri oluşacaktr.

p parametresi $-\infty$ olursa, Statik Füzyon formülü Eşitlik 4.22'e dönüşecektir. Eşitlik 4.22, SYM değerlerinin kalite metriği çarpımından sonra çıkan değerler arasından küçük olanın seçilmesi anlamına gelmektedir.

$$SYM_{p\to-\infty}(x,y) = min\{SYM_{InSAR}(x,y), SYM_{Rdrgr}(x,y)\} \quad 4.22$$

p parametresi -1 olursa, Statik Füzyon formülü Eşitlik 4.23'ye dönüşecektir. Eşitlik 4.23 harmonik ortalamanın formülüdür. Tekniklerin çıktısı olan SYM'lerin harmonik ortalaması hesaplanarak nihai SYM değerleri belirlenecektir.

$$SYM_{p=-1}(x,y) = \frac{1}{\frac{\gamma}{SYM_{InSAR}(x,y)} + \frac{(1-\gamma)}{SYM_{Rdrgr}(x,y)}} \quad 4.23$$

p parametresi 0 olursa, Statik Füzyon formülü Eşitlik 4.24'e dönüşecektir. Eşitlik 4.24 geometrik ortalamanın formülüdür. Statik füzyon algoritmasına girdi olan SYM'ler kalite metriği ile ağırlıklandırıldıktan sonra geometrik ortalamaları hesaplanarak nihai SYM üretilecektir.

$$SYM_{p=0}(x,y) = SYM_{InSAR}(x,y)^{\gamma} SYM_{Rdrgr}(x,y)^{(1-\gamma)} \quad 4.24$$

p parametresi 1 olursa, Statik Füzyon formülü Eşitlik 4.25'e dönüşecektir. Eşitlik 4.25 aritmetik ortalamanın formülüdür. En çok kabul gören ve uygulanan formüldür.

$$SYM_{p=1}(x,y) = \gamma SYM_{InSAR}(x,y) + (1-\gamma) SYM_{Rdrgr}(x,y) \quad 4.25$$

p parametresi 2 olursa, Statik Füzyon formülü Eşitlik 4.26'e dönüşecektir. Eşitlik 4.26 kuadratik ortalamanın formülüdür.

$$SYM_{p=2}(x,y) = \sqrt{\gamma SYM_{InSAR}(x,y)^2 + (1-\gamma) SYM_{Rdrgr}(x,y)^2} \quad 4.26$$

p parametresi ∞ olursa Statik Füzyon formülü Eşitlik 4.27'ya dönüşecektir. Eşitlik 4.27, SYM değerlerinin kalite metriği çarpımından sonra çıkan değerler arasından büyük olanın seçilmesi anlamına gelmektedir.

$$SYM_{p\to+\infty}(x,y) = max\{SYM_{InSAR}(x,y), SYM_{Rdrgr}(x,y)\} \quad 4.27$$

Ağırlıklandırma, her iki teknikle üretilmiş yükseklik modellerinin harmanlaması gibi olmaktadır. Bu açıdan füzyon sonucu üretilmiş SYM'de inişli çıkışlı bir topoğrafya

bulunması muhtemeldir. Zira kalite metriği değeri değişken olabilmektedir. Bu sebeple Statik Füzyon işlemi yapmadan evvel rehber harita oluşturulmalı ve haritadaki piksellerin değerlerine bakılmalıdır.

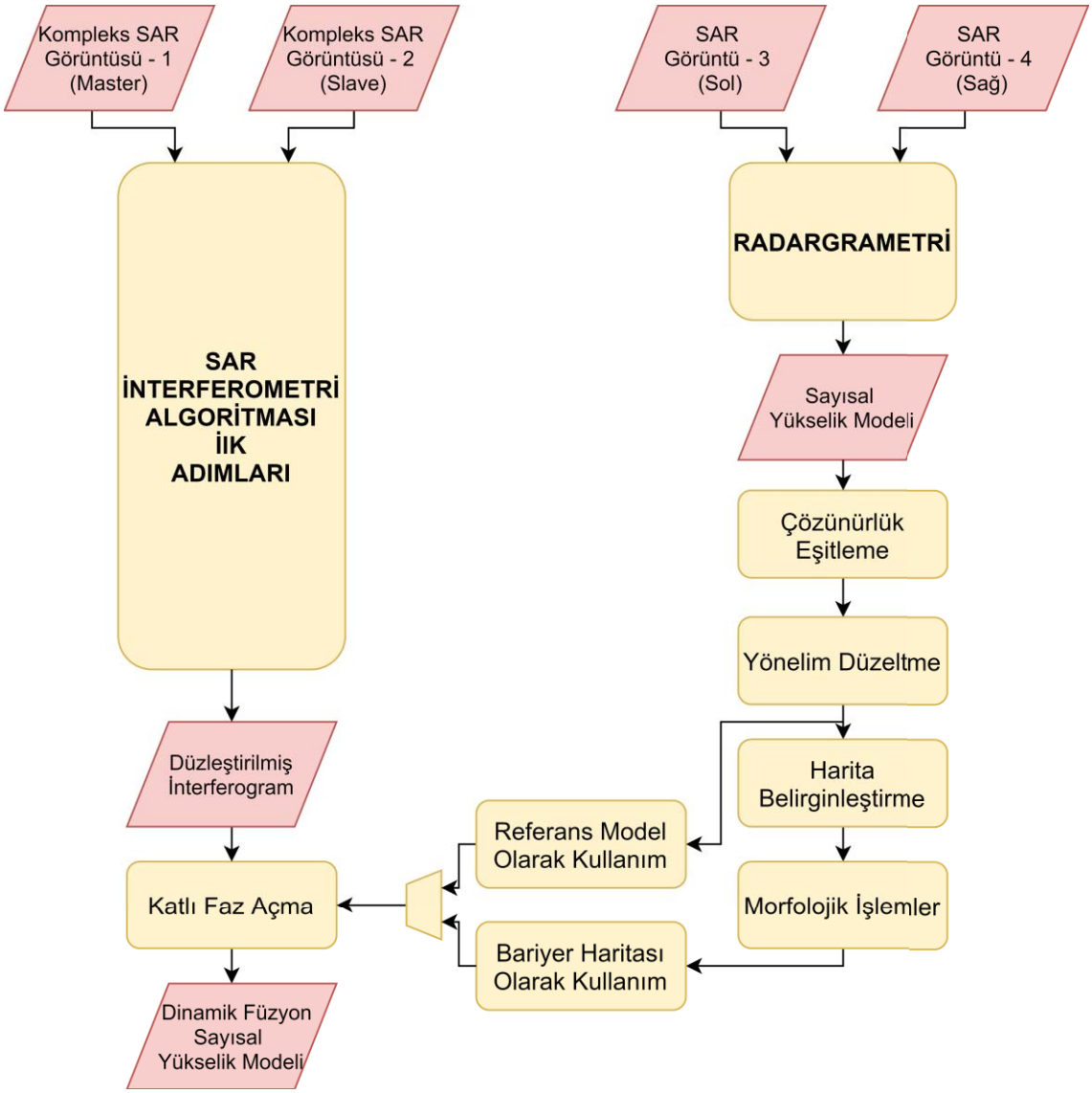
4.2.2.3. Farklı Kalite Metrikleri Kullanılarak Statik Füzyon

Statik füzyon işlemi için SYM'lerin nasıl birleştirileceği ile ilgili kalite metriği olarak farklı seçenekler de tercih edilebilir. Uyum değeri, en sık tercih edilen kalite metriği olsa da sözde korelasyon değeri veya faz türevi istatistikleri (en yüksek değeri, en küçük değeri, medyanı, ortalaması, varyansı) gibi metrikler de kullanılabilir. Uyum değeri ilgili piksellere ait hem faz hem de genlik bilgisi içerirken, örneğin sözde korelasyon değeri sadece faz ile ilgili bilgi taşımaktadır. Bu sebeple tercih edilme sebebi olabilir. Öte yandan genlik değişiklik haritası üretirken kullandığımız sadece genlik bilgisinin yer aldığı kalite metrikleri de tercih edilebilir.

4.2.3. Dinamik Füzyon

Füzyon işlemi sadece yöntemlerin nihai çıktılarını birleştirmede kullanılmaz. Kanaatimizce yöntemlerin problematik adımlarının çözülmesinde teknikler, birbirlerine faydalı olabilecek ara adım kontrol noktaları ve geri besleme mekanizmaları olarak da kullanılabilirler. Bu sebeple burada statik füzyon yerine dinamik bir füzyon işleminden de bahsetmek mümkün olabilir. Detaylandırmak gerekirse radargrametrik teknik ile üretilen Sayısal Yükseklik Modellerinin hataları SAR interferometri ile üretilenlere göre daha yüksek olsa bile piksellerin uyum değerinden bağımsız olarak modeldeki hatanın tüm modele homojen olarak dağıldığı gözlenmektedir (Bkz. Şekil 4-4). Ancak SAR interferometri yöntemiyle üretilen Sayısal Yükseklik Modelleri, çözünürlükleri yüksek olmasına rağmen uyum değerinin düşük olduğu piksellere denk gelen bölgelerde ve düşük uyum değeri gibi sebeplerle katlı fazın hatalı açıldığı alanlarda çok ciddi hatalar barındırmaktadır (Bkz. Şekil 4-3). Ayrıca özellikle katlı faz açma problemi ile karşılaşılmaktadır. Katlı faz açma adımında yapılacak hatalar, SAR interferometri algoritmasının üreteceği Sayısal Yükseklik Modellerinin de bölgesel olarak hatalı olmasına sebep olmaktadır. Özetle SAR interferometi tekniği ile üretilmiş yükseklik modelinde hata üretilen yükseklik modeline homojen dağılmamıştır. Bölgesel hatalar mevcuttur ve ilgili bölgede yapılan hata radargrametride olduğu gibi modelin genelinde olan ortalamada değildir ve büyük miktardadır. Bu bölgelerin tespit edilip ilgili bölgeye ait yükseklik bilgisinin radargrametri tekniği ile üretilmiş yükseklik modelinden alınması

statik füzyonun konusudur. Dinamik füzyonda ise radargrametri ile üretilmiş Sayısal Yükseklik Modeli rehber olarak kullanılıp SAR interferometri tekniğinde yapılan büyük hataların daha üretilmeden önlenmesi amaçlanmaktadır. Bu şekilde daha yüksek çözünürlükte ve yüksek hatalı bölgesel alanların olmadığı bir yükseklik modeli oluşturulacaktır.



Şekil 4-8: Dinamik Füzyon Algoritması

Dinamik füzyon algoritmasında Şekil 4-8'den de görüleceği üzere ilk olarak radargrametri tekniği kullanılarak Sayısal Yükseklik Modeli oluşturulmalıdır. Üretilen radargrametrik SYM, SAR interferometri tekniğine beslenmeden önce statik füzyon algoritmasında da olduğu gibi çözünürlük eşitleme ve yönelim düzeltme adımlarından geçmelidir. Çözünürlüğü SAR interferometri ile eşitlenen, yönelimi yine SAR interferometri tekniği ile ortaklanan radargramterik SYM, SAR interferometri algoritmasına besleniken iki farklı dinamik füzyon algoritması uygulanabilir. Bunlardan

ilki, SAR interferometri tekniğinin katlı faz açma adımında kullanılan Yol İzleme tabanlı yöntemler için rehber harita olarak kullanılmasıdır. Bu algoritmada Radargrametrik SYM birtakım ön işlemlerden geçirilerek bi nevi rehber harita gibi görev alacaktır. Katlı fazın açılması esnasında izlenecek yolun belirlenmesini sağlayacaktır. Bunun için katlı faz açma algoritmalarına beslenmeden evvel SAR interferometri algoritmasında da kullanılan harita belirginleştirme yöntemleri ve sonrasında da morfolojik işlemlerle radargrametrik SYM üzerindeki keskin ve belirgin bölgeleri ön plana çıkartılacaktır. Katlı faz açma işlemi esnasında bu bilgiler kullanılarak doğacak hatalar yapılmadan önlenecektir. İkinci dinamik füzyon algoritmasında ise SAR interferometri tekniğinin katlı faz açma bloğunda radargrametrik teknik ile üretilmiş Sayısal Yükseklik Modeli bir çeşit referans kabul edilerek fazın açılması aşamasında bu referans modelden yararlanılacaktır. Bu yaklaşımda, radargrametri tekniği kullanılarak üretilen SYM'deki hatanın haritanın tamamında belli ve çok değişkenlik göstermeyen bir seviyede olmasından yararlanılmıştır. Böylelikle katlı faz açma adımında yapılması muhtemel bölgesel ama büyük hatalar yapılmadan önlenebilecektir. Dinamik füzyon algoritmalarının her ikisinde de radargrametri tekniğinin ürettiği SYM'den yararlanılarak ve SAR interferometri tekniği kullanılarak üretilen nihai bir SYM bulunmaktadır. Bu yönüyle dinamik füzyon algoritmaları, geleneksel füzyon yaklaşımından ayrılmaktadır.

4.2.3.1. Yol İzleme Yaklaşımına Dayalı KFA Yöntemleri için Bariyer Belirleme

Dinamik füzyon algoritmalarının ilki, Yol izleme yaklaşımına dayalı katlı faz açma yöntemlerinde rehber harita olarak radargrametrik SYM'nin kullanılmasıdır. Yol izleme metoduna dayalı katlı faz açma algoritmaları, katlı fazın açılmasına hangi pikselden başlanıp nasıl bir yol izlenerek faz açma işleminin devam edeceğine dair belli kurallar koyarak Sayısal Yükseklik Modelini oluşturan algoritmalardır. Bu kuralları koyarken rehber haritalardan yararlanan türleri olduğu gibi rehber harita kullanmayan algoritmalar da mevcuttur. Katlı fazı açarken izlenecek yol, oluşturulacak yükseklik modeli için çok kritik bir öneme sahiptir. Bu sebeple Yol İzleme tabanlı birçok kalı faz açma algoritması geliştirilmiştir. *2.3.7.4.1.1. Yol İzleme Tabanlı Yöntemler* bölümünde bu algoritmaların tüm detayları anlatılmaktadır. Yol izleme yöntemine dayalı katlı faz açma algoritmaları hatalı bariyerler (branch-cut veya mak-cut) oluşturduklarında ya da katlı fazı açarken izledikleri yol hatalı belirlendiğinde açılan fazda da ciddi hatalar meydana gelebilmektedir. Zaten bu hataları asgari seviyeye indirmek için bazı algoritmalarda rehber haritalar kullanılmaktadır. Ancak, bu sefer de algoritmanın performansı tamamen

rehber haritaya bağımlı hale gelmektedir. Dinamik füzyon algoritmasında ise radargrametri tekniği kullanılarak üretilen Sayısal Yükseklik Modeli kullanılarak bu tip hatalar azaltılmaya çalışılmıştır. Dinamik füzyon algoritmasının SAR interferometriye besleme aşamasında yapılacak işlemler sonucunda yol izleme metoduna dayalı yöntemlerde yer alan kalıntı haritasında bir filtreleme yapılmış olacaktır. Çünkü bariyerlerin konulması gereken yerlere radargrametrik SYM kullanılarak karar verilmiş olacak ve böylelikle kalıntıların bazıları elenecektir. Daha sonra izlenecek yol bu bariyerlerden geçmeyecek şekilde kullanılan rehber haritayla birlikte çizilecektir. Bu şekilde halihazırda radargrametri tekniği kullanılarak üretilen SYM sayesinde üretilecek SYM ile ilgili bir nevi kaba ön bilgiye sahip olunacak ve yol izleme yöntemine dayalı algoritmalar daha gürbüz çalışır hale getirilecektir.

4.2.3.1.1. Radargrametrik SYM'nin Belirginleştirilmesi

Bu işlem için ilk olarak radargrametri tekniği kullanılarak oluşturulmuş Sayısal Yükseklik Modeli *2.3.6 Harita Belirginleştirme* adımındaki yöntemler kullanılarak belirginleştirilir. Bu işlemler sonucunda SYM üzerindeki ani yükselişler ve kırılmalar daha belirgin hale gelecektir.

4.2.3.1.2. Kenar/Köşe Bulma Algoritmaları ve Morfolojik İşlemler

Belirginleştirme algoritmalarından çıkan SYM, kenar bulma algoritmaları ve morfolojik işlemler uygulanarak bariyerlerin denk geleceği pikseller belirlenir. Böylelikle Goldstein Branch-cut ve Mask-cut algoritmalarının en önemli parçasını oluşturan bariyer üretme adımı radargrametrik SYM'den gelen bilgi ile tamamlanmış olacaktır. Bu aşamadan sonra iki seçenek mümkündür. Bu alternatiflerden ilki rastgele bir nokta seçip katlı fazın bariyerleri kesmeyecek şekilde rastgele bir yol izlenerek tıpkı Goldstein algoritmasındaki gibi açılmasıdır. Herhangi bir rehber harita ya da kalite metriğine ihtiyaç bulunmamaktadır. İkinci alternatif ise çakıştırılmış SAR görüntüleri kullanılarak üretilen rehber haritalardan birinin metriği esas alınıp katlı faz açmaya hangi pikselden başlanacağına ve bariyerleri kesmeyecek şekilde hangi pikselden devam edeceğine Mask-Cut algoritmasındaki gibi karar verilmesidir. Bu tip bir durumda rehber olarak kullanılan haritanın güvenilirliği kritik öneme sahiptir. Genellikle kalite metriği olarak uyum değeri seçilse de sözde korelasyon ve faz türev varyansı gibi diğer kalite metriklerinin de denenmesi yararlı olacaktır.

Sonuç olarak; rastgele veya önceden belirlenen bir pikselden başlanarak, rehber harita metrik değerine göre ve radargrametrik SYM kullanılarak çizilen bariyerleri kesmeyecek şekilde bir yol izlenerek katlı faz açılıp nihai Sayısal Yükseklik Modeli oluşturulacaktır.

4.2.3.2. Tüm KFA Yöntemleri için Referans Özelliği

Radargrametrik yöntem kullanılarak üretilen Sayısal Yükseklik Modeli, SAR interferometri ile üretilen SYM'lere göre daha düşük çözünürlükte olmasına rağmen modelin geneline çoğunlukla homojen olarak yayılmış belirli bir ortalama hata seviyesinde olduğu için SAR interferometri tekniği ile yükseklik modeli üretmek için bir referans niteliği taşımaktadır. Zira SAR interferometri tekniğinde katlı fazı açma adımında ani yükselişlerin, uçurumların veya bina gibi insan yapılarının olduğu piksellerde büyük hatalar yapılmaktadır. Benzer hatalar, iki SAR görüntüsü alınma tarihleri arasında fark olduğu durumlarda arazideki değişikliklerden dolayı meydana gelen düşük uyum değerinin olduğu piksellerde de görülmektedir. Ancak radargrametri tekniği bu tip durumlardan etkilenmemektedir. Zira bu durumlar faz ile ilintilidir ve fazdaki büyük atlamalar katlı fazın açılması esnasında doğru kestirilememektedir. SAR görüntülerinin alınma tarihleri arasındaki zaman farklı ve böylelikle görüntülenen bölgedeki değişiklikler de görüntüler arası faz farkının olması gerekenden farklılaşmasına sebep olmaktadır. Radargrametri tekniği faz bilgisini kullanmadığı için bu tip durumlar sorun olmamaktadır. Bunun sonucunda da radargrametrik SYM'de hata miktarı genel olarak SAR interferometriye göre yüksek olsa bile model genelinde hep belli bir seviyede kalmaktadır. Bu sebeple SAR interferometri tekniğinde katlı faz açma işlemi yapılırken yapılan hata miktarını belirli bir seviyede tutabilmek için referans olarak radargrametrik SYM kullanılacak ve üretilecek SYM dinamik füzyon çıktısı olacaktır. Çünkü SAR interferometri tekniğinde katlı fazı açarken yapılan büyük hatalar radargrametrik SYM sayesinde belli bi seviyede tutulacaktır. Bu işlem için radargrametrik SYM'nin yükseklik değerleri üzerinde yüzdesel bir eşik belirlenecektir. Belirlenen yüzdesel eşik, radargrametrik SYM'nin her pikseli için bir alt ve üst limit belirlemiş olacaktır. SAR interferometri tekniğinde açılan katlı faz sonucunda çıkan yükseklik değeri ilgili pikselin yüzdesel eşik yardımıyla belirlenen seviyeyi geçtiği ya da seviyenin altında kaldığı durumlarda geri besleme mekanizması tetik alarak hata büyümeden fazın açılması işlemini uyaracaktır. Böylelikle referans olarak alınan radargrametrik SYM sayesinde katlı faz açma algoritması kontrol edilebilmiş olacaktır. SAR interferometri tekniğinin en

problemli ve en zor adımı böylece kontrollü olarak çalıştırılacak ve hata miktarı hep belirli bir seviyede tutulacaktır.

Radargrametrik SYM'nin tüm katlı faz yöntemleri için referans niteliğinde kullanıldığı dinamik füzyon algoritmasıyla SYM oluşturulurken;

1. SAR interferometri algoritmasında herhangi bir kalıntı haritası çıkarılmaz veya bariyerler üretilmez.
2. Düzleştirilmiş interferogram üzerindeki herhangi bir pikselden katlı faz açılmaya başlanabilir.
3. Başlangıç pikselinin indisi için radargrametri çıktısı SYM'de ilgili piksel merkezde olacak şekilde [3x3]'lik bir pencere içinde en yüksek (φ_{rdr}^{max}) ve en düşük (φ_{rdr}^{min}) değerler hesaplanır.
4. Başlangıç pikselinin katlı faz değeri ile radargrametrik SYM'de hesaplanan en küçük değer ve en büyük değer kıyaslanır.
   a. İlgili pikselin fazı 4. Adımdaki kıyaslamaya göre 2π arttırılır. Eşitsizlik 4.28'deki denklem sağlanıncaya kadar faz açma işlemine iteratif olarak devam edilir. Diğer bir deyişle hesaplanan en küçük değerin π kadar eksiğinden büyük olana kadar ve hesaplanan en büyük değerin π kadar fazlasından küçük olana kadar iteratif olarak işleme devam edilir. Aralığa girdiğinde aldığı değer nihai açılmış faz değeri olarak belirlenir.

$$\varphi_{rdr}^{min} - \pi \leq \varphi^{uw} \leq \varphi_{rdr}^{max} + \pi \qquad 4.28$$

   b. Veya ilgili piksel için açılmış faz değeri, Eşitlik 4.29'deki gibi radargrametri çıktısı SYM'deki ilgili pencere içerisindeki en yüksek değer olarak belirlenir.

$$\varphi^{uw} = \varphi_{rdr}^{max} \qquad 4.29$$

5. Karşılaştırma sonucunda eğer açılan katlı faz değeri ilgili aralıkta değil ise katlı fazın hatalı açıldığı değerlendirilir. Dördüncü adım tekrarlanır.

Faz değerinin belirlendiği dördüncü adımda yer alan her iki seçimde de radargrametri çıktısı SYM, SAR interferometri tekniğinin çıktısı olan açılmış faz değeri için bir sınır belirlemektedir. Bu sayede SAR interferometri tekniğinin bölgesel büyük hatalar yapması engellenmektedir.

Bu bölümde genel prensipleri anlatılan statik ve dinamik füzyon algoritmalarının çalışma prensipleri ve uygun örnekleri, algoritma çıktılarıyla beraber *5. BENZETİM ÇALIŞMALARI ve UYGULAMALAR* bölümünde sunulmuştur.

4.3. Statik Füzyon - Dinamik Füzyon Karşılatırması

Eşik değerler kullanılan statik füzyon algoritması ile oluşturulmuş Sayısal Yükseklik Modelinin belirli bölgeleri sadece interferometrik SAR yükseklik modelinden belirli bölgeleri de sadece radargrametrik yükseklik modelinden geldiği için üretilen füzyon haritasında her bölge için hata miktarı değişkenlik arz edecektir. Ayrıca eğer tekniklerin çıktısı olan yükseklik modellerinin çözünürlük seviyeleri aynı değilse (her ne kadar çözünürlük eşitleme yapılmış olsa bile) füzyon haritası içerisinde farklı çözünürlük seviyesinde bölgeler olacaktır. Ağırlıklandırılmış Holder Ortalaması ile Statik Füzyonda da hangi tekniğin Sayısal Yükseklik Modelinden hangi oranda alınarak nihai SYM oluşturulacağına büyük oranda metrik değeri karar vermektedir. Bu da seçilen haritanın ne kadar kaliteli ve anlamlı olduğuna bağlıdır.

Öte yandan, dinamik füzyonda oluşturulan nihai Sayısal Yükseklik Modeli aslında SAR interferometri tekniği kullanılarak üretilmiş bir SYM olacağı için tamamen yüksek çözünürlükte olacaktır. Ayrıca radargrametrik SYM referans olarak kullanıldığı için sadece SAR interferometri kullanılarak üretilen SYM'lerin bölgesel yüksek hatalı kısımlarını barındırmayacaktır. Bu da dinamik füzyon algoritmalarını, geleneksel füzyon algorimalarına ve tez kapsamında ele alınan statik füzyon algoritmalarına göre avantajlı kılmaktadır.

5. BENZETİM ÇALIŞMALARI ve UYGULAMALAR

5.1. Tezde Kullanılan SAR Görüntüleri

5.1.1. Gerçek SAR Görüntüleri

Tez çalışmasında açık kaynaklarda [81], [134], [135] yer alan gerçek SAR görüntüleri kullanılarak Sayısal Yükseklik Modeli oluşturan algoritmalar çalışılmıştır.

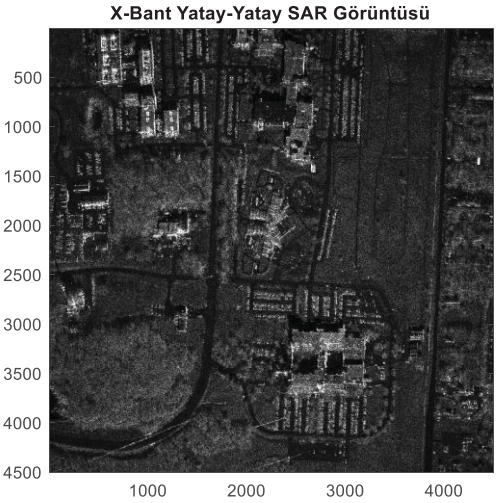
5.1.1.1. AFRL SAR Görüntüleri

AFRL (Air Force Research Laboratory), ABD Hava Kuvvetleri tarafından işletilen bir Hava Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarı'dır. AFRL, Havacılık ve uzay savaşı teknolojilerinin keşfedilmesine, geliştirilmesine ve entegrasyonuna öncülük etmeye yönelik bilimsel araştırma yapan bir kuruluştur. Hava Kuvvetleri bilim ve teknoloji programının planlanması faaliyetlerini de yürütür. AFRL, Amerika Birleşik Devletleri'ne hava, uzay ve siber tehditlere karşı mücadele yetenekleri sağlamaktadır [133].

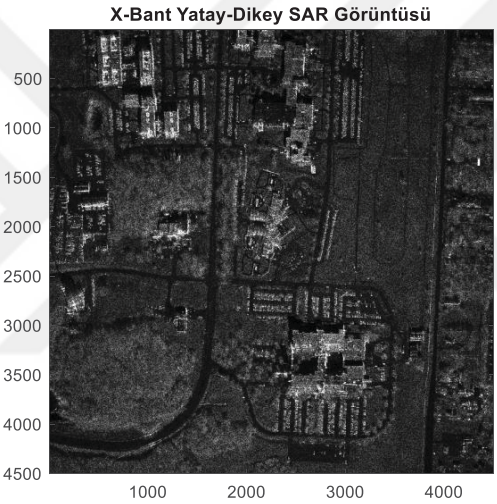
AFRL tarafından sağlanan ve tez çalışmasının teorik kısımlar anlatılırken örnek şekil vermek için faydalanılan görüntüler, X-bant SAR sensörü ile alınmış kompleks SAR imgeleridir. SAR verilerine [81]'de verilen bağlantıdan ulaşılabilmektedir. [82]'de görüntüler kullanılarak, korelasyon haritası üzerinden faz uyumlu değişiklik tespiti ve genlik bazlı değişiklik tespiti uygulamalarına yönelik çalışmalar yapılmıştır. İmgelerin elde edildiği sahnede birden fazla bina, araç ve ağaçlık alanlar vardır.

SAR sensörü, 640 MHz bant genişliğinde, 0,25 m eğim mesafesine sahip olup 9.6 GHz merkez frekansında çalışmaktadır. SAR sensörü, imgelenen sahne merkezine 45 derece alçalış açısına sahip olacak şekilde hava platformuna yerleştirilmiştir.

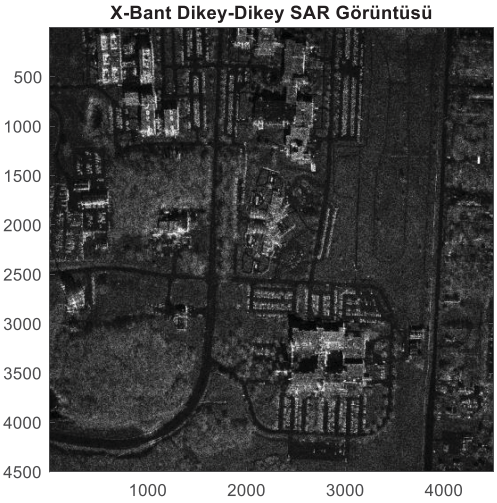
Üç farklı polarizasyonda alınmış ve her polarizasyon için 10 SAR görüntüsü olmak üzere toplam 30 SAR görüntüsü mevcuttur. X-Bant SAR sensörü ile alınmış Şekil 5-1'deki Yatay-Yatay (YY), Şekil 5-2'deki Yatay-Dikey (YD) ve Şekil 5-3'teki Dikey-Dikey (DD) olmak üzere üç farklı polarizasyonda görüntüler bulunmaktadır. Görüntülerin hepsi çok iyi çakıştırılmış durumdadır. Buna rağmen çakıştırma adımı görüntüler için tekrar çalıştırıldığında herhangi bir kaydırma işlemi gerektirecek bir sonuç alınamamaktadır ve sağlaması bu şekilde yapılabilmektedir. Görüntüler, ".mat" formatındadır. Böylelikle Matlab benzetim ortamında çok kolay bir şekilde açılıp çalıştırılabilmeye uygundur.



Şekil 5-1: X-Bant Yatay-Yatay AFRL SAR Görüntüsü



Şekil 5-2: X-Bant Yatay-Dikey AFRL SAR Görüntüsü

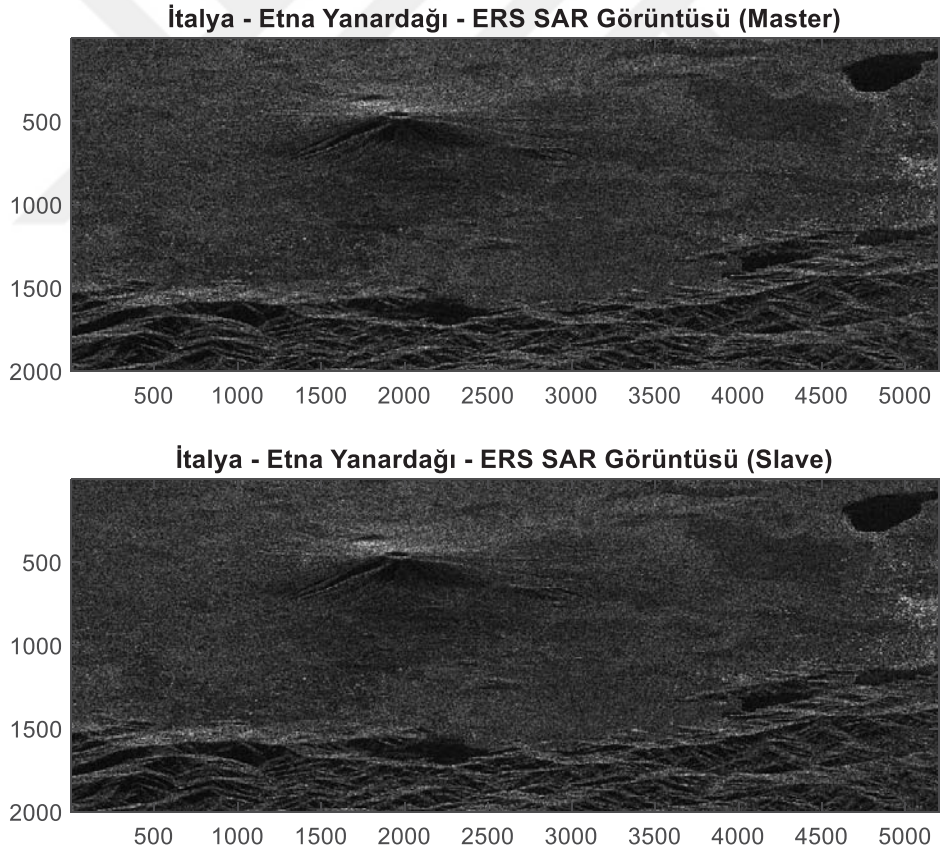


Şekil 5-3: X-Bant Dikey-Dikey AFRL SAR Görüntüsü

5.1.1.2. ERS Uydusu SAR Görüntüleri

ERS-1 uydusu, Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından 1991 yılında gönderilmiş bir uydudur. ERS-1 30 metre çözünürlüğe sahiptir ve 2000 yılına kadar görüntü sağlamıştır. 1995 yılında yine ESA tarafından ERS-1 ile aynı özelliklere sahip ERS-2 uydusu hazırlanmıştır. Bir gün arayla aynı bölgeden geçecek şekilde fırlatılan aynı özelliklere sahip ERS-2 uydusuyla "TANDEM Mission" denilen bir yöntem kullanılmıştır. Sadece bu uydular ile sağlanan tandem SYM ile diğer uydular ile üretilen SYM'lerine göre daha doğru sonuç vermektedir [69].

Tez kapsamında İtalya'daki Etna Yanardağının ERS uyduları ile alınmış iki SAR görüntüsü kullanılmıştır. SAR görüntüleri [134]'ten indirilmiştir. Şekil 5-4'teki SAR görüntü çifti kullanılarak SAR interferometri tekniği ile Sayısal Yükseklik Modeli oluşturulması çalışılmıştır. Katlı fazı açma algoritmalarını karşılaştırmak ve süre analizlerini yapmak açısından oldukça kullanışlı SAR görüntüleridir.



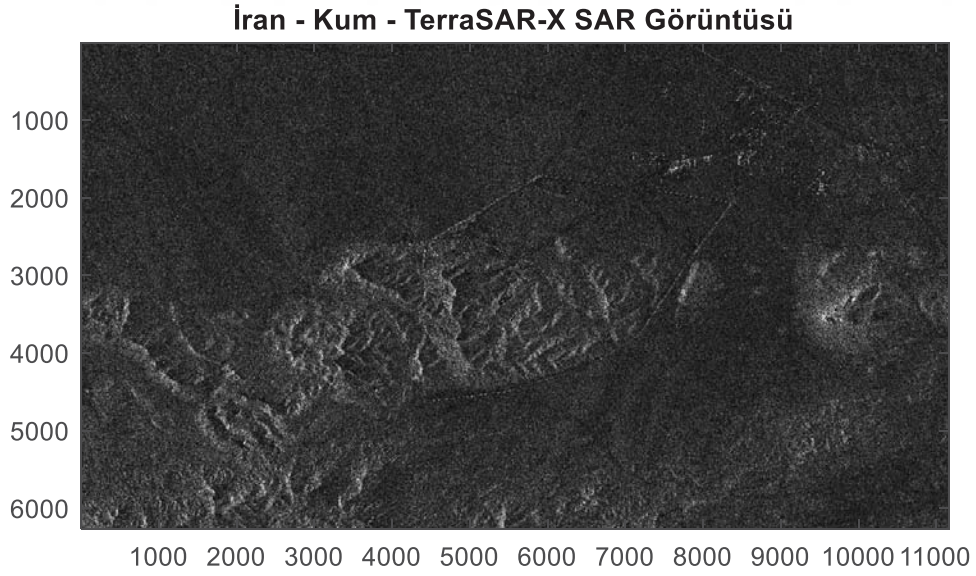
Şekil 5-4: SAR Görüntü Çifti (Master-Slave) (ERS Uydusu - İtalya/Etna)

5.1.1.3. TerraSAR-X Uydusu SAR Görüntüleri

TerraSAR-X, Almanya Uzay Ajansı (DLR) ile EADS Astrium firması tarafından kamu-özel ortaklığında işletilen bir dünya gözlem uydusudur. Haziran 2007'de TerraSAR-X, Ocak 2008'de ise ikiz uydusu olan Tandem-X operasyonel olarak çalışmaya başlamıştır.

TerraSAR-X, 9.6 GHz frekansında 31mm dalga boyunda sinyaller üretmektedir. Uydu görüntülerinin radyometrik kalibrasyonu mükemmel ve geometrik hassasiyeti ise diğer tüm uydulardan çok daha iyidir. Çözünürlüğü 1 metre altındadır [135].

TerraSAR-X uydusu ikiz uydusu olan Tandem-X ile beraber Korelasyon Haritası üzerinden değişiklik tespiti uygulamaları ve SAR interferometri tekniği ile Sayısal Yükseklik Modeli üretebilmek için çok uygun SAR görüntü çiftleri üretmektedir. SAR görüntülerinin bir kısmı akademik amaçlı çalışmalar için [135]'teki bağlantıdan erişilebilir durumdadır. Görüntüler CoSAR formatındadır. İçerisinden kompleks SAR görüntü verisini çekmek hazır programlar kullanılmadığı sürece oldukça zahmetlidir. Bunun için tez kapsamında hazır bir araç kullanılmıştır. Bu araç tez kapsamında geliştirilen kullanıcı arayüzüne entegre edilerek çalıştırılabilmektedir. Böylelikle CoSAR formatındaki veri, metadata ve SAR görüntüsü olarak ayırt edilebilmektedir.



Şekil 5-5: SAR Görüntüsü (TerraSAR-X - İran/Kum)

İran'ın Kum şehrine ait Şekil 5-5'teki gibi 2 SAR görüntüsü bulunmaktadır. Görüntüler YY polarizasyonda alınmış tek bakışlı kompleks SAR görüntüleridir.

5.1.1.4. RADARSAT Uydusu SAR Görüntüleri

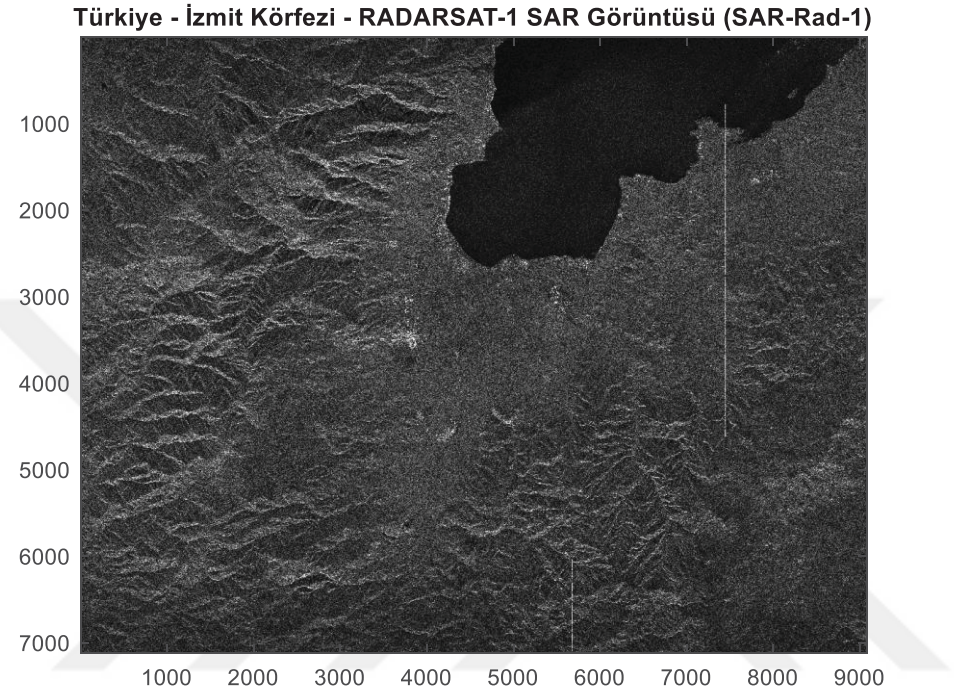
Kasım 1995'te CCRS tarafından fırlatılan RADARSAT-1 Kanada'nın ilk yer gözlem uydusudur. RADARSAT ile alınan görüntüler, buzul, deniz görüntüleme, jeoloji ve jeolojik risklerin görüntülenmesi, tarım, kartoğrafya, hidroloji, orman ve harita üretimi gibi alanlarda kullanılmaktadır. RADARSAT, aktif bir uzaktan algılama sistemi olan Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) algılayıcısına sahiptir. Elektromanyetik dalganın dalga boyu 5.6cm ve frekansı da 5.3 GHz'dir ve lineer polarizasyonludur. Aktif bir sistem olduğu için gönderilen ve alınan enerji, karanlık, bulut, yağmur, kar, pus ve sis gibi koşullardan etkilenmemekte ve her türlü atmosferik ortamda veri toplamaya olanak sağlamaktadır. Güneş eşzamanlı yol alan RADARSAT dünya yüzeyinden yaklaşık 800km yükseklikte bir yörüngededir. Yörünge periyodu 101 dakikadır ve günde 14 defa olmak üzere dünyayı tarar. Aynı bölgeden (aynı ışın modunda, aynı ışın konumunda, aynı coğrafi konumda) geçişi ise 24 günde birdir [69].

SAR görüntüleri; SGF (SAR Georeferenced Fine Resolution Product) formatında bir çift stereo SAR (Radargrametri) ve SLC (Single Look Complex) formatında bir çift SAR interferometri görüntüsüdür. [68] ve [69]'daki çalışmalarda kullanılmış görüntü çiftleri yazarlardan istenmiş ve bu tez çalışmasında kullanılmak üzere alınmıştır. Görüntüler, aynı bölgenin Radargrametriye ve SAR interferometriye uygun geometrilerde toplanmış SAR görüntüleridir. Böylelikle aynı bölgenin 4 farklı SAR görüntüsü elimizde olan tek veri setidir. Görüntüler İzmit Körfezine aittir ve özellikleri Çizelge 5-1'de paylaşılmıştır.

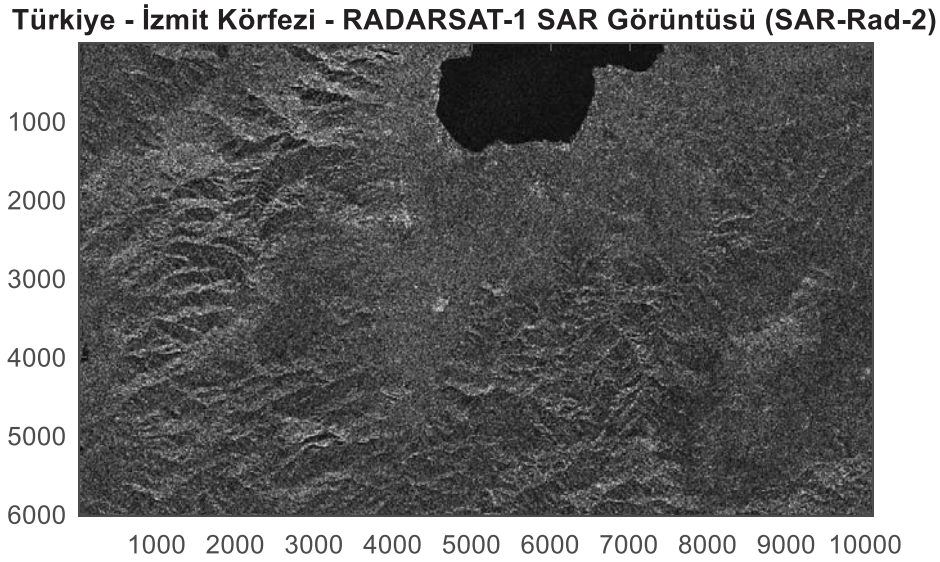
Çizelge 5-1: SAR Görüntü Çiftlerinin Özellikleri

	Radargrametri		SAR İnterferometri	
İsim	SAR-Rad-1	SAR-Rad-2	SAR-Int-1	SAR-Int-2
Tip	SGF	SGF	SLC	SLC
Alım Tarihi	16.05.2002	06.05.2002	16.05.2002	09.06.2002
Merkez	39º 33' N 27º 01' E	39º 32' N 27º 04' E	39º 32' N 27º 01' E	39º 34' N 27º 01' E
Satır Sayısı	9083	10093	11053	11108
Sütun Sayısı	7120	6028	5965	5692

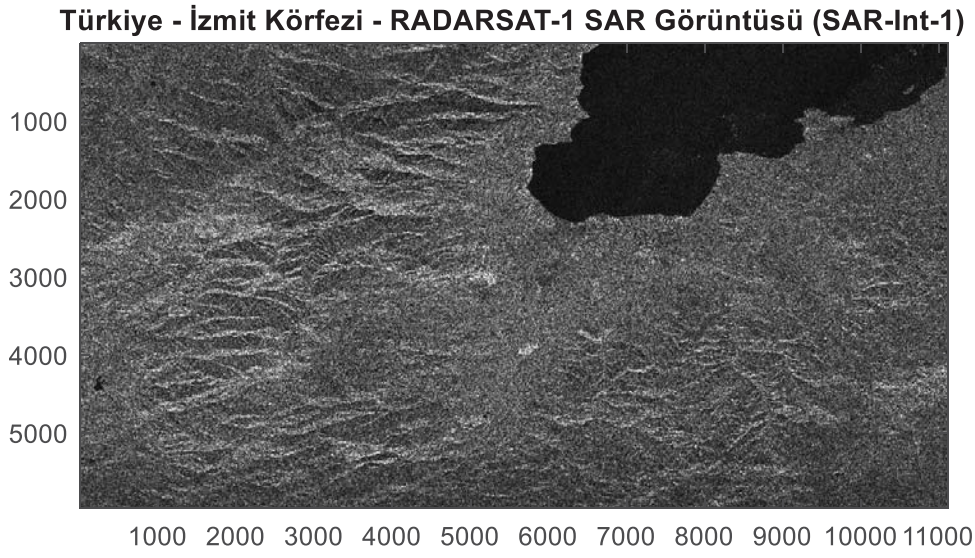
Görüntüler RADARSAT uydusunun veri formatı olan CEOS formatındadır. Veri paketleri SNAP aracında açılabilmiştir. Burada açılan veri paketleri metadata ve SAR görüntüsü olarak ikiye ayrıştırılmıştır. SAR görüntüleri ".geotiff" formatında dışarıya (Export) aktarılmıştır. Son olarak ".geotiff" formatındaki görüntüler Matlab ortamında okunabilmiştir.



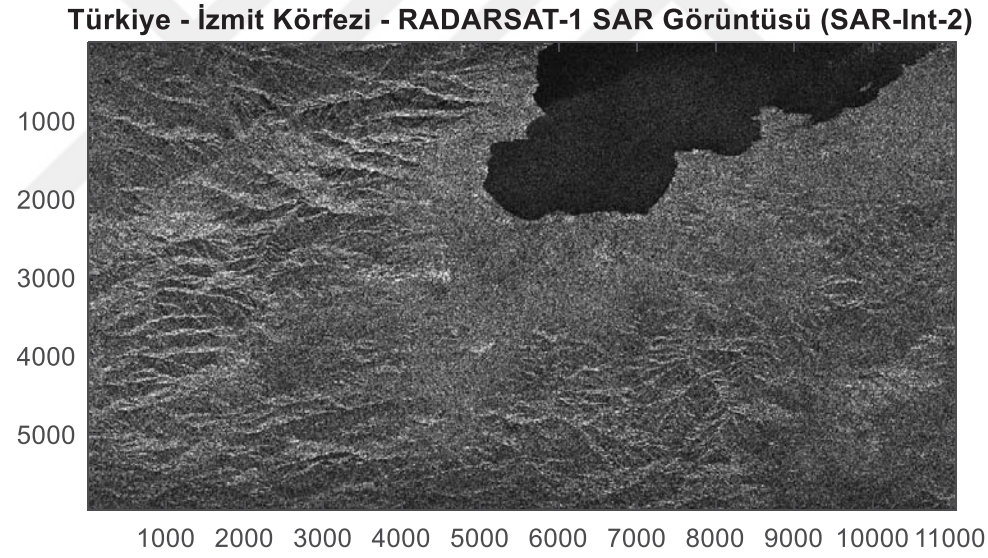
Şekil 5-6: Radargrametri için SAR Görüntü 1 (RADARSAT - Türkiye/İzmit Körfezi)



Şekil 5-7: Radargrametri için SAR Görüntü 2 (RADARSAT - Türkiye/İzmit Körfezi)



Şekil 5-8: SAR İnterferometri için SAR Görüntü 1 (RADARSAT - Türkiye/İzmit Körfezi)



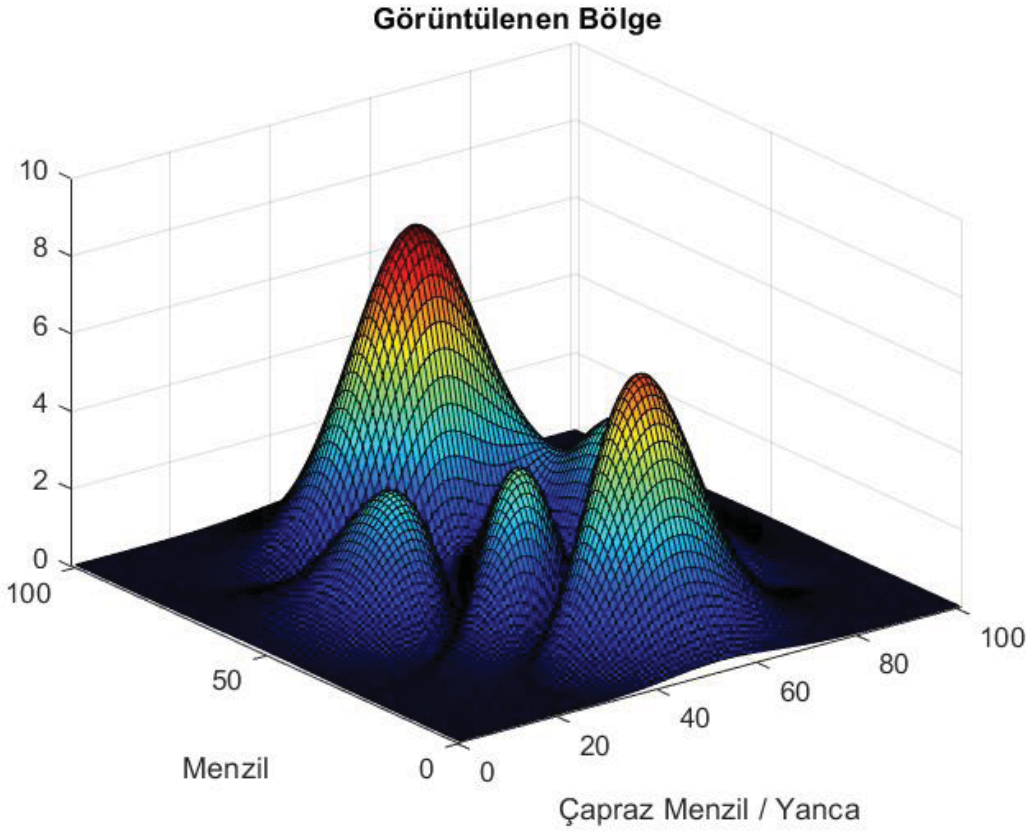
Şekil 5-9: SAR İnterferometri için SAR Görüntü 2 (RADARSAT - Türkiye/İzmit Körfezi)

Gerçek verilerde genellikle SAR görüntülerinin boyutları çok büyük olduğu için işlem süreleri oldukça uzun sürmektedir. En uzun işlem süresi de katlı fazın açılması adımında olmaktadır. Bu sebeple görüntüler içerisinden ilgi duyulan alan seçimi yapabilmek için tez kapsamında geliştirilen kullanıcı arayüzünde bir fonksiyon geliştirilmiştir. Bu şekilde görüntülerin istenilen kısımları kırpılarak ilgi alanı seçimi yapıldıktan sonra tekniklerin algoritma adımları çalıştırılabilmektedir.

5.1.2. Sentetik Veri Üretimi

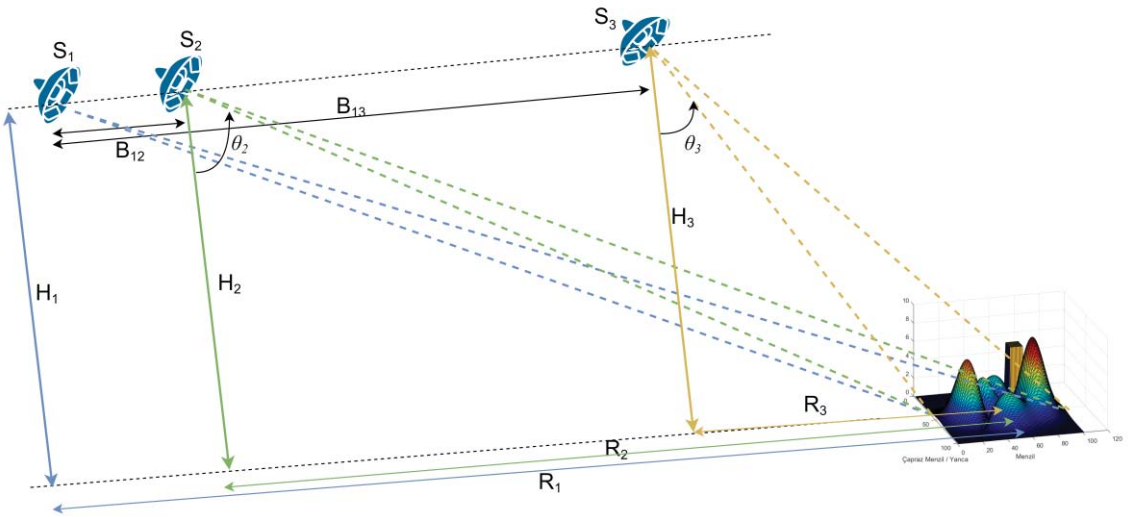
5.1.2.1. Faz ve Menzil Farkı Üzerinden Oluşturulmuş Veri Seti

SAR interferometri ve Radargrametri tekniklerini uygulayabilmek ve karşılaştırmalarını kontrollü bir deney seti ile yapabilmek için sentetik olarak veri üretilmiştir. Görüntülenen bölge Şekil 5-10'da verilmiştir. Bölgede yumuşak (smooth) yükseliş ve alçalışların olduğu doğal bir bölge benzetimi yapılmıştır. Böylelikle bu bölgede katlı fazı açma adımında fazın açılması aşamasında atlama veya ani düşüşler beklenmemektedir.



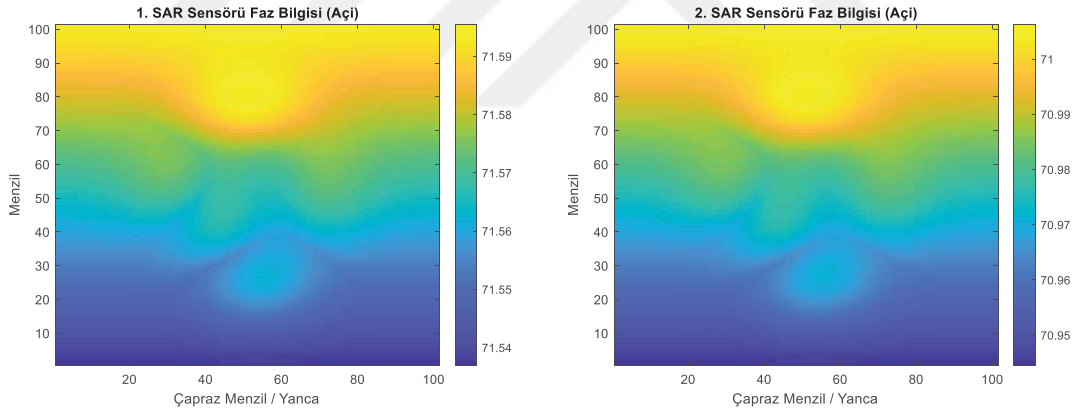
Şekil 5-10: Sentetik Olarak Oluşturulmuş Sanal Bölge

Görüntülenen sanal bölgenin merkezine belli uzaklıkta ve yerden belli yükseklikte 3 adet SAR sensörü olduğu varsayılmıştır. Sensörlere ait uzaklık ve yükseklik değerleri parametrik olarak değiştirilebilmektedir. Şekil 5-11'deki bir ve ikinci sensör SAR interferometri tekniği için, bir ve üçüncü sensör ise radargrametri tekniği için gereken sentetik görüntüleri üretmekte kullanılmaktadır.



Şekil 5-11: Sentetik Görüntüleme Geometrisi

SAR interferometri tekniğine girdi SAR görüntüsü üretebilmek için bir SAR simülatörü yapmak yerine SAR interferomeri tekniğinde gerekli olan faz farkı bilgisinin çıkarıldığı bir işlem tanımlanmıştır. Böylelikle SAR görüntüleri arasındaki faz farkı bilgisinin doğrudan elde edildiği bir çeşit sentetik faz farkı haritası üreteci geliştirilmiştir.

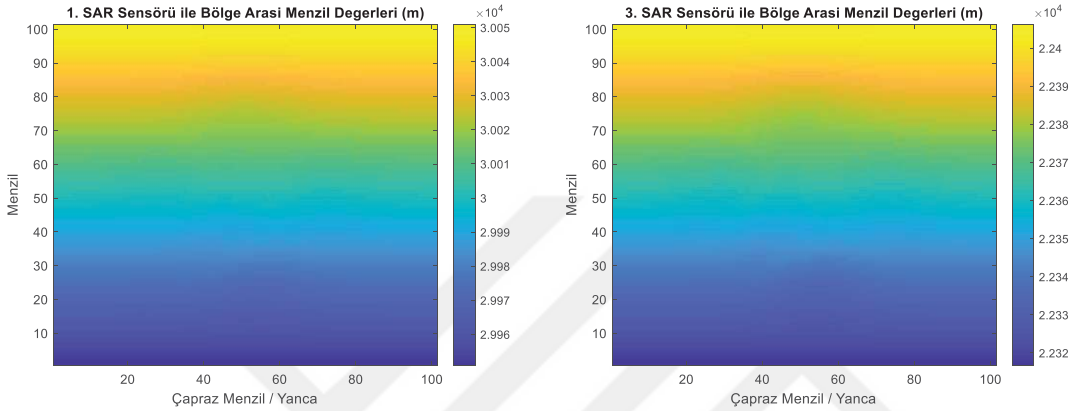


Şekil 5-12: SAR İnterferometri için Sentetik Görüntülerin Faz Bilgileri

İlk iki sensör kullanılarak ilgili mesafeden 101x101 piksel değerinde yeryüzü parçasının ilgili frekansta oluşturacağı faz bilgileri Şekil 5-12'deki gibi hesaplanmıştır. Böylelikle tıpkı gerçek bir SAR interferometri senaryosunda olduğu gibi görüntülenen bölgeden yansıyıp gelen sinyallerin faz bilgileri çıkarılmıştır. SAR interferometride gerekli olan görüntüler arası faz farkı bilgisi kolaylıkla hesaplanabilecek ve interferogram oluşturma adımından itibaren teknik ilerletilecektir.

Bir ve üçüncü sensörler ise radargrametri tekniğine uygun sentetik veri üretimi için kullanılmıştır. Sensörler arası uzaklık SAR interferometriye göre çok daha fazladır. Böylelikle görüntülerdeki homolog piksellerde paralaks değerleri oluşacak ve bu paralaks

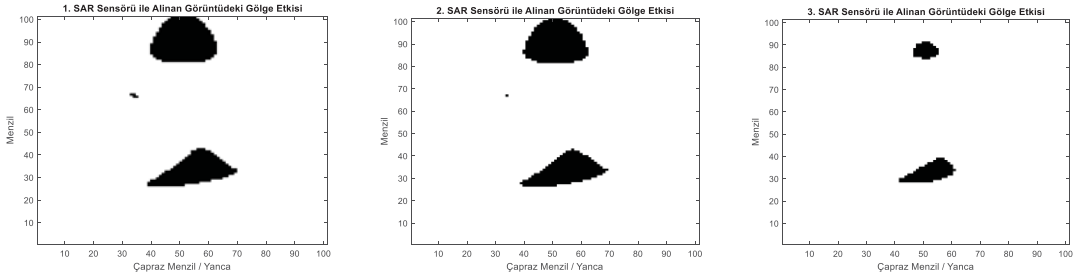
değer üzerinden yükseklik modeli çıkarılabilecektir. Tıpkı SAR interferometri sentetik verisi üretiminde olduğu gibi radargrametri içinde SAR simülatörüne ihtiyaç duyulmamıştır. İhtiyaç olan değer görüntüdeki homolog piksellerin eşleştirme işlemi sonrası hesaplanan paralaks değerleri ve aykırılık haritasıdır. Bu sebeple bir ve üçüncü sensörün yeryüzeyindeki aynı noktaya olan uzaklık/menzil bilgileri Şekil 5-13'teki gibi piksel bazında hesaplanmıştır. Bu değerler kullanılarak tüm homolog pikseller için paralaks değerleri ve görüntülenen bölgenin aykırılık haritası çıkartılabilecektir.



Şekil 5-13: Radargrametri için Sentetik Görüntülerin Sensörlere olan Uzaklık Bilgisi

5.1.2.2. Gölge Etkisi

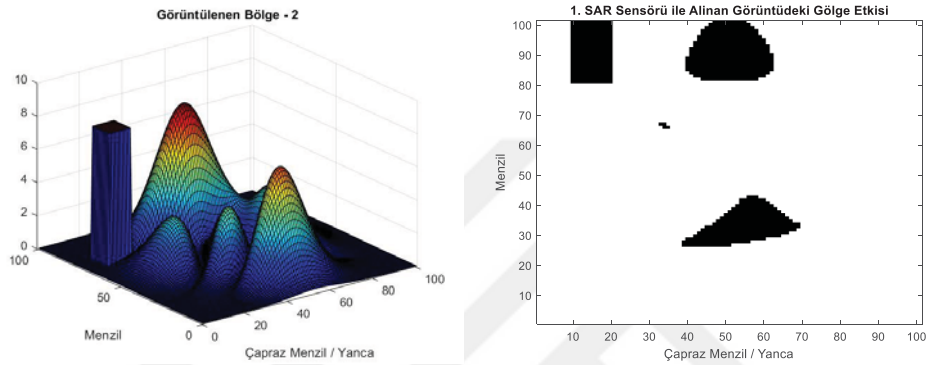
Sentetik olarak üretilen sanal bölgede yükseltiler bulunmaktadır. Sensörler vasıtasıyla görüntüleme yapılırken sensörlerin bakış açısına göre yükseltilerin arkasında kalan kısımlarında görüntülenemeyen yani gölgede kalan alanlar oluşabilmektedir. Sentetik olarak üretilen görüntüler için gölge etkisinin dikkate alınıp alınmaması seçimli olarak kodlanmıştır. Gölge etkisinin gözlemlendiği bir bölgede üç sensörden alınan görüntülerin gölgede kalan alanları Şekil 5-14'te gösterilmiştir.



Şekil 5-14: Gölge Etkisi (Shadow Effect)

5.1.2.3. İnsan Yapıları

Şekil 5-10'daki sanal bölgede daha yumuşak (smooth) yükseliş ve alçalışların olduğu doğal bir bölge benzetimi yapılmışken, Şekil 5-15'teki görüntüde bölgeye ani yükselişlerin ve düşüşlerin olduğu bina benzeri insan yapıları eklenmiştir. Dünya üzerinde sadece insan yapımı olan bina benzeri yüksekliklerde değil doğal olarak da ani yükseliş ve düşüşün olduğu topoğrafyalar mevcuttur. SAR interferometri tekniği tam da bu tip ani değişimlerin olduğu topoğrafyalarda katlı fazı açma adımından kaynaklı büyük ölçekli hatalar yapabilmektedir.



Şekil 5-15: Bina Benzeri İnsan Yapıları Olan Sentetik Bölge ve Gölge Etkisi

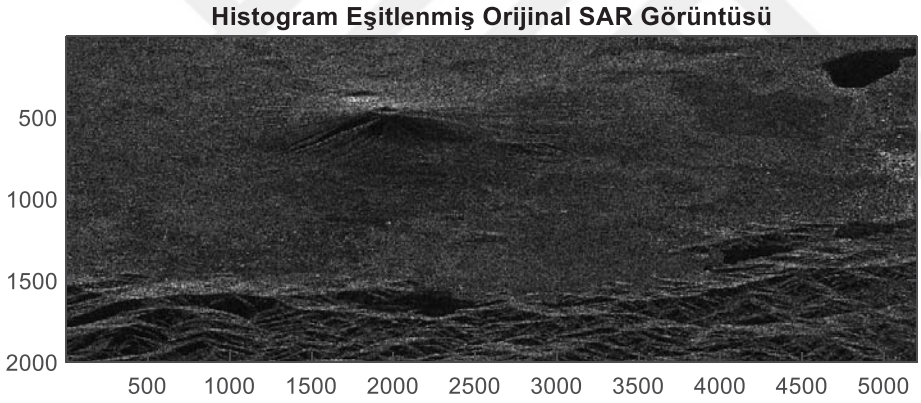
Şekil 5-15'teki gibi bu tip yapıların da yine yükseklikleri sebebiyle arkalarında kalan alanlarda gölge etkisi oluşacaktır.

5.2. SAR İnterferometri Tekniği ile SYM Oluşturulması İşlem Adımları

İnterferometrik SAR tekniği ile Sayısal Yükseklik Modeli Oluşturma algoritmasının işlem adımları Şekil 2-14'te verilmiştir.

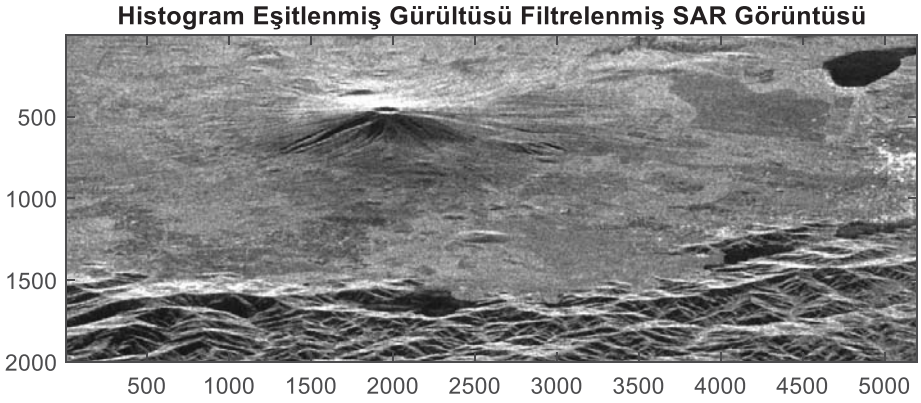
5.2.1. Gürültü Temizleme

SAR görüntüleri SAR interferometri ve radargrametri tekniklerine ait algoritmaların ilk adımında opsiyonel olarak filtrelenebilir. Filtreleme işlemindeki amaç, SAR görüntüsü içerisindeki öznitelikleri daha belirgin hale getirmek ve görüntü çiftleri arasındaki korelasyonu arttırmaktır. SAR interferometrideki filtreleme işleminde dikkat edilmesi gerekli olan mühim bir nokta vardır. Bu da faz bilgisinin korunması gerekliliğidir. Filtreleme işlemi sadece büyüklük üzerinden yapılmalı ve faz bilgisi bu adımda asla değiştirilmemelidir. Bu önemli nokta, SAR interferometri ve radargrametride yer alan gürültü temizleme adımları arasındaki temel farklılıktır. Kullanıcı arayüzünden filtre seçimi ve kare pencerenin kenar boyutu seçimi yapılabilmektedir.



Şekil 5-16: Orijinal SAR Görüntüsü (ERS Uydusu – İtalya/Etna)

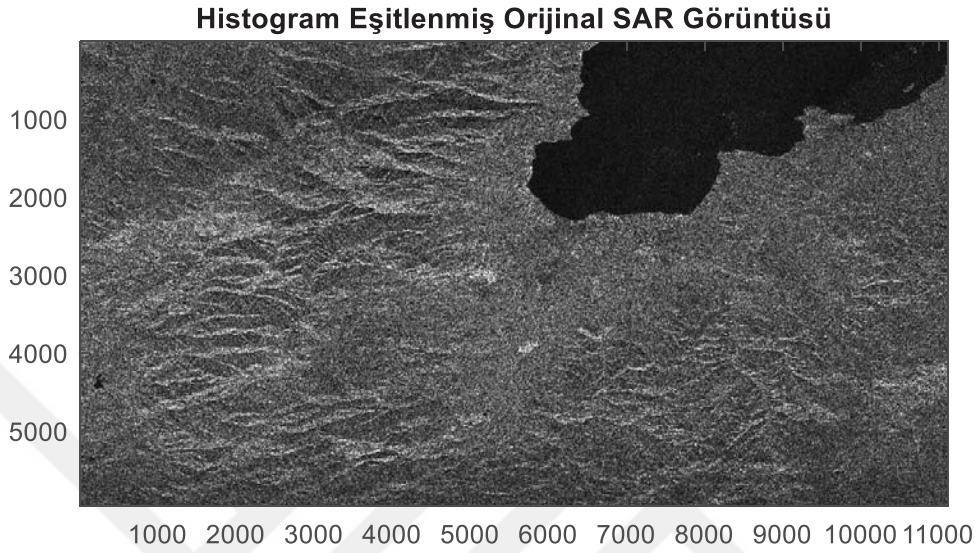
Şekil 5-16'da ERS uydusuna ait İtalya'daki Etna yanardağını içeren histogramı eşitlenmiş orijinal SAR görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 5-17: Gürültü Temizlenmiş SAR Görüntüsü (ERS Uydusu – İtalya/Etna)

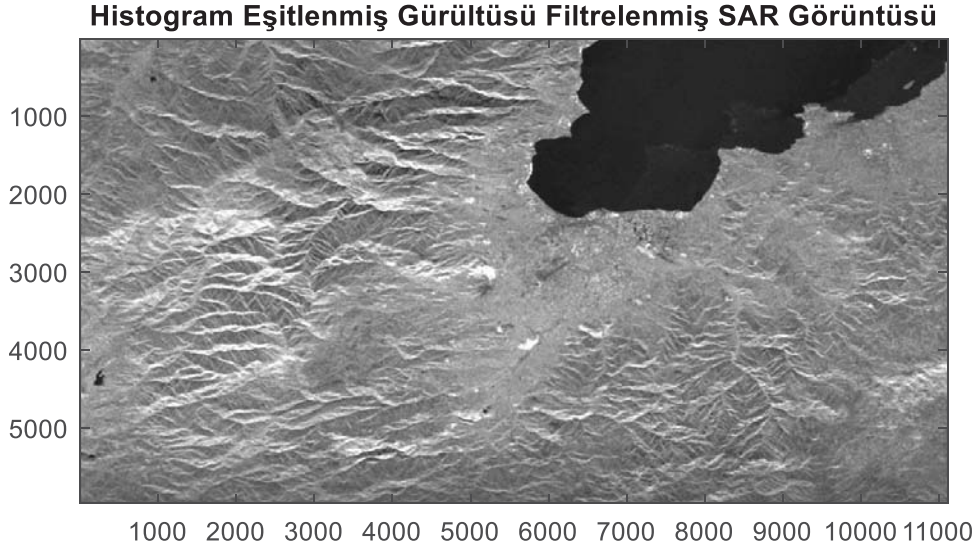
Şekil 5-17'de [11x11] ebatlarında bir pencerede medyan filtre ile filtrelenmiş ve benek gürültüsü temizlenmiş SAR görüntüsü bulunmaktadır.

Şekil 5-18'de RADARSAT uydusuna ait İzmit Körfezini içeren histogramı eşitlenmiş orijinal SAR görüntüsü vardır.



Şekil 5-18: Histogram Eşitlenmiş SAR Görüntüsü (RADARSAT – Türkiye / İzmit)

Şekil 5-19'da ise 25x25'lik bir pencerede medyan filtre ile filtrelenmiş ve benek gürültüsü temizlenmiş SAR görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 5-19: Gürültü Temizlenmiş SAR Görüntüsü (RADARSAT – Türkiye / İzmit)

5.2.2. SAR Görüntüleri Arasında Bilinen Açı Farkını Düzeltme

SAR görüntülerinin yanında ismi *metadata* olarak geçen, görüntüye ve sensörün konuşlu olduğu uyduya ait uçuş bilgilerinin yer aldığı dosya içerisinde platformun baş açıları yer almaktadır. SAR interferometri tekniğine girdi olacak görüntülerin baş açıları arasındaki fark algoritmanın hemen başında eşitlenebilir ve açısal ofset düzeltilebilir. Bunun için gerekli olan SAR görüntülerinden birinin baş açısını diğerine eşitlemektir. Bu işlem yapılırken farklı yeniden örnekleme ve interpolasyon yöntemleri kullanılabilir. Hazır fonksiyonlar tercih edilebilir. Önemli olan görüntünün faz bilgisini kaybetmeden açısal ofsetin düzeltilmesi ve görüntü çiftinin aynı yönelime getirilmesidir. Kullanıcı arayüzünden görüntüler arası baş açıları farkı girişi yapılabilmektedir.

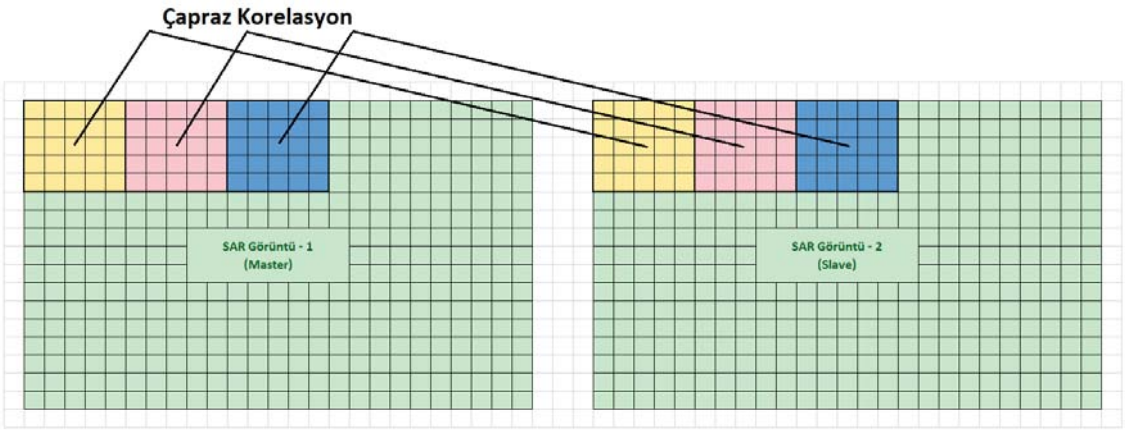
Tez kapsamında SAR interferometri tekniği için toplanmış olan SAR görüntülerinin bu adıma ihtiyacı bulunmamaktadır. Çünkü görüntü çiftlerinin baş açıları aynıdır. Ancak radargrametri tekniği için toplanmış olan görüntü çiftinde böyle bir ihtiyaç bulunmaktadır. Bu görüntüler üzerinde yapılan tüm algoritmik işlemler detayları ile *5.3.2. SAR Görüntüleri Arasında Bilinen Açı Farkını Düzeltme* bölümünde anlatılmıştır.

5.2.3. Çakıştırma / Hizalama

SAR görüntü çiftleri kullanılarak faz uyumlu değişiklik tespiti ya da genlik tabanlı değişiklik tespiti yapmak için veya iki boyutlu SAR görüntülerini kullanarak üçüncü boyutu da ekleyerek sayısal yükseklik modeli elde edebilmek için öncelikle aynı bölgenin çok benzer açılardan alınmış (değişiklik tespiti için mümkün mertebe aynı açıdan interferometrik SYM üretimi için belirli baz uzaklık korunarak) SAR görüntülerine ihtiyaç duyulmaktadır. Algoritmaların işlem adımlarına bakıldığında ilk adımın bu SAR görüntülerinin çakıştırılması/hizalanması olduğu görülmektedir. Zira aynı bölgenin SAR görüntüleri arasında menzil ve çapraz menzil yönlerinde veri toplama geometrisi ve zamanlamadan kaynaklı olarak kaymalar olabilmektedir. Bu kaymaların hesaplanması ve SAR görüntülerinin sadece menzil ve çapraz menzilde kaydırılarak kaba bir şekilde çakıştırılması aynı piksellerin iki SAR görüntüsünde yüksek oranda üst üste gelmesini sağlayacaktır ki bu işlem SAR interferometri uygulamaları için kritik bir öneme sahiptir.

Kaba çakıştırma işleminde Şekil 5-20'deki gibi her iki görüntü çifti üzerinde belli boyutta pencere gezdirilerek bu pencerelerin birbiri ile korelasyonuna bakılır. Kullanıcı arayüzünden kaba çakıştırma adımı için gerekli kare pencerenin kenar boyutu seçimi yapılabilmektedir. Bu seçim çok önemli olan ve dikkat edilmesi gereken bir seçimdir.

Zira seçilen pencere kenar boyutu kayma miktarının en az iki katı kadar olmalıdır. Çünkü SAR görüntü çifti arasında kayma miktarı seçilen pencere kenar boyutunun yarısından fazla olursa, seçilen iki pencere içine düşen alanlar birbirinden tamamen farklı iki alan olacaktır ki korelasyon sonucu anlamsız çıkacaktır. Kaydırma miktarının doğru hesaplanma ihtimali kalmayacaktır.



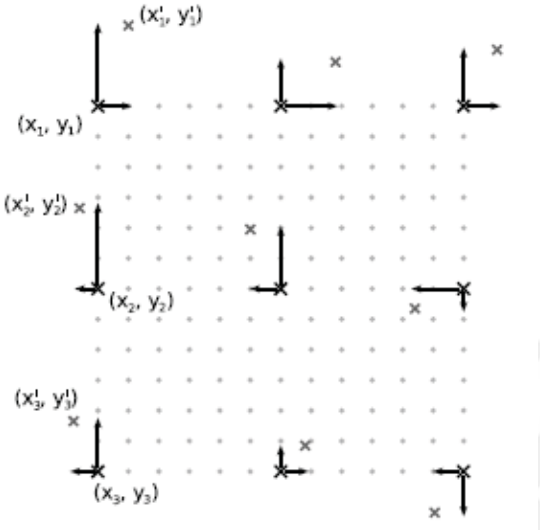
Şekil 5-20: Kaba Çakıştırma Bloğu Çapraz Korelasyon İşlemi

Ayrıca kullanıcı arayüzünden kaba çakıştırma adımı için gerekli kare pencerelerin örtüşme oranı (overlap ratio) girilebilmektedir. Bu parametre ise pencerenin görüntü üzerinde hangi oranda örtüşerek gitmesi gerektiğini göstermektedir. Örneğin Şekil 5-20'deki sarı, kırmızı ve mavi pencereler birbirleri ile hiç örtüşmemektedir. Şekildeki görüntü büyüklüğü ve pencere boyutuna bakıldığında yaklaşık 15 adet pencere (5x3) ile görüntüler taranacaktır. Ancak daha fazla korelasyon çıktısı ile nihai kaydırma miktarı hesaplanmak isterse pencere boyutu küçültülmeden örtüşme oran bilgisi girilerek bu işlem yapılabilecektir. Belli bir örtüşme oranı ile görüntü içerisine sığacak pencere sayısının hesabına ilişkin formüller Eşitlik 2.35'te verilmiştir.

Kullanıcı arayüzünde kaba çakıştırma adımında uygulanacak çapraz korelasyon işleminin kompleks değerler ya da büyüklük değeri kullanılarak yapılmasına ilişkin seçim de bulunmaktadır. Burada master ve slave görüntüden alınan her pencere çifti içindeki değerler kompleks veya büyüklük olarak çapraz korelasyon işlemine tabi tutulur. Literatürde [1], [5], [33] her ikisinin de kullanıldığı görülmektedir. Genellikle kaba çakıştırma adımında büyüklük; hassas çakıştırma adımında ise kompleks değerler kullanıldığı öne sürülmüştür. Tez çalışmasında daha iyi analiz yapabilmek adına seçimli olarak kodlanmıştır.

Kullanıcı arayüzünde kaba çakıştırma adımında nihai kaydırma miktarının hesaplanma yöntemi seçilebilmektedir. Görüntü üzerinde örtüşme oranına bağlı olarak gezdirilen her

pencere çiftinin çapraz korelasyon işleminden Şekil 5-21'deki gibi menzil ve azimut yönünde belirli bir kayma miktarı çıktısı alınacaktır. Bu çıktılar kullanılarak slave görüntünün kaba bir şekilde (piksel seviyesinde) master görüntü ile çakıştırılabilmesi için nihai (tüm görüntü için ortak) kayma miktarının belirlenmesi gerekmektedir.



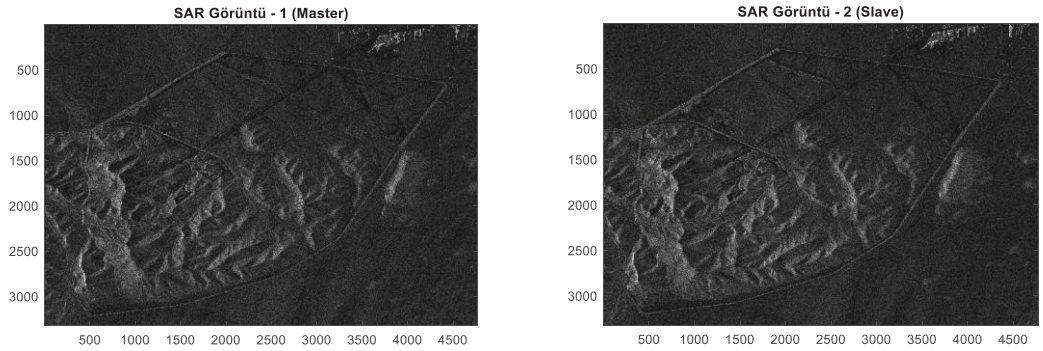
Şekil 5-21: Çapraz Korelasyon Çıktıları

Nihai kayma değerlerinin belirlenmesine yönelik olarak uygulanabilecek tüm yöntemler detaylı bir şekilde *2.3.3.1. Kaba Çakıştırma / Hizalama* bölümünde anlatılmıştır. Bunlar; ortalama alma, zirve kalitesi, en çok tekrar eden değer, medyan ve aykırı değerlerin elenmesi olmak üzere 5 farklı yöntemdir.

Kullanıcı arayüzünde kaba çakıştırma adımında, aykırı değerlerin elenmesi yöntemin seçildiği durumda standart sapmanın (σ) katsayısı (k) belirlenebilmektedir. Bu parametre, nihai kayma miktarının hesaplanması için seçilen aykırı değerlerin elenmesi yönteminde ortalamanın standart sapmanın k katı kadar ($k\sigma$) dışında kalan değerlerin atılarak geriye kalanların yeniden ortalamasının alınıp kayma miktarının belirlendiği parametredir. Böylelikle aykırı değerlerin ortalamayı etkilemesine izin verilmemiş olacaktır.

Benzetimi örneklemek adına TerraSAR-X uydusuna ait İran'ın Kum şehrinin SAR görüntü çifti seçilmiştir. Ancak Kum'a ait görüntüler çok büyük olduğu için kırpılmış ve kullanıcı arayüzü üzerinden ilgi alanı seçimi (Range of Interest - ROI) yapılmıştır. İlgi alanı seçimine ilişkin tüm detaylar Ek-1'de yer alan *İlgi Alanı Seçimi* bölümünde anlatılmıştır.

Çakıştırma algoritmasına girecek SAR görüntü çifti Şekil 5-22'de verilmiştir.



Şekil 5-22: İlgi Alanı Seçimi Yapılmış SAR Görüntü Çifti (TerraSAR-X - İran/Kum)

Kaba çakıştırma algoritması için pencere boyutu 256x256 seçilmiştir. Örtüşme oranı 0 (Sıfır) seçilmiştir. Pencerelerde örtüşme olmayacaktır. Böylelikle Görüntülere 12x18=216 pencere sığmıştır. Çapraz korelasyon büyüklük değeri üzerinden yapılmıştır. Nihai kaydırma hesaplama yöntemi olarak En Çok Tekrar Eden Değer seçilmiştir.

Çizelge 5-2 ve Çizelge 5-3, her pencerenin çapraz korelasyon işlemi sonucunda çıkan menzil ve azimut yönündeki kayma miktarını söylemektedir. Bu pencerelerden gelen bilgilerden nihai bir kayma miktarı hesaplanacaktır. TerraSAR-X uydusuna ait Şekil 5-22'deki görüntü çiftinde kaba çakıştırma işlemi sonucu olan nihai kayma miktarını hesaplamak oldukça kolay olacaktır. Zira neredeyse tüm pencereler çok yakın sonuçlar üretmişlerdir. Buna rağmen bir pencerede aykırı değer oluşturmuştur. Bu tip aykırı değerlerin sayısının artması durumunda hatalı sonuçlar çıkmaya başlayacaktır. En çok tekrar eden değer seçildiği durumda menzilde 75 piksel, azimut ekseninde de 22 piksel kaydırma yapılarak SAR görüntü çifti piksel seviyesinde çakıştırılmıştır.

Çizelge 5-2: Kaba Çakıştırma Çapraz Korelasyon Sonucu (Menzil Yönü)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	-74	-74	-74	-74	-74	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75
2	-74	-74	-74	-74	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	**-43**	-75	-75	-75	-75
3	-74	-74	-74	-74	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75
4	-74	-74	-74	-74	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75
5	-74	-74	-74	-74	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75
6	-74	-74	-74	-74	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75
7	-74	-74	-74	-74	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75
8	-74	-74	-74	-74	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75
9	-74	-74	-74	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75
10	-74	-74	-74	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75
11	-74	-74	-74	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75
12	-74	-74	-74	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75

Çizelge 5-3: Kaba Çakıştırma Çapraz Korelasyon Sonucu (Azimut Yönü)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22
2	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-52	-22	-22	-22	-22
3	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22
4	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22
5	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22
6	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22
7	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22
8	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22
9	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22
10	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22
11	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22
12	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22

Bu örnekte dikkat edilmesi gereken bir nokta da pencere büyüklüğünün seçimidir. Pencere boyutu 256 yerine 128 seçilmiş olsaydı menzil yönünde kaydırılması gereken piksel değeri 75 olduğu için ve pencere kenar boyutunun yarısından büyük olduğu için çapraz korelasyon işleminin sonucu çoğu pencere için Çizelge 5-4'teki gibi birbirinden farklı değerler çıkacak ve hatalı sonuçlar üretilecekti. Korelasyon haritasında yapılan bu hata fark edilebilecektir.

Çizelge 5-4: Hatalı Çapraz Korelasyon Sonuçları

	8	9	10	11	12	13	14	15	16
9	54	-7	53	54	54	53	53	53	53
10	54	54	54	53	2	-4	53	53	53
11	54	54	53	53	53	53	53	53	53
12	54	54	54	53	53	53	53	53	53
13	54	7	53	53	53	54	53	53	-19
14	-39	54	54	53	53	53	53	53	53
15	54	54	53	53	53	15	53	53	53
16	-57	54	-22	53	53	53	53	53	53
17	54	-63	53	53	53	53	53	25	53

Çapraz korelasyonun büyüklük ve faz değeri üzerinden yapılmasının etkisini gözlemlemek için aynı görüntü çiftinde parametreler değiştirilerek kaba çakıştırma işlemi tekrar edilmiştir.

Pencere boyutu 512x512 seçilmiştir. Örtüşme oranı 0 (Sıfır) seçilmiştir. Pencerelerde örtüşme olmayacaktır. Böylelikle görüntülere 6x9=54 pencere sığmıştır. Çapraz korelasyon kompleks değer üzerinden yapılmıştır. Kaydırma hesaplama yöntemi olarak En Çok Tekrar Eden Değer seçilmiştir.

Değiştirilen kritik parametre çapraz korelasyon işleminin kompleks değer üzerinden yapılmasıdır. Pencere miktarı Çizelge 5-5 ve Çizelge 5-6'da çeyreğe inmesine rağmen aykırı değer sayısı artmıştır.

Çizelge 5-5: Kaba Çakıştırma Çapraz Korelasyon Sonucu (Menzil Yönü)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-74	-74	-74	-75	-75	-75	8	-75	-75
2	-74	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75
3	-74	-74	-75	-74	-75	-75	190	-75	-75
4	-74	-75	-75	-75	30	-75	-75	-75	-75
5	-74	-74	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75
6	-74	-74	-75	-75	-75	-75	-75	-75	-75

Çizelge 5-6: Kaba Çakıştırma Çapraz Korelasyon Sonucu (Azimut Yönü)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-97	-22	-22
2	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22
3	-22	-22	-22	-22	-22	-22	41	-22	-22
4	-22	-22	-22	-22	111	-22	-22	-22	-22
5	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22
6	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22	-22

Farkı bir senaryo olarak eğer görüntüler arasındaki kayma sadece menzil ve azimut ekseninde dikey ve yatay kayma şeklinde olmayıp açısal bir farklılık da bulunuyorsa ve bu açısal fark algoritmanın başında Bilinen Açı Farkının Düzeltilmesi adımında halledilmemiş ise kaba çakıştırma adımında çıkan çapraz korelasyon sonuçlarında anlaşılacaktır. Bu senaryo aralarında açısal ofset bulunmayan TerraSAR-X görüntülerinden bir tanesi 5º döndürülerek denenmiştir. Çizelge 5-7'de açısal ofset net bir şekilde görülmektedir. Böyle bir sonuç alındığı durumda ya açısal ofset düzeltilmeli ya da hassas çakıştırma adımı uygulanmalıdır.

Çizelge 5-7: Aralarında Açısal Ofset Bulunan SAR Görüntü Çiftinin Sonuçları

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	-73	-73	-73	-74	-74	-74	-74	-74	-74	-74	-74	-74	-74	-74	-74	-75	-75	-75
2	-73	-73	-73	-73	-74	-74	-74	-74	-74	-74	-74	-74	-74	-37	-74	-74	-74	-74
3	-73	-73	-73	-73	-73	-73	-73	-73	-74	-74	-74	-74	-74	-74	-74	-74	-74	-74
4	-72	-72	-72	-72	-73	-73	-73	-73	-73	-73	-73	-73	-73	-73	-73	-73	-73	-73
5	-72	-72	-72	-72	-73	-73	-73	-73	-73	-73	-73	-73	-73	-73	-73	-73	-73	-73
6	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72
7	-71	-71	-71	-71	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72
8	-71	-71	-71	-71	-71	-72	-71	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72	-72
9	-70	-70	-70	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71
10	-70	-70	-70	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71	-71
11	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70
12	-69	-69	-69	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70	-70

5.2.4. İnterferogram

İnterferogram ile ilgili işlemler interferogramın oluşturulması, düzleştirilmesi ve filtrelenmesinden oluşmaktadır.

5.2.4.1. İnterferogram Oluşturma

Farklı konumlardaki uydular tarafından alınmış aynı bölgenin SAR görüntüleri çakıştırıldıktan sonra korelasyon haritası oluşturularak uyum değeri üzerinden çakıştırma başarısı gözlemlenebilir. İstenilen doğruluk seviyesi elde edildiğinde SAR görüntü çifti interferometrik SYM üretimi için kalan işlem adımlarına devam edebilecektir. Bu adımlardan ilki interferogramın oluşturulmasıdır. Interferogram oluşturulmasındaki amaç SAR görüntü çiftleri arasında piksel piksel interferometrik faz farkının hesaplanması gerekliliğidir. Interferogram oluşturmak için SAR görüntü çiftlerinin piksel piksel faz farkı bilgisinin hesaplandığı Eşitlik 2.62 kullanılabilmektedir. Ancak çoğunlukla görüntüler üzerinde belli bir boyutta pencere gezdirilerek hesaplama işlemi tercih edilmektedir. Bu durumda daha yumuşak (smooth) geçişleri olan faz gürültüsünden büyük oranda arındırılmış bir interferogram elde edilecektir. Böylelikle katlı faz açma işleminde daha yüksek doğrulukta kalıntılar belirlenecek ve daha doğru bariyerler çizilecektir. Sonuç olarak açılan faz değerleri daha doğru olacaktır.

5.2.4.2. İnterferogram Düzleştirme

Oluşturulan interferogram menzil yönünde dalgalanma yapar şekilde görünmektedir. Çünkü SAR sensörününü bulunduran platform ile görüntülenen bölgenin arasındaki uzaklığın menzil yönünde değişmesi ve bölgenin yüksekliğinden bağımsız olarak farklı uzaklıklar için farklı faz değerlerinin oluşmasından kaynaklanmaktadır. Menzil yönünde faza eklenen bu kısmın hesaplanarak interferogramdaki fazdan çıkarılması ve bölgedeki her bir çözünürlük hücresi için sensörler arasındaki gerçek faz farkı değerinin belirlenmesi gerekmektedir. Böylelikle interferogram düzleştirme yapılmış olacak, dalgalanan faz görünmeyecek ve dağlık alanlardaki yüksekliklerde örgeler (fringe) oluşacaktır.

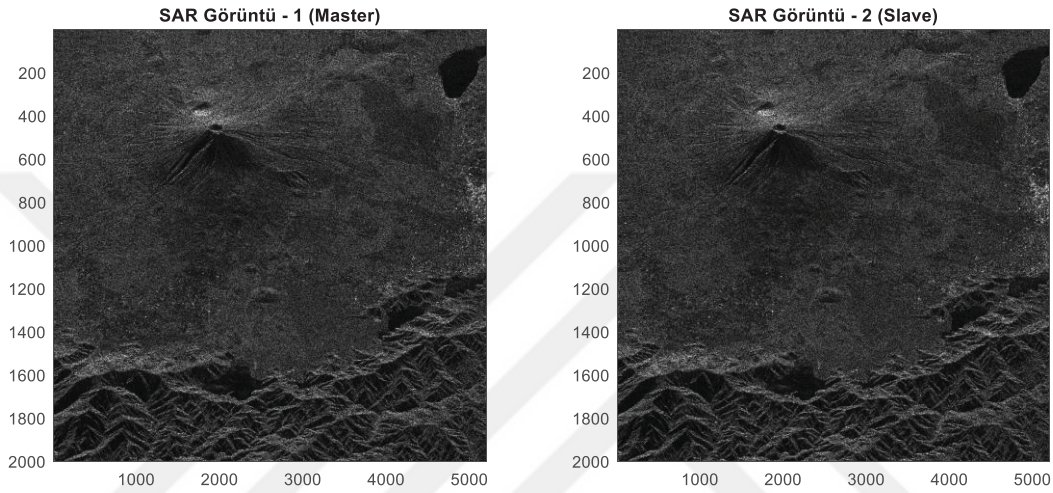
5.2.4.3. İnterferogram Filtreleme

Oluşturulan interferogram üzerinden faz açma işlemi yapılacağı için interferogramın filtrelenmesi önemli bir işlem adımıdır. Zira filtrelenerek gürültüsü azaltılmış bir interferogramın faz işlemine girdi olarak verilmesi fazı açarken yapılacak hataları da

azaltacaktır. Ancak bu adım yine de opsiyoneldir ve kullanıcı tarafından tercih edilmeyebilir. *2.3.7.4.1.4. Entegre Gürültü Filtreleme ve Faz Açma* bölümünde vurgulandığı gibi bazı katlı fazı açma algoritmalarında interferogram filtrelemesi katlı fazı açma algoritmasıyla birlikte eş zamanlı olarak yapılmaktadır.

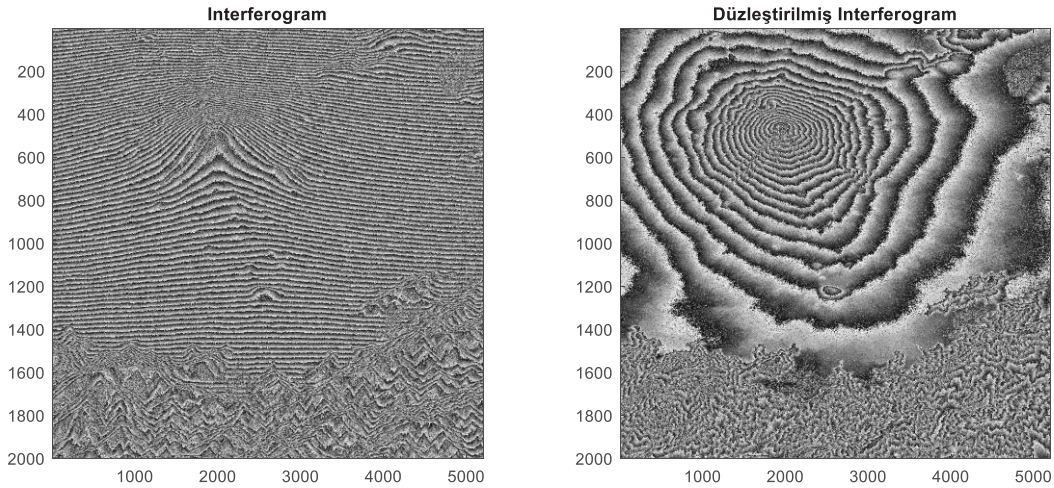
Interferogram oluşturma, düzleştirme ve filtreleme işlemleri için ERS uydusuna ait İtalya'da yer alan Etna yanardağını içeren çakıştırılmış SAR görüntüleri kullanılmıştır.

Interferogram oluşturulacak SAR görüntüleri Şekil 5-23'te görülebilmektedir.



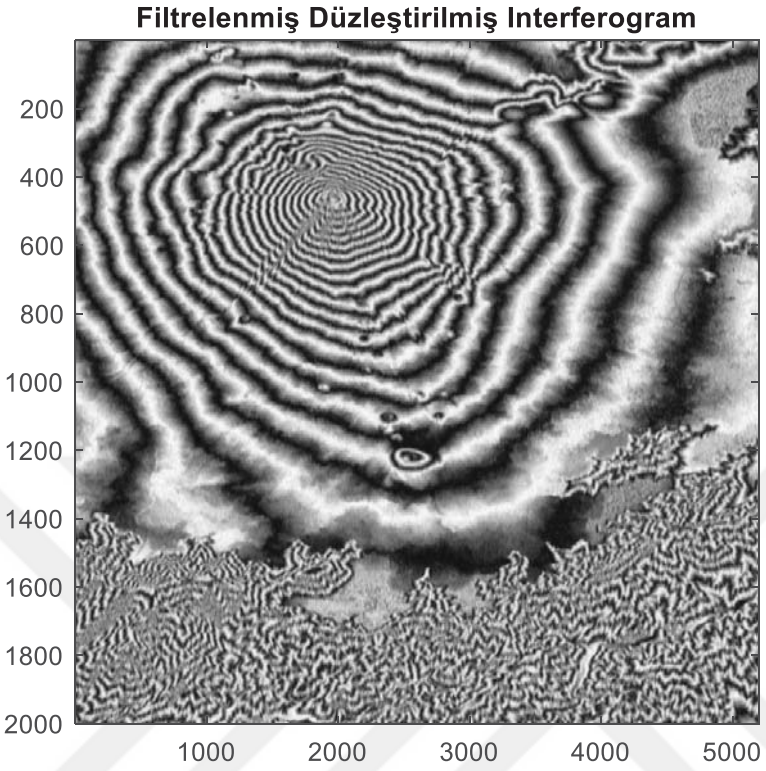
Şekil 5-23: SAR Görüntü Çifti (ERS Uydusu - İtalya / Etna)

Şekil 5-23'teki SAR görüntüleri kullanılarak Şekil 5-24'teki gibi interferogram üretilmiştir. Üretilen interferogram düzeltilmiş ve Şekil 5-24'teki ikinci görüntü elde edilmiştir.



Şekil 5-24: İnterferogram ve Düzleştirilmiş İnterferogram (ERS Uydusu - İtalya /Etna)

Düzleştirilmiş interferogram [11x11] medyan filtreden geçirilerek Şekil 5-25'te görüldüğü üzere filtrelenmiştir.

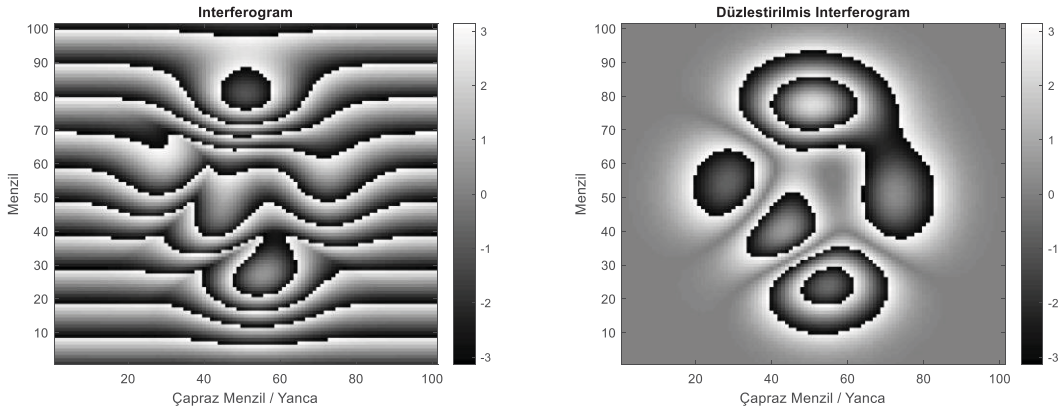


Şekil 5-25: Filtrelenmiş Düzleştirilmiş İnterferogram (ERS Uydusu - İtalya /Etna)

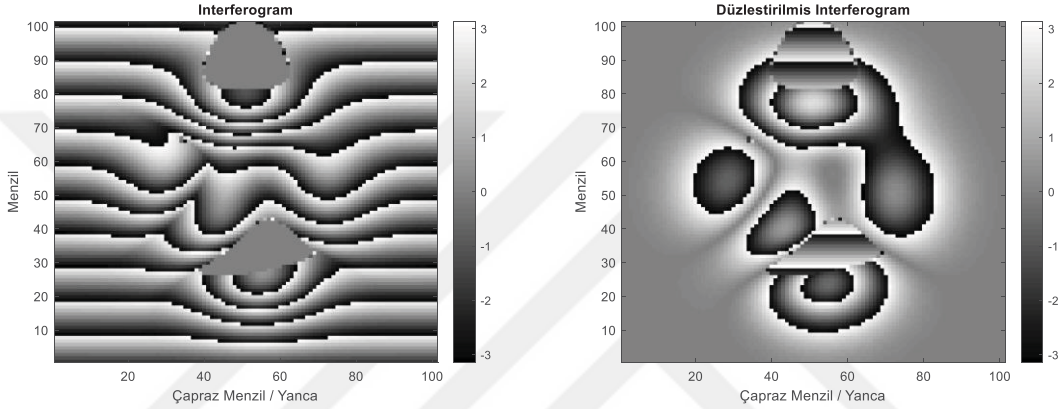
Benzer işlemler sentetik olarak üretilen modeller kullanılarak da yapılmıştır.

Düzleştirilmiş interferogram, SAR görüntü çiftinin piksel piksel faz farkını içermektedir. Tez çalışması kapsamında SAR simülatörü üzerinden sentetik SAR görüntüsü üretmek yerine, aynı bölgenin farklı konumlardan ve belli bir baz uzaklıkta iki sensör ile görüntülendiği varsayılmıştır. SAR görüntüleri oluşturulmamış, bunun yerine sensörlerde oluşan faz bilgileri bölgedeki her piksel için hesaplanmış ve faz haritaları Şekil 5-12'deki gibi oluşturulmuştur. Bu iki faz haritası birbirinden çıkarılarak interferogram üretilmiştir.

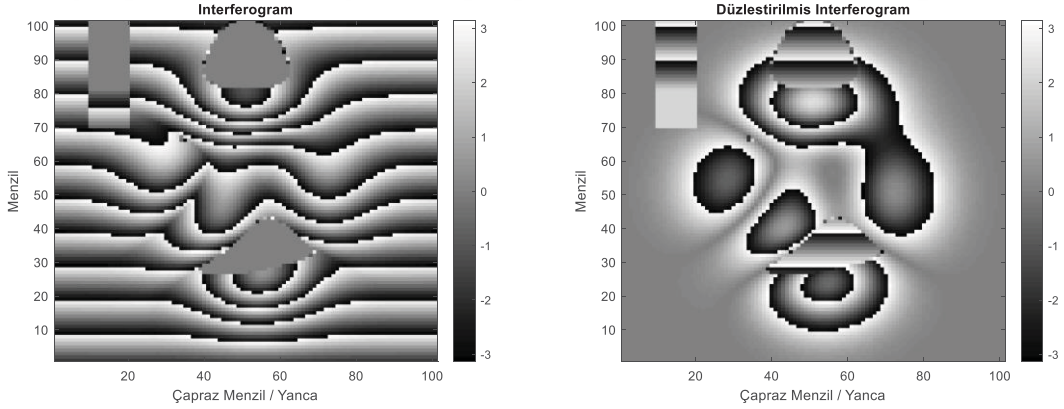
Sensörlerin konumu ve menzil yönünde fazın sürekli değişimi dolayısıyla interferogramdan bu etkinin çıkarılarak düzleştirilmesi ihtiyacı sentetik modelde de gereklidir. Bu etki (Earth Phase) interferogramlardan çıkarılarak düzleştirilmiş interferogramlar da oluşturulmuştur. Sentetik olarak üretilen interferogramlar ve düzleştirilmiş interferogramlar; gölge etkisi ve bina gibi insan yapılarının olup olmadığı durumlar için ayrı ayrı Şekil 5-26, Şekil 5-27 ve Şekil 5-28'de modellenmiştir.



Şekil 5-26: İnterferogram ve Düzleştirilmiş Hali (Gölge Etkisi Yok ve Bina Yok)



Şekil 5-27: İnterferogram ve Düzleştirilmiş Hali (Gölge Etkisi Var ve Bina Yok)



Şekil 5-28: İnterferogram ve Düzleştirilmiş Hali (Gölge Etkisi ve Bina Var)

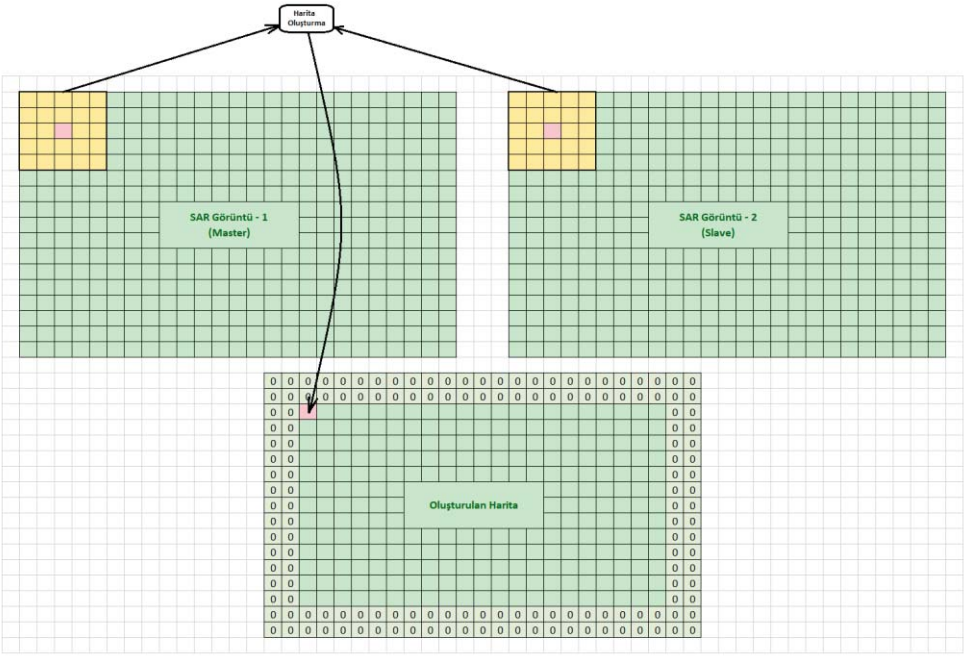
Şekil 5-27 ve Şekil 5-28'de gölgede kalan alanlarda faz bilgisi bulunmamaktadır. Çünkü bu kısımlardan yansıyıp sensörlere gelen herhangi bir bilgi bulunmamaktadır. Gerçek sensörlerde gölgede kalan kısımlar sadece kanal gürültüsünden oluşur. Sentetik verilerde ise herhangi bir gürültü eklenmemiştir. Düzleştirme işlemi dolayısıyla bilgi olmayan bir bölgeden düzleştirme için gerekli faz çıkarıldığı için o kısımlar kesikli görünmektedir. Özetle bu bölgeler gölgede kaldıkları için SYM oluştururken hatalara sebep olacaklardır.

5.2.5. Harita Oluşturma

Çakıştırma adımının doğruluğunu kontrol etmek ve katlı faz açma adımlarında rehber olarak kullanmak için oluşturulan haritalar kritik bir öneme sahiptir.

5.2.5.1. Korelasyon Haritası Oluşturma

Harita oluşturma bloğu içerisinde oluşturulabilen haritalardan ilki korelasyon haritasıdır. Tez kapsamında benzetim ortamında geliştirilen kullanıcı arayüzünden korelasyon haritası üretmek için gereken formüllerden Eşitlik 2.69, Eşitlik 2.70 ve Eşitlik 2.71'den istenilen biri kullanıcı tarafından seçilebilmektedir. Formül ile beraber yine kullanıcı arayüzü üzerinden korelasyon haritası üretmek için gerekli kare pencerenin kenar boyutu seçimi yapılabilmektedir. Pencerenin kenar boyutu tek sayı olmalıdır. Çünkü seçilen kare pencerenin tam merkezindeki piksel için faz uyum değeri pencere içerisine düşen tüm pikseller kullanılarak hesaplanacaktır.



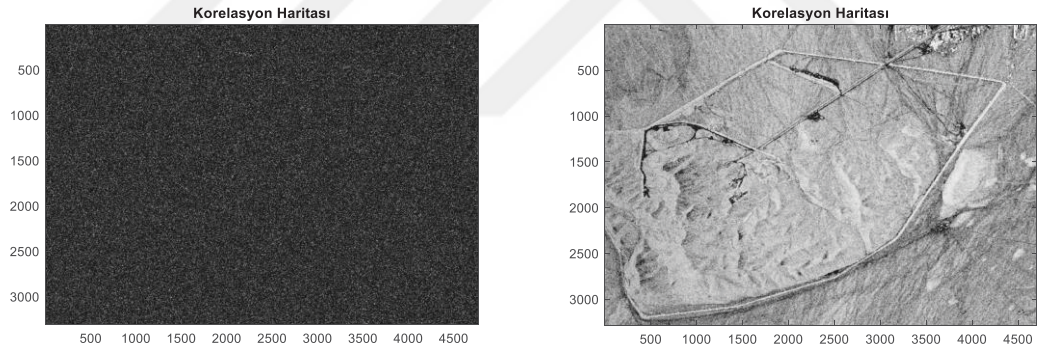
Şekil 5-29: Harita Oluşturma

Şekil 5-29'daki gibi SAR görüntüsü üzerinde gezdirilen belli boyutlardaki pencere içerisine düşen değerler Eşitliklerdeki formüllerde kullanılıp uyum değeri hesaplanır ve haritada ilgili piksele yazılır. Pencereler görüntülerde gezdirilirken birer piksel kaydırılır ve bu şekilde tüm SAR görüntüsü gezdirilir.

Korelasyon haritası, SAR interferometri uygulamaları açısından kritik bir öneme sahiptir.

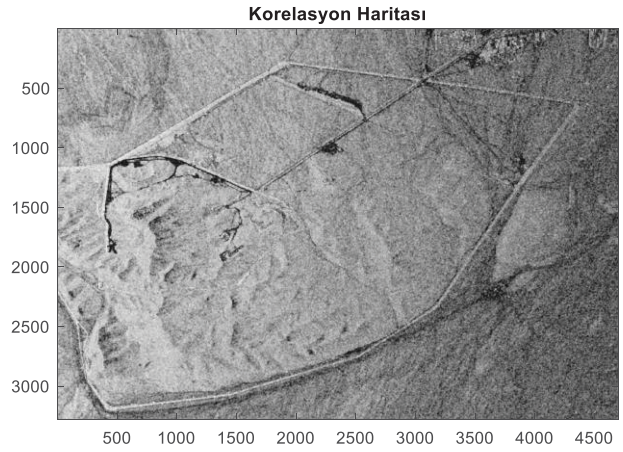
- Korelasyon haritası, SAR interferometri tekniği ile SYM üretme algoritmasın için çakıştırma/hizalama bloğunun hangi doğrulukta yapıldığının anlaşılmasını sağlaması açısından bir geri besleme adımı olarak öne çıkmaktadır.

Örnek olarak *5.2.3. Çakıştırma / Hizalama* bölümünde yer alan Şekil 5-22'deki İran'ın Kum şehrine ait ilgi alanı seçimi yapılmış SAR görüntü çifti alınmıştır. Görüntüler çakıştırma işlemine girmeden evvel Eşitlik 2.69 ve [11x11] boyutunda pencere ile korelasyon haritası oluşturulduğunda haritanın ortalama uyum değeri 0.1337 olmaktadır. Ancak kaba çakıştırma adımı uygulanıp; bu işlem sonucunda ikinci SAR görüntüsü menzil yönünde 75 piksel, azimut yönünde 22 piksel kaydırılmış ve sonra yeniden korelasyon haritası oluşturulduğunda ortalama uyum değeri 0.6423'e yükselmiştir. Oluşan korelasyon haritası, beklendiği üzere değişikliklerin ve gölgede kalan alanların koyu renkte olduğu, değişim olmayan aynı kalan bölgelerin ise açık renkte olduğu bir haritadır. Şekil 5-30'da üretilen korelasyon haritaları çakıştırma adımının önemini göstermektedir. Aynı noktaya ait pikseller üst üste getirilip çakıştırılmadan SAR interferometrinin hiçbir uygulamasını doğru bir şekilde tamamlamak mümkün değildir.



Şekil 5-30: Çakıştırma Adımı Öncesi ve Sonrası Korelasyon Haritaları

Örneğin kaba çakıştırma adımı uygulamasına tekrar bakılacak olursa, Çizelge 5-2'de hiç de azımsanmayacak kadar çok pencere, görüntünün menzil yönünde 74 piksel kaydırılması gerektiğini söylemektedir. Çizelge 5-2 incelenirse; 216 adet pencerenin ¼'ü 74 piksel kaydırma sonucunu bulurken, geri kalanların (bir aykırı değer üreten pencere hariç) 75 piksel bulduğu görülür. Nihai sonuç belirleme yöntemi olarak en çok tekrar eden değer seçildiği için 75 piksel seçilmiştir. Ancak eğer 74 seçilse ne olurdu diye baktığımızda üretilen korelasyon haritasının (Bkz. Şekil 5-31) ortalama uyum değerinin 0.5242'ye düştüğünü görmekteyiz. Bu sebeple 75 seçmenin daha doğru olduğunu korelasyon haritasına ve ortalama uyum değerine bakarak da doğrulamaktayız.



Şekil 5-31: Çakıştırma Adımı Sonucu Değiştirilerek Üretilen Korelasyon Haritası

Şekil 5-31 ve Çizelge 5-2 birlikte incelendiğinde; korelasyon haritasının sol bölgesinin daha açık renkte olduğu ve bunun sebebinin tablodaki 74 sonucu üreten pencerelerin de aynı bölgede oldukları söylenebilir. Zira Şekil 5-31'deki korelasyon haritası menzil yönünde 74 piksel kaydırma yapılarak üretilmiştir.

Daha da yüksek bir ortalama uyum değeri elde edebilmek için piksel altı seviyede bir kaydırma yapılabilir. Ancak SAR görüntüsü menzil yönünde 75 piksel kaydırma işlemi ile yeterli bir ortalama uyum değeri yakalandığı için hassas çakıştırma ya da piksel altı seviyede çakıştırma gibi hesaplama karmaşıklığı yüksek adımlara gerek duyulmayabilir.

Kaba çakıştırma işlemi sonrası Eşitlik 2.70 ve [11x11] boyutunda pencere ile korelasyon haritası oluşturulduğunda haritanın ortalama uyum değeri 0.6392 olmaktadır. Formüllerin farklı ortalama uyum değeri üretmesi de beklenen bir durumdur.

Korelasyon haritasının SAR interferometri uygulamaları açısından bir diğer önemi daha bulunmaktadır.

- Korelasyon haritası, yol izleme metoduna dayalı katlı faz açma algoritmalarının birçoğunda rehber harita olarak kullanılmaktadır.

Rehber harita olarak kullanım şekli algoritmaya göre farklılık arz etmektedir. Kimisinde izlenecek yolu belirlerken, kimisinde ise katlı fazı açarken geçilmemesi gereken bariyerlerin oluşturulmasında kullanılmaktadır. Rehber harita kullanan katlı fazı açma algoritmaları performans olarak kullandıkları haritaya göbekten bağlı durumdadırlar. Bu sebeple rehber harita olarak kullanılan haritanın yüksek doğrulukta olması önemlidir. Örneğin ortalama uyum değeri düşük bir korelasyon haritasını kullanmak katlı faz açma adımında büyük hatalar yapmaya neden olacaktır. Bunun yerine farklı haritalar üretilerek

onlar tercih edilebilir. Ya da haritada üzerindeki bazı özelliklerin belirginleştirilmesi katlı faz açma algoritmasında doğruluk yüzdesini arttıracaktır. Bu kısımla ilgili örnekler *5.2.7 Katlı Faz Açma* bölümünde verilmiştir**.**

Korelasyon haritasının SAR interferometri uygulamalarından faz uyumlu değişiklik tespiti açısından da büyük önemi bulunmaktadır. Zira üretilen harita, ilgili SAR interferometri uygulamasında değişiklik tespiti amacıyla kullanılmaktadır.

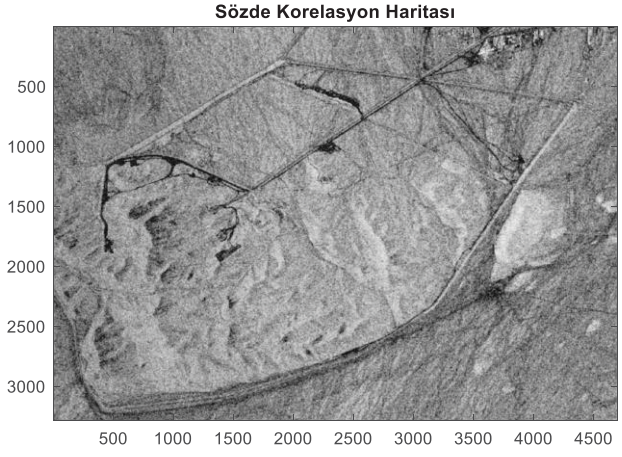
- Aynı bölgenin farklı zamanlarda alınmış görüntü çifti arasındaki farklılıklar ve değişimler görüntüler arasında belirgin bir faz farkına sebep olacak ve bu değişiklikşer korelasyon haritasında görülebilecektir.

5.2.5.2. Sözde Korelasyon Haritası Oluşturma

Üretilebilecek haritalardan biri de sözde korelasyon (Pseudo Correlation) haritasıdır. Kompleks SAR görüntülerinin sadece faz bilgileri kullanılarak Eşitlik 2.72'deki formülle Şekil 5-29'daki gibi hesaplanır. Sadece faz bilgisi kullanması yönüyle korelasyon haritasından ayrılmaktadır.

Tez kapsamında benzetim ortamında geliştirilen kullanıcı arayüzünden sözde korelasyon haritası üretmek için gerekli kare pencerenin kenar boyutu seçimi yapılabilmektedir.

Sözde Korelasyon Haritası üretmek için örnek olarak *5.2.3. Çakıştırma / Hizalama* bölümünde yer alan Şekil 5-22'deki İran'ın Kum şehrine ait ilgi alanı seçimi yapılmış SAR görüntü çifti alınmıştır. Görüntüler çakıştırıldıktan sonra (menzil yönünde 75 piksel, azimut yönünde 22 piksel) Eşitlik 2.72'deki sözde korelasyon haritası oluşturma formülü kullanılarak [11x11] boyutunda pencere ile oluşturulan haritanın ortalama uyum değeri 0.5322 olmaktadır. Oluşturulan harita Şekil 5-32'de paylaşılmıştır.



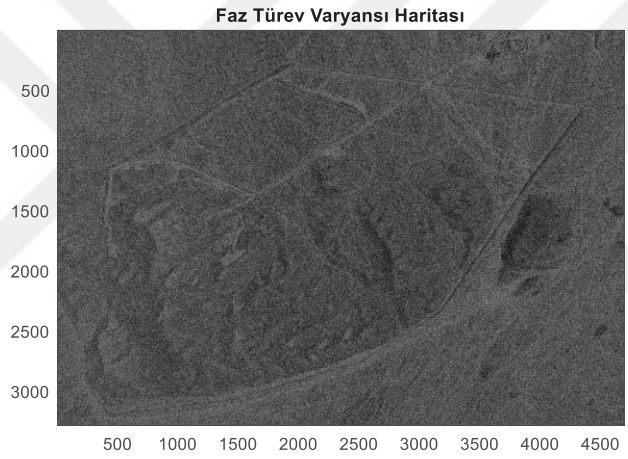
Şekil 5-32: Sözde Korelasyon Haritası (TerraSAR-X - İran/Kum)

5.2.5.3. Faz Türev Varyansı Haritası Oluşturma

Üretilebilecek haritalardan biri de Faz Türev Varyansı haritasıdır. Katlı fazın açılması adımında seçilen algoritmaya girdi olarak kullanılabilmektedir. Eşitlik 2.73'teki formülle Şekil 5-29'daki gibi hesaplanır.

Tez kapsamında benzetim ortamında geliştirilen kullanıcı arayüzünden faz türev varyansı haritası üretmek için gerekli kare pencerenin kenar boyutu seçimi yapılabilmektedir.

Faz Türev Varyansı Haritası üretmek için örnek olarak *5.2.3. Çakıştırma / Hizalama* bölümünde yer alan Şekil 5-22'deki İran'ın Kum şehrine ait ilgi alanı seçimi yapılmış SAR görüntü çifti alınmıştır. Görüntüler çakıştırıldıktan sonra (menzil yönünde 75 piksel, azimut yönünde 22 piksel) Eşitlik 2.73'teki formül kullanılarak Şekil 5-33'teki faz türev varyansı haritası oluşturulmuştur.

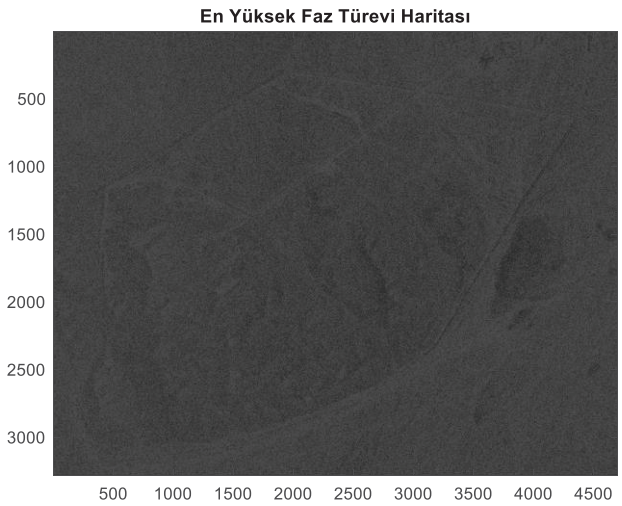


Şekil 5-33: Faz Türev Varyansı Haritası (TerraSAR-X - İran/Kum)

5.2.5.4. En Yüksek Faz Türevi Haritası Oluşturma

Üretilebilecek haritalardan biri de En Yüksek Faz Türevi haritasıdır. Katlı fazın açılması adımında seçilen algoritmaya girdi olarak kullanılabilmektedir. Eşitlik 2.74 ve Eşitlik 2.75'teki gibi pencere içerisine düşen faz türevinin en yüksek değeri seçilip merkez piksele yazılarak Şekil 5-29'daki gibi harita oluşturulur. Bu sayede yüksek faz türevi olan pikseller öncelenmekte ve düşük faz türevi olan pikseller dikkate alınmamaktadır.

Tez kapsamında benzetim ortamında geliştirilen kullanıcı arayüzünden en yüksek faz türevi haritası üretmek için gerekli kare pencerenin kenar boyutu seçimi yapılabilmektedir.



Şekil 5-34: En Yüksek Faz Türevi Haritası (TerraSAR-X - İran/Kum)

En Yüksek Faz Türevi Haritası üretmek için örnek olarak *5.2.3. Çakıştırma / Hizalama* bölümünde yer alan Şekil 5-22'deki İran'ın Kum şehrine ait ilgi alanı seçimi yapılmış SAR görüntü çifti alınmıştır. Görüntüler çakıştırıldıktan sonra (menzil yönünde 75 piksel, azimut yönünde 22 piksel) Eşitlik 2.74 ve Eşitlik 2.75'teki formül kullanılarak Şekil 5-34'teki en yüksek faz türevi haritası oluşturulmuştur.

5.2.5.5. Genlik Değişiklik Tespiti Haritası Oluşturma

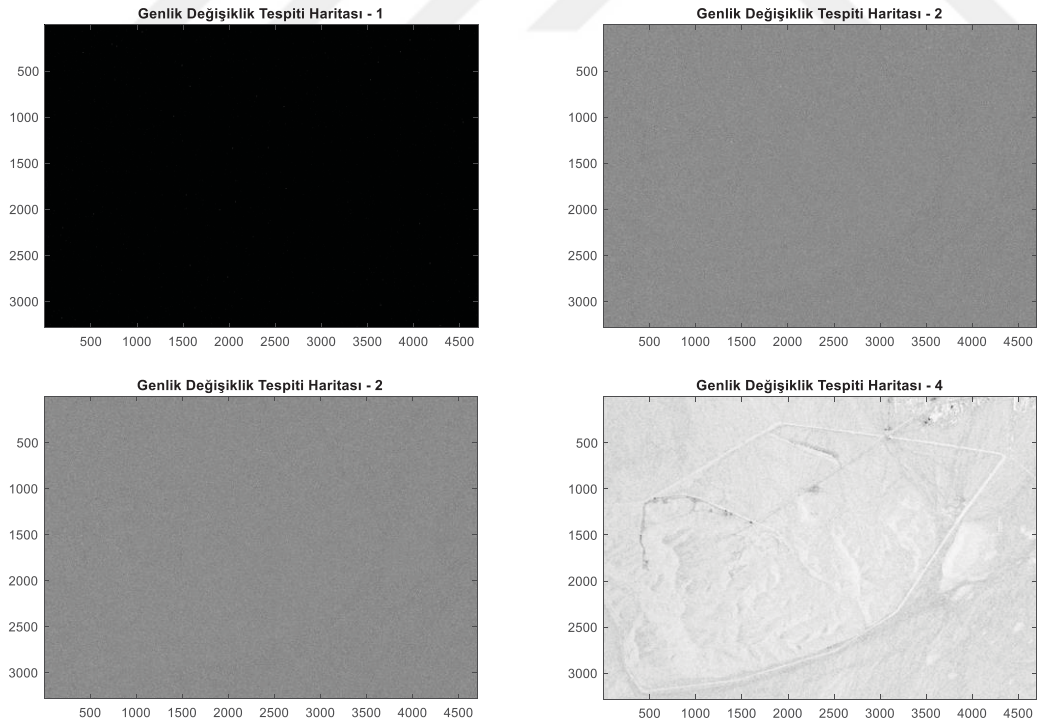
Harita oluşturma bloğu içerisinde oluşturulabilen haritalardan biri de genlik değişiklik tespiti haritasıdır. Genlik değişiklik tespiti haritası üretmek için gereken formül Eşitlik 2.76, Eşitlik 2.77, Eşitlik 2.78 ve Eşitlik 2.79'da verilmiştir. Formüllerden istenilen biri kullanıcı tarafından tez kapsamında benzetim ortamında geliştirilen kullanıcı arayüzünden seçilebilmektedir. Ayrıca kullanıcı arayüzünden genlik değişiklik tespiti haritası üretmek için gerekli kare pencerenin kenar boyutu seçimi yapılabilmektedir.

Genlik değişiklik tespiti haritası oluşturma bloğu da tıpkı korelasyon haritası oluşturma bloğu gibi çakıştırılmış SAR görüntü çiftleri arasındaki genlik uyumunu hesaplamak için kullanılmaktadır. Çıktı olarak genlik değişiklik tespiti haritası üretmektedir. Genlik uyumu hesaplama bloğu sayesinde SAR görüntü çiftleri arasındaki genlik farklılıkları ve benzerlikleri tespit edilebilmektedir. Böylelikle aynı bölgenin farklı zamanlarda alınmış SAR görüntüleri arasındaki genlik tabanlı değişimler de bu harita kullanılarak tespit edilebilecektir.

Genlik Değişiklik Tespiti Haritası bilhassa iki görüntünün bir tanesinde olan diğerinde hiç olmayan nesnelerin tespitinde faz uyum haritasıyla birlikte kullanılarak yararlı sonuçlar verebilmektedir. Örneğin görüntülerin birinde yer alan bir aracın diğerinde olmaması, ya da tam tersi bir durum genlik değişiklik tespiti haritasında kolaylıkla tespit edilebilecektir.

Genlik Değişiklik Tespiti Haritası üretmek için örnek olarak *5.2.3. Çakıştırma / Hizalama* bölümünde yer alan Şekil 5-22'deki İran'ın Kum şehrine ait ilgi alanı seçimi yapılmış SAR görüntü çifti alınmıştır. Görüntüler çakıştırıldıktan sonra (menzil yönünde 75 piksel, azimut yönünde 22 piksel) sırasıyla Eşitlik 2.76, Eşitlik 2.77, Eşitlik 2.78 ve Eşitlik 2.79'daki formüller kullanılarak Şekil 5-35'teki genlik değişiklik tespiti haritaları oluşturulmuştur.

Eşitlik 2.79'daki formülde sadece SAR görüntülerinin genlik bilgisi kullanılarak korelasyon haritasına benzer bir harita elde edilmiştir. Haritanın ortalama genlik uyumu değeri 0.8697 olarak hesaplanmıştır. Bu da SAR görüntü çifti için genlik uyumunun faz uyumuna göre daha iyi olduğunu göstermektedir.



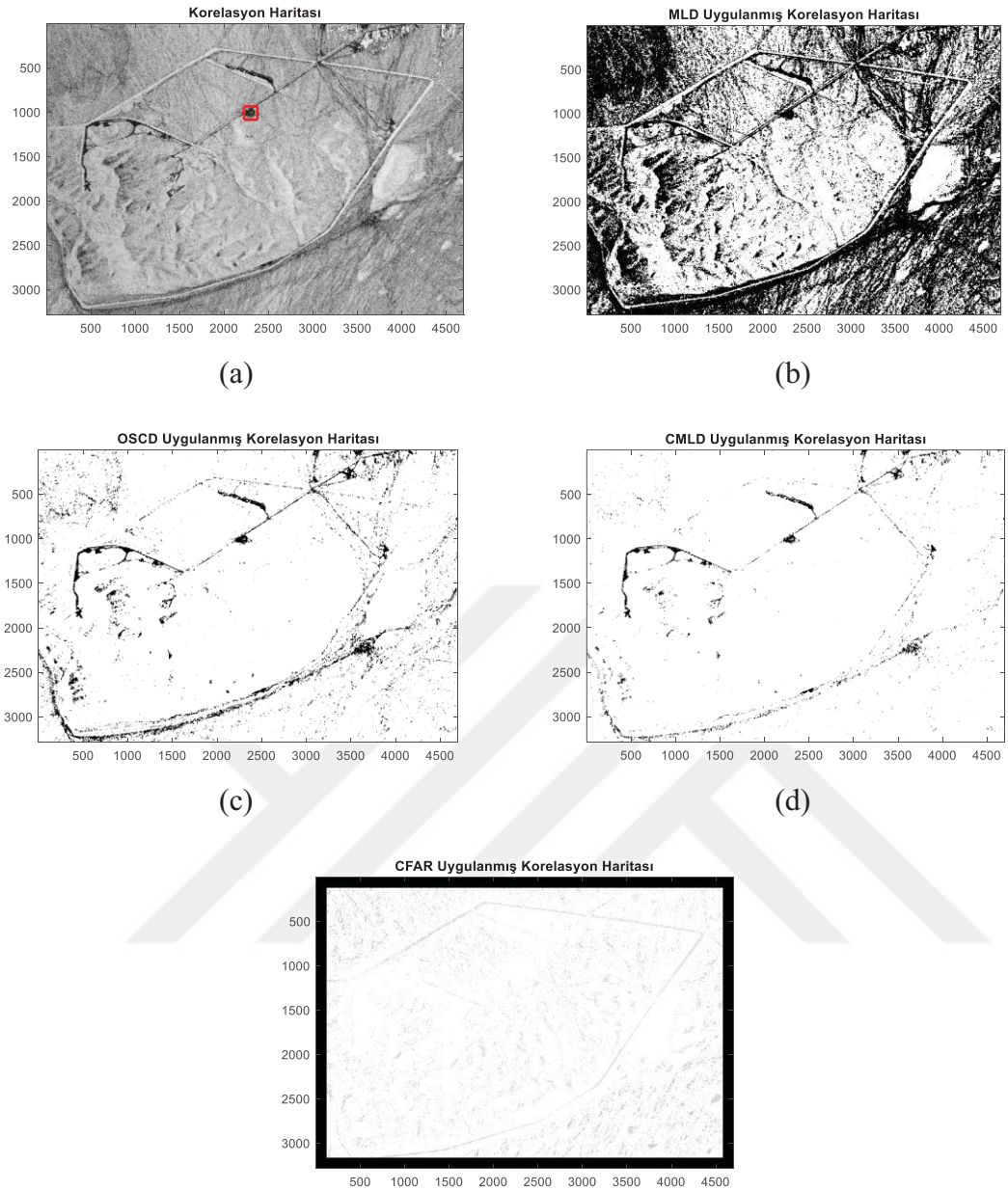
Şekil 5-35: Genlik Değişiklik Tespiti Haritaları (TerraSAR-X - İran/Kum)

5.2.6. Harita Belirginleştirme

Oluşturulan haritalardaki özelliklerin belirginleştirilmesi birçok açıdan kritik öneme sahiptir. Katlı faz açma adımında bariyerlerin doğru belirlenmesi sağlanacaktır. Ancak belirginleştirme işlemi sonrası halen bazı ek işlemler yapılması gerekebilir. Morfolojik işlemler uygulanarak kırılmalar veya ani yükselişler daha da belirginleştirilir. Küçük hatalı pikseller ise yok edilir. Belirginleştirme işlemi değişiklik tespitinde de değişiklik olan kısımların diğer bölgelerden ayırt edilmesine imkân verecektir. Bunun için korelasyon haritası ve genlik değişiklik tespiti haritası örnek olarak alınarak belirginleştirme yöntemleri uygulanmıştır.

Şekil 5-30'da çakıştırma sonrası üretilen doğru korelasyon haritası alınarak MLD, OSCD, CMLD ve CFAR belirginleştirme teknikleri uygulanıp Şekil 5-36'daki versiyonlar üretilmiştir.

- MLD yöntemi ile haritadaki değerlerin ortalaması ($\zeta_{MLD} = 0.6390$) eşik olarak belirlenmiştir. MLD yöntemi bu tip değişimin çok az olduğu haritalarda hatalı sonuçlar üretmektedir. Değişiklik olmayan bölgeleri de siyaha boyamış ve hatalı böylelikle hatalı bölgeleri de belirginleştirmiştir.
- OSCD yönteminde ise ilk korelasyon haritasındaki değerlerden en küçük değer ($\gamma_1 = \gamma_{min} = 0$) ve en büyük değer ($\gamma_{(N_M x N_A)} = \gamma_{max} = 0.9956$) belirlenmiştir. Eşik değer olarak %5 belirlenmiş ($\gamma_{(N_M x N_A x 0.05)} = \zeta_{OSCD} = 0.4034$) ve korelasyon haritasındaki tüm pikseller için yeniden değerleme yapılmış ve belirlenen eşiğin altındaki değerler 0'a, üstündeki tüm değerler 1'e çekilmiştir.
- CMLD yönteminde ise kırmızı kare ile belirlenmiş bölgenin ortalama değeri hesaplanmış ($\zeta_{CMLD} = 0.3042$) ve eşik olarak hesaplanan bu değer belirlenmiştir. Kırmızı bölge orijinal korelasyon haritasında siyah yani değişiklik olan bölge olduğu için bilerek orası seçilmiştir. Doğru bir eşik hesaplandığı için haritadaki değişiklik olan kısımlar CMLD tekniği ile düzgün bir şekilde belirginleştirilmiştir.
- CFAR yönteminde ise [251x251] boyutunda bir pencere korelasyon haritası boyunca gezdirilerek ve her pencere için 0.02 yanlış alarm oranı seçilerek harita belirginleştirme uygulanmıştır. Ancak CFAR yönteminin işlem süresi diğer yöntemlere göre oldukça uzun sürmektedir.



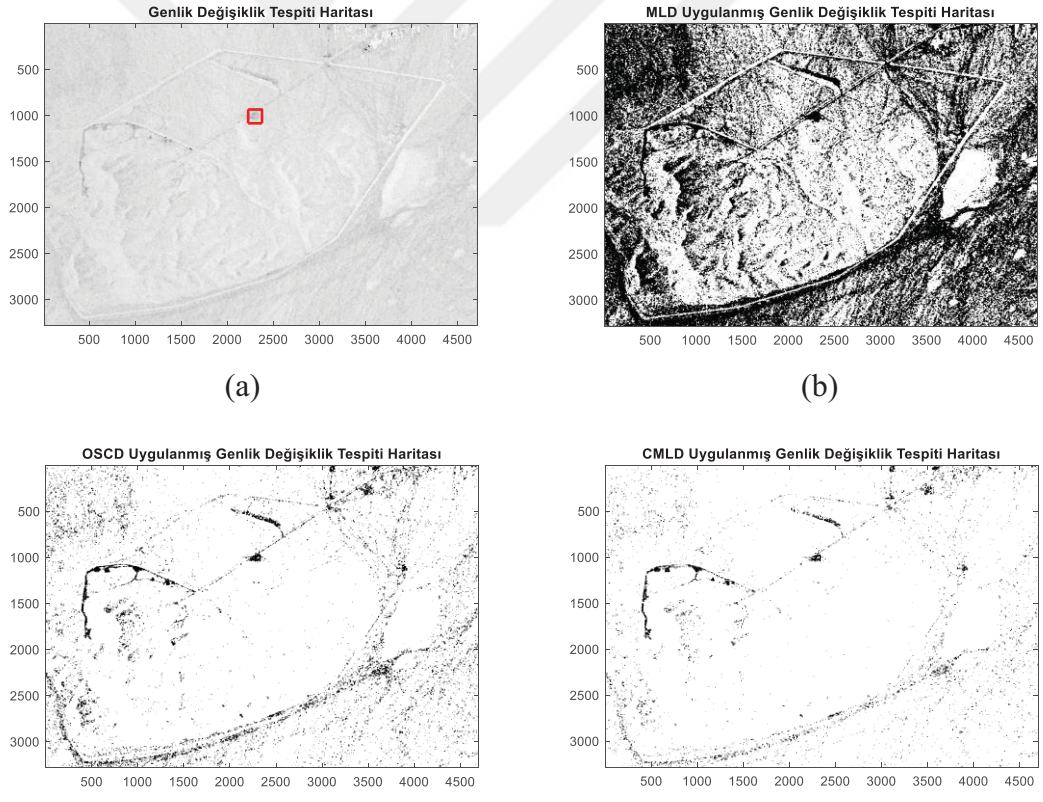
Şekil 5-36: (a): Korelasyon Haritası, (b): MLD Yöntemi ile Belirginleştirilmiş Korelasyon Haritası, (c): OSCD Yöntemi ile Belirginleştirilmiş Korelasyon Haritası, (d): CMLD Yöntemi ile Belirginleştirilmiş Korelasyon Haritası, (e): CFAR Yöntemi ile Belirginleştirilmiş Korelasyon Haritası

Bir diğer örnek olarak ise Şekil 5-35'teki dördüncü ve son genlik değişiklik tespiti haritası alınarak MLD, OSCD ve CMLD belirginleştirme teknikleri uygulanıp Şekil 5-37'deki versiyonlar üretilmiştir.

- MLD yönteminin çok düzgün sonuç vermediği görülmektedir. Çünkü haritadaki değerlerin ortalamasının ($\zeta_{MLD} = 0.8697$) eşik olarak belirlenmesi bu tip

değişimin çok az olduğu haritalarda hatalı sonuçlar üretmektedir. Değişiklik olmayan bölgeleri de siyaha boyamış ve belirginleştirmiştir.

- OSCD yönteminde ise ilk olarak genlik değişiklik tespiti haritasındaki değerler küçükten büyüğe sıralanmıştır. En küçük değer ($\gamma_1 = \gamma_{min} = 0$) ve en büyük değer ($\gamma_{(N_M x N_A)} = \gamma_{max} = 0.9989$) belirlenmiştir. Eşik değer olarak %5 belirlenmiş ($\gamma_{(N_M x N_A x 0.05)} = \zeta_{OSCD} = 0.7598$) ve korelasyon haritasındaki tüm pikseller için yeniden değerleme yapılmış ve belirlenen eşiğin altındaki değerler 0'a, üstündeki tüm değerler 1'e çekilmiştir.
- CMLD yönteminde ise kırmızı kare ile belirlenmiş bölgenin ortalama değeri hesaplanmış ($\zeta_{CMLD} = 0.7920$) ve eşik olarak hesaplanan bu değer belirlenmiştir. Kırmızı bölge orijinal genlik değişiklik tespiti haritasında siyah olduğu için bilerek orası seçilmiştir. Doğru bir eşik hesaplandığı için haritadaki değişiklik olan kısımlar CMLD tekniği ile düzgün bir şekilde belirginleştirilmiştir.



Şekil 5-37: (a) Genlik Değişiklik Tespiti Haritası (b): MLD Yöntemi ile Belirginleştirilmiş Genlik Değişiklik Tespiti Haritası, (c): OSCD Yöntemi ile Belirginleştirilmiş Genlik Değişiklik Tespiti Haritası, (d): CMLD Yöntemi ile Belirginleştirilmiş Genlik Değişiklik Tespiti Haritası

5.2.7. Katlı Faz Açma

Aynı bölgenin iki SAR görüntüsünün piksel bazında çakıştırılıp ilgili piksele ait faz farkı bilgisinin doğru şekilde hesaplandığından emin olduktan sonra topoğrafyayı oluşturmak için tek ve son bir adım kalmaktadır. Faz değerinin [-π, +π] aralığında olmasından dolayı faz farkı bilgisi katlanmaktadır. Katlı olan bu faz değerleri doğru bir şekilde açılmalıdır.

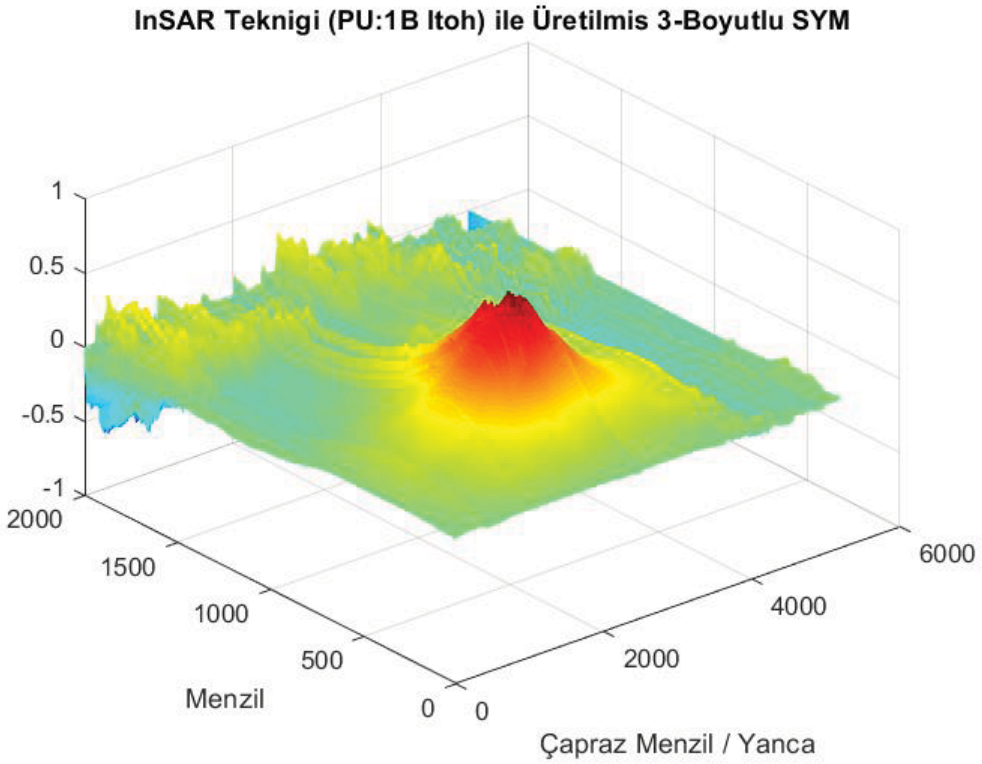
SAR interferometri tekniğinde katlı fazın açılması işlemi iki boyutta yapılabileceği gibi tek boyutta iki kerede de yapılabilir. Ancak iki boyutlu SAR görüntülerinin katlı fazının açılması işlemi tek boyutta sırasıyla yapıldığı durumda büyük hatalar meydana gelmektedir. Bu sebeple her iki boyutta birden katlı fazın açılması gerekmektedir. Hem menzilde hem de çapraz menzilde eş zamanlı olarak katlı fazın açılması oluşturulacak yükseklik modelinin hatasını büyük ölçüde azaltmaktadır.

5.2.7.1. Tek Boyutta Katlı Faz Açma

Katlı Fazı Açma işlemi önce bir yönde sonra diğer yönde yapılmaması gereken bir işlemdir. Katlı faz her iki yönde birlikte açılmalıdır [5]. Ancak bazı hatalar yapılacağı kabul edilerek önce menzilde sonra çapraz menzilde bu işlem yapılabilir.

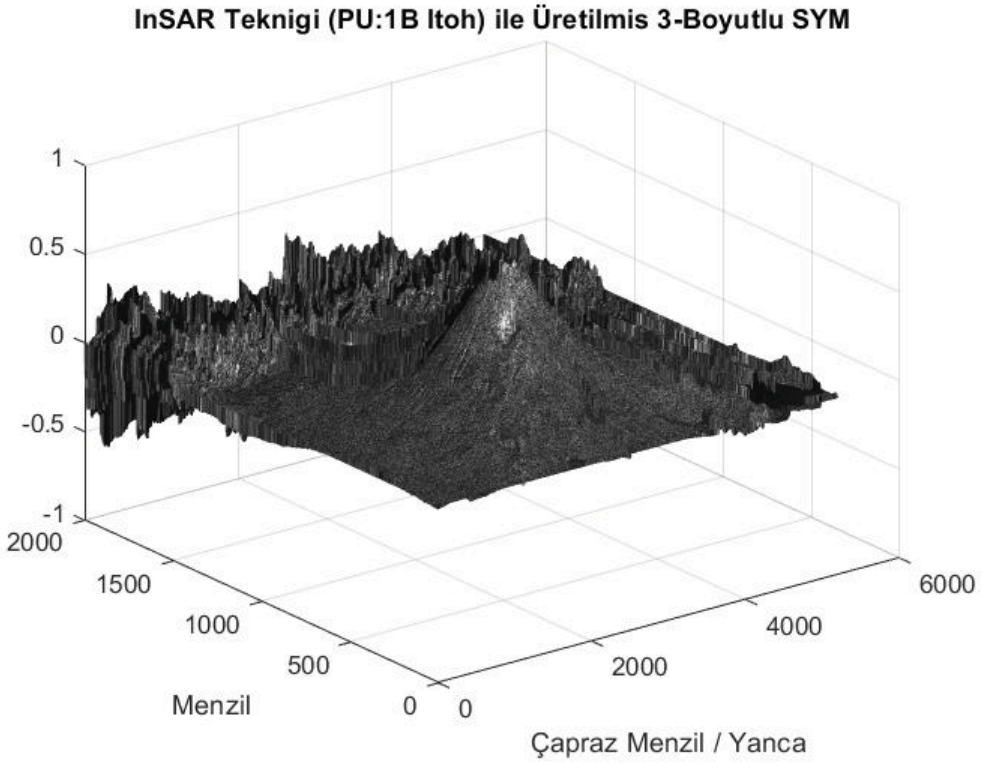
Örnek olarak Şekil 5-4'teki ERS uydusuna ait İtalya'daki Etna Yanardağını da içeren SAR görüntü çifti alınmıştır. Şekil 5-24'teki gibi üretildikten sonra düzleştirilen interferogramı tek boyutlu katlı faz açma işlemine girdi olarak verilmiştir. Tek boyutlu katlı faz açma işlemi menzil yönünde Itoh metodu kullanılarak uygulandıktan sonra aynı işlem çapraz menzilde tekrar edilerek Şekil 5-38'deki gibi Sayısal Yükseklik Modeli elde edilmiştir. Ancak görüldüğü üzere SYM'de çok ciddi hatalar görülmektedir. Hataların kırılma şeklinde olduğu ve hep aynı yönde olduğu görülmektedir. Sebebi ise katlı fazın sırasıyla tek boyutta yapılmasıdır. Çünkü Mark Richards'ın da dediği gibi SAR interferometri tekniğinde katlı fazı açma işlemi parçalanabilir bir yöntem değildir ve her iki boyutta birden uygulanmalıdır.

Tek boyutta sırasıyla katlı faz açma yöntemi diğer tüm katlı faz açma yöntemlerine göre çok hızlı ve kolay bir algoritmaya sahip olmasından dolayı bölgenin yükseklik profili ve topoğrafyası hakkında çok kabaca bir fikir sahibi olmak için kullanılabilir.



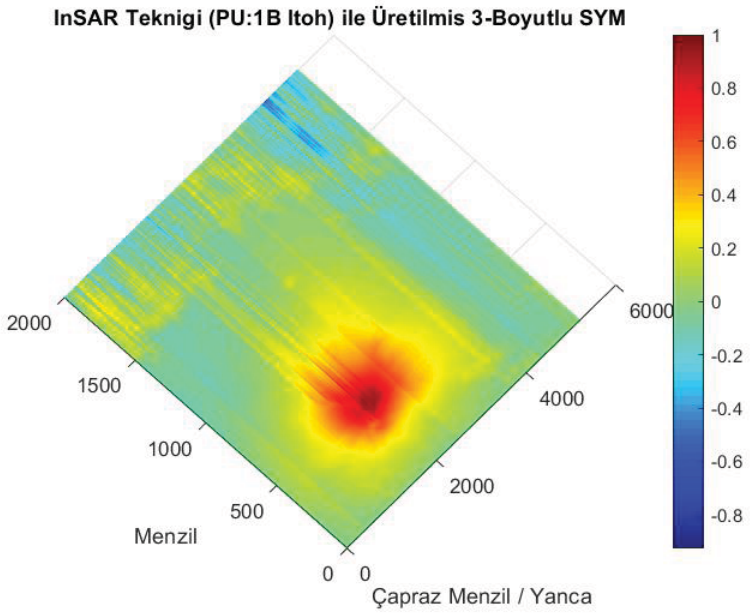
Şekil 5-38: 1B Katlı Fazı Açma İşlemi ile Oluşturulan Renklendirilmiş SYM

Şekil 5-38'deki SYM'ye master SAR görüntüsünün büyüklük değerleri giydirilerek Şekil 5-39 oluşturulmuştur.



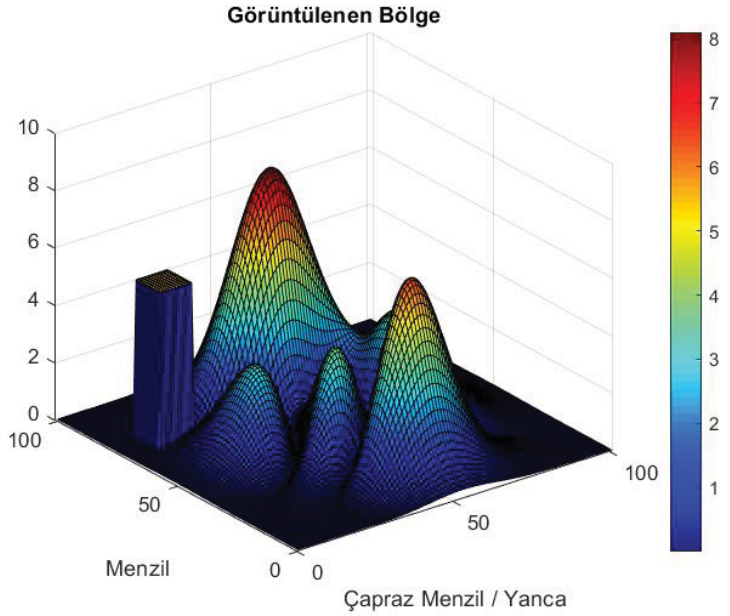
Şekil 5-39: 1B Katlı Fazı Açma İşlemi ile Oluşturulan SYM

Tek Boyutlu katlı fazı açma işlemi sonucunda oluşturulan SYM'deki hataların daha net görülebilmesi için modele üstten bakış görseli Şekil 5-40'da paylaşılmıştır.



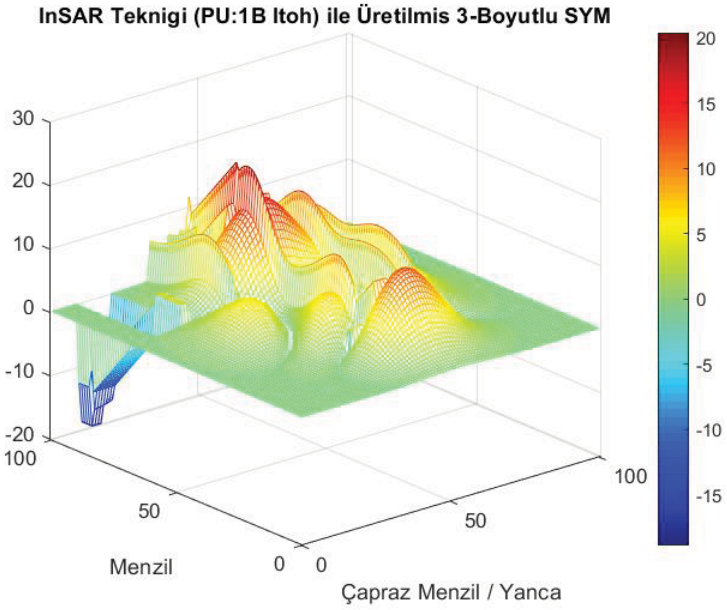
Şekil 5-40: Sayısal Yükseklik Modelinin Tepeden Görünümü

Sentetik olarak oluşturulan Şekil 5-41'deki sanal bölge, *5.1.2. Sentetik Veri Üretimi* bölümünde anlatıldığı üzere iki SAR sensörü ile görüntülenmiş ve sensörlerde oluşan faz farkı bilgisi kullanılarak interferogramları oluşturulmuş ve sonra düzleştirilmiştir (Bkz. Şekil 5-28). Düzleştirilen bu interferogram benzetimi yapılan tüm katlı faz açma algoritmalarına beslenerek algoritmaların kıyaslamalı analizleri yapılmıştır.



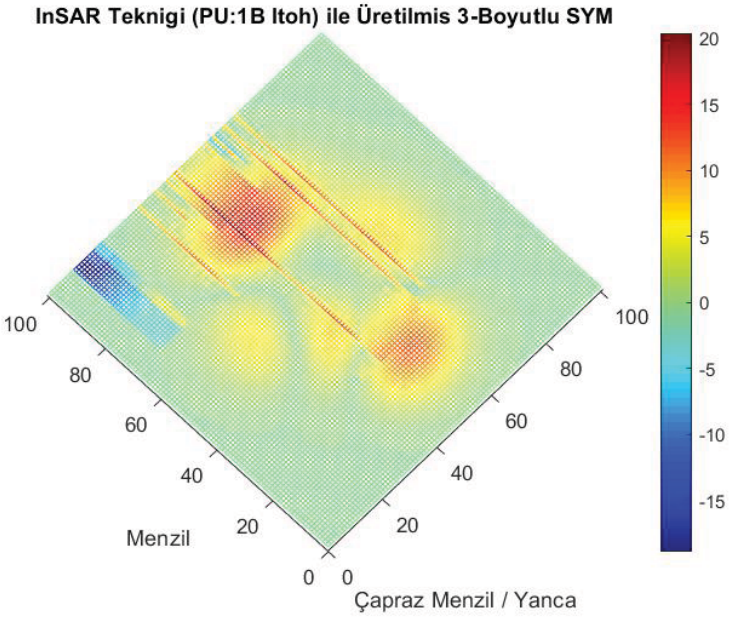
Şekil 5-41: Gölge Etkisi ve Bina Benzeri İnsan Yapıları Olan Sanal Bölge

Menzilde ve çapraz menzilde sırasıyla yapılan tek boyutlu Itoh katlı faz açma yöntemi beklendiği üzere fazı düzgün açamamış ve Şekil 5-42 elde edilmiştir.



Şekil 5-42: 1B Katlı Fazı Açma İşlemi ile Oluşturulan SYM

Üstten görünüm olan Şekil 5-43'te de tıpkı gerçek SAR görüntüsü ile üretilen SYM'nin üstten görünümü olan Şekil 5-40'da olduğu gibi kesikler ve kırılmalar bulunmaktadır.



Şekil 5-43: Sayısal Yükseklik Modelinin Tepeden Görünümü

5.2.7.2.İki Boyutta Katlı Faz Açma

Literatürde yer alan iki boyutlu katlı faz açma algoritmaları Çizelge 2-3'te verilmiştir. Literatürde sıklıkla görülen ve genel olarak bilinen yöntemler tek baz uzaklıklı katlı fazın açılması yöntemleri içerisinde yer alan yol izleme yöntemine dayalı algoritmalardır. Tez kapsamında bu algoritmalar incelenmiş ve benzetimleri yapılmıştır.

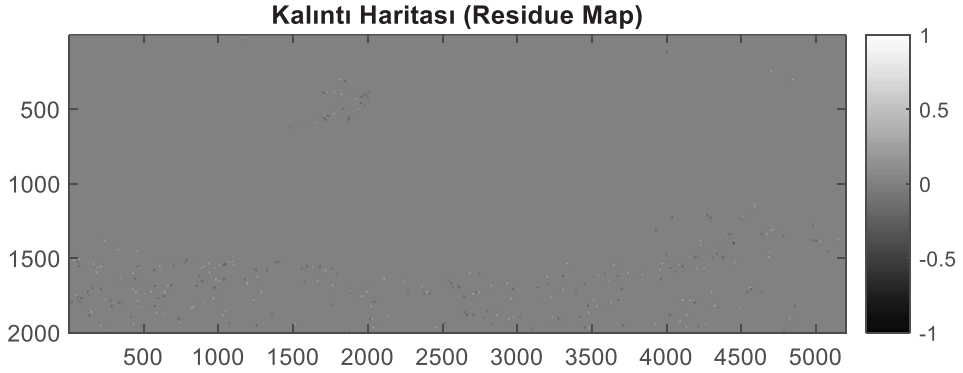
5.2.7.2.1. Tek Baz Uzaklıklı Katlı Faz Açma Algoritmaları

5.2.7.2.1.1. Yol İzleme Metotları

Literatürde bilinen dört adet yol izleme metoduna dayalı katlı faz açma algoritmasının benzetimleri (Matlab ve/veya C/C++) yapılmıştır. Hem gerçek hem de sentetik veriler kullanılarak algoritmalar test edilmiş ve algoritma çıktıları paylaşılmıştır. Katlı faz açma algoritmalarının süre analizleri de en son bölümde yer almaktadır.

5.2.7.2.1.1.1. Goldstein Branch Cut Algoritması

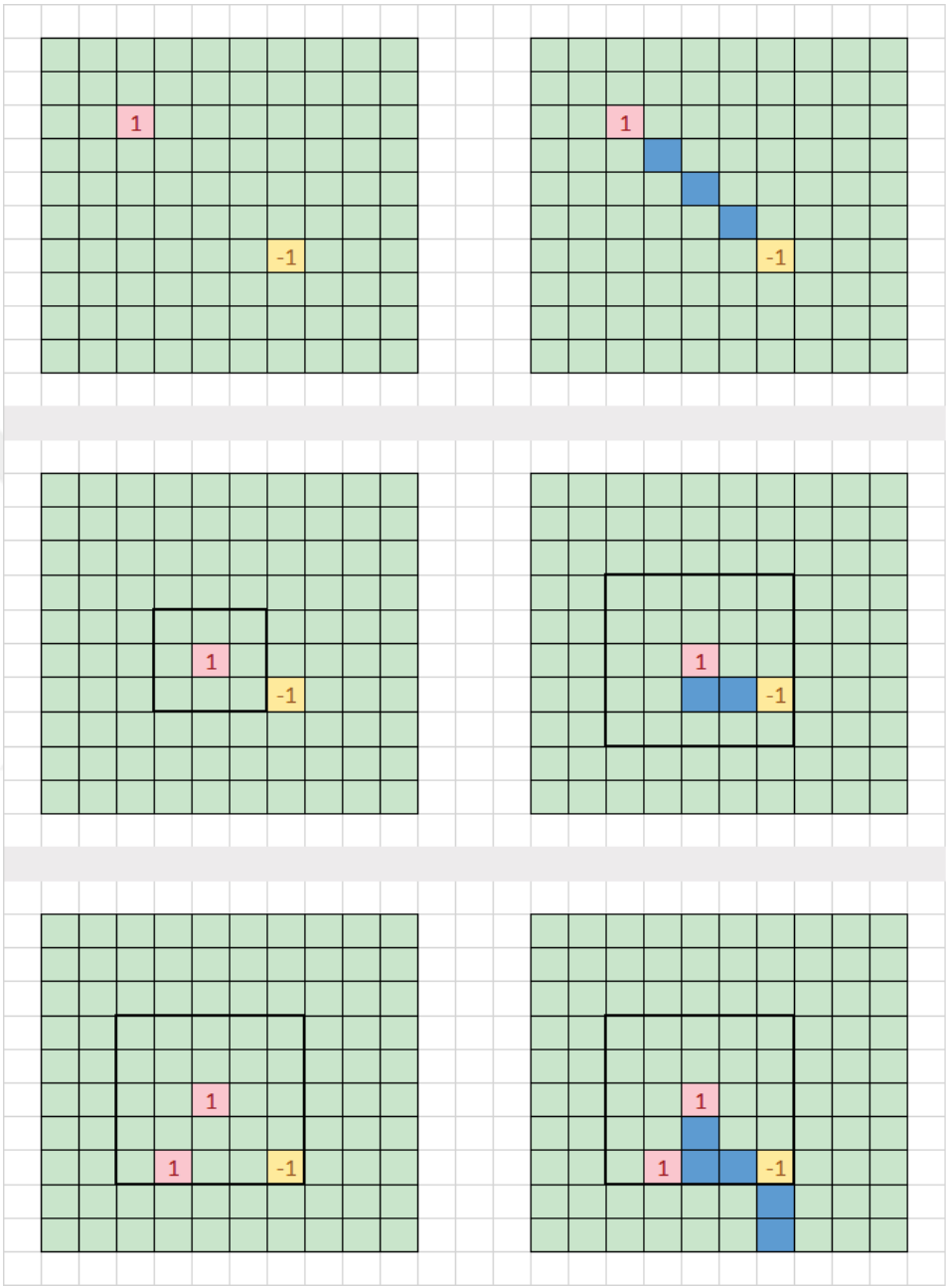
Goldstein Branch Cut Algoritması hem Matlab hem de C/C++ üzerinde çalışacak şekilde gerçeklenmiştir. İlk örnek uygulama olarak Şekil 5-4'teki ERS uydusuna ait İtalya'daki Etna Yanardağını da içeren SAR görüntü çifti alınmıştır. Şekil 5-24'teki gibi üretildikten sonra düzleştirilen interferogramı Goldstein Branch Cut katlı faz açma algoritmasına girdi olarak verilmiştir. İlk olarak İnterferogramdaki her pikseldeki faz değerleri kullanılarak Şekil 5-44'te görüleceği üzere faz kalıntı değerleri hesaplanıp kalıntı haritası oluşturulur.



Şekil 5-44: Goldstein Kalıntı Haritası (Matlab)

Şekil 5-44'te görüldüğü üzere faz kalıntı haritası çoğunlukla sıfır (gri renk) değerinden oluşmaktadır. Ancak yine de belirgin sayıda kalıntı göze çarpmaktadır. Haritadaki 1 (beyaz) ve -1 (siyah) değerleri aslında katlı fazı açma bloğunun ilk adımıdır ve bu adımda

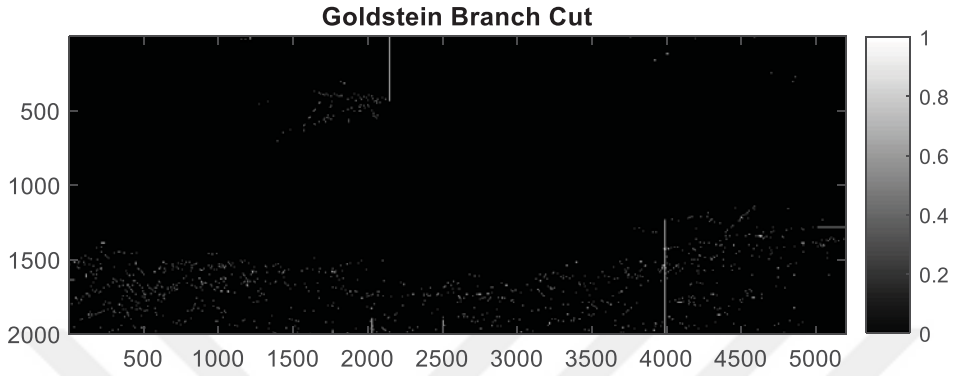
kalıntı değerler çıkarılmıştır. Filtreleme işlemi tam bu adımdan önce yapılmalı ve kalıntı sayısı mümkün mertebe düşük tutulmalıdır. Böylelikle katlı fazı açma adımında yapılabilecek hataların da büyük ölçüde önüne geçilmiş olacaktır.



Şekil 5-45: Kalıntıların Birleştirilmesi ve Branch-cut'ların Oluşturulması

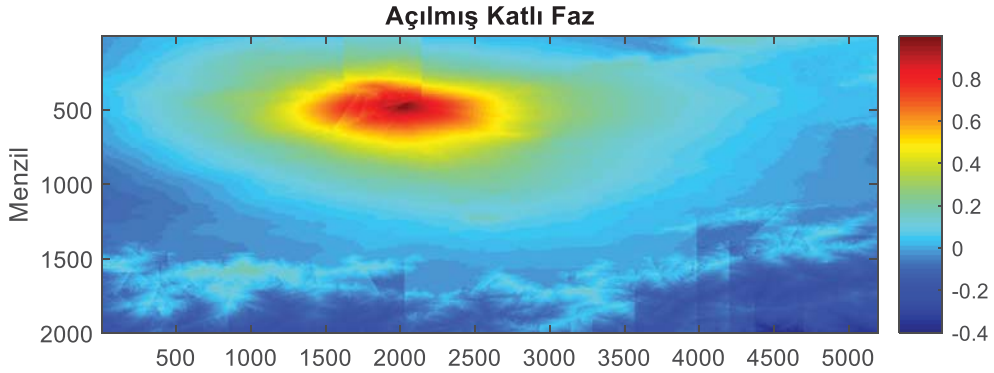
Kalıntı değerleri bulunduktan sonra yapılması gereken bu kalıntıları Şekil 5-45'teki gibi birbirlerine bağlayarak nötrlemek ve Şekil 5-46'daki gibi branch-cut olarak isimlendirilen bariyerleri oluşturmaktır. Goldstein yönteminde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta birbirine en yakın negatif ve pozitif kalıntıları bağlayarak en optimum ve en kısa Branch-

cut'ları elde etmektir. Bunu yaparken Branch-cut'ların birbirini kesmemesi ve kapalı bir bölge oluşturmamasını sağlamak gerekmektedir. Tüm bağlantılar yapıldığında halen boşta kalan negatif ve pozitif kalıntılar ise Şekil 5-46'nın sağ alt tarafındaki gibi en yakın kenara topraklanmalıdır.



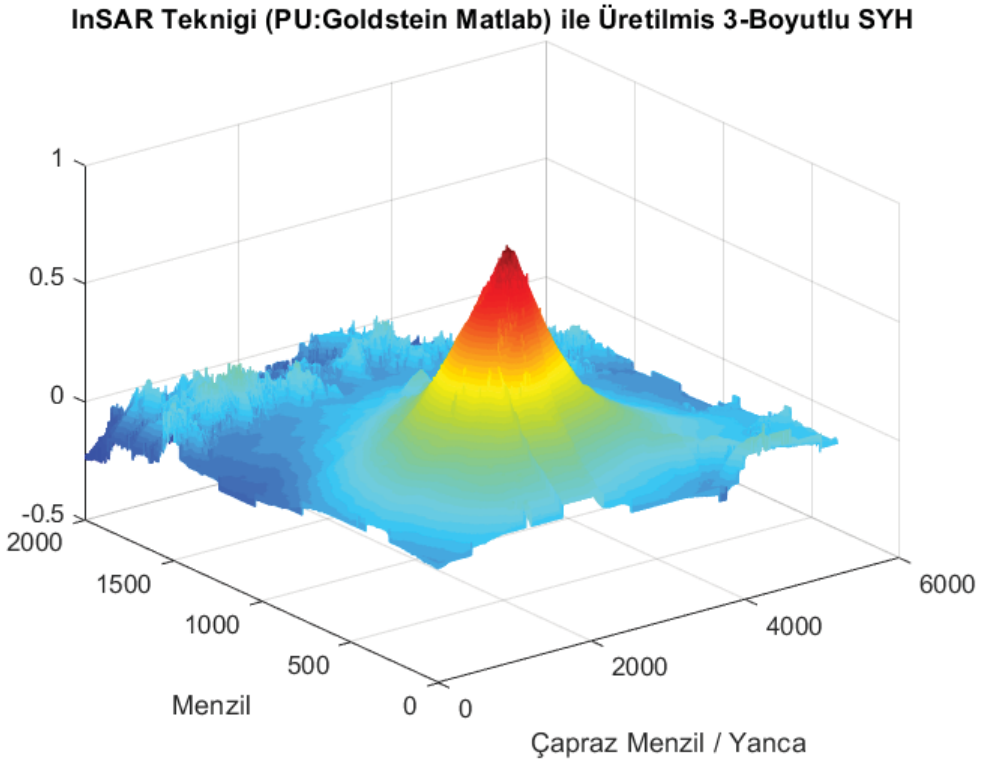
Şekil 5-46: Goldstein Oluşturulan Bariyer (Branch-cut) Haritası (Matlab)

Goldstein algoritmasına göre bariyerler (branch-cut) oluşturulduktan sonra katlı fazı açma işlemine başlanacaktır. Başlama noktası otomatik atanabilir veya kullanıcı tarafından belirlenen bir pikselden başlanarak katlı faz açılabilir. Ancak topoğrafyanın doğası gereği ani yükseliş veya düşüşün olduğu yerlerde komşu pikseller arasındaki faz farkı 2pi değerinden fazla olabilir. Yine de çoğunlukla fazın katlanmasından kaynaklı 2pi civarında faz farkı oluşmaktadır. İşte tam bu noktada nerde fazın açılacağı nerde ise gerçekten topooğrafyadan kaynaklı faz farkı olduğu ve fazın açılmaması gerektiği bilinememektedir. Bu tip durumlar Goldstein yöntemi ile belirlenen bariyerler yani branch cut'lar aracılığıyla tahmin edilmektedir. Branch cut'ların olduğu kısımda faz açılmaz ve burada topoğrafyadan kaynaklı bir faz katlanması olduğu kabul edilir. Tam da bu sebeple bariyerlerin (branch-cut'ların) doğru oluşturulamaması hatalı Sayısal Yükseklik Modeli oluşturulmasına sebep olur.



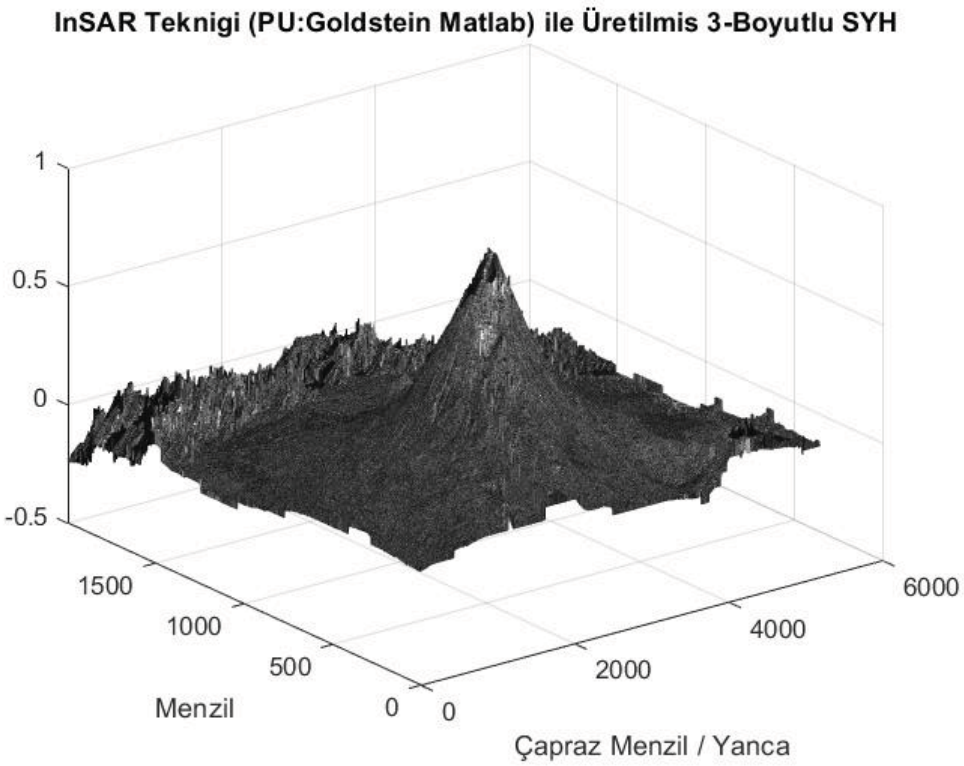
Şekil 5-47: Goldstein Açılmış Katlı Faz (Matlab)

Katlı faz açıldıktan sonra oluşan sayısal yükseklik modelinin iki boyutlu renklendirilmiş görüntüsü Şekil 5-47'de verilmiştir. Renklendirilmiş görüntü dikkatle incelendiğinde bazı bölgelerde kırılmaların olduğu görülecektir. Bu ani / sert geçişlerin temel sebebi çoğunlukla görüntünün kenarına topraklanmış kalıntılardır. Kısacası hatalı oluşturulmuş branch cut'lardır.



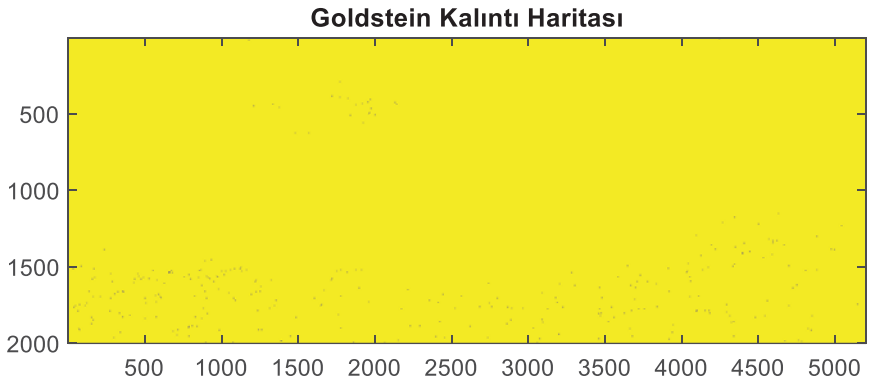
Şekil 5-48: Goldstein Branch Cut Yöntemi ile Üretilen Renklendirilmiş SYM (Matlab)

Şekil 5-48'de üç boyutlu renklendirilmiş SYM paylaşılmıştır. Şekil 5-49'da ise histogram eşitlenmiş master SAR görüntüsünün büyüklük değerleri giydirilmiş SYM verilmiştir.

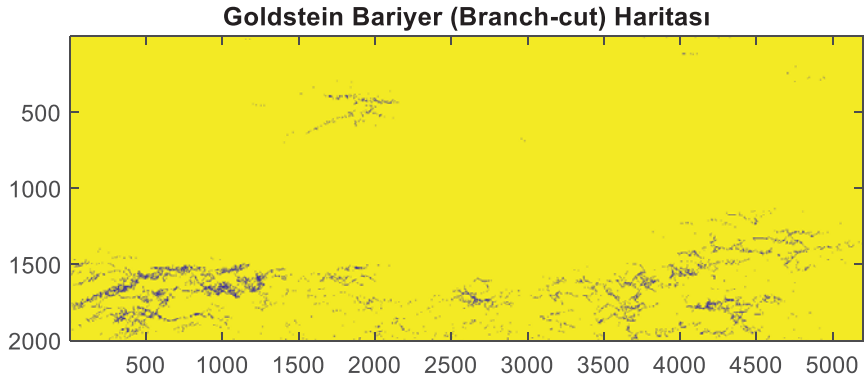


Şekil 5-49: Goldstein Branch Cut Yöntemi ile Üretilen SYM (Matlab)

Goldstein Branch-cut algoritmasının Matlab benzetiminden sonra C/C++ kodlaması da yapılarak algoritma hızlandırılmıştır. Algoritmalara ait süre analizleri katlı faz açma bölümünün sonunda paylaşılmıştır. Şekil 5-50'da kalıntı haritası Şekil 5-51'de ise kalıntılar kullanılarak belirlenen bariyer haritası verilmiştir.

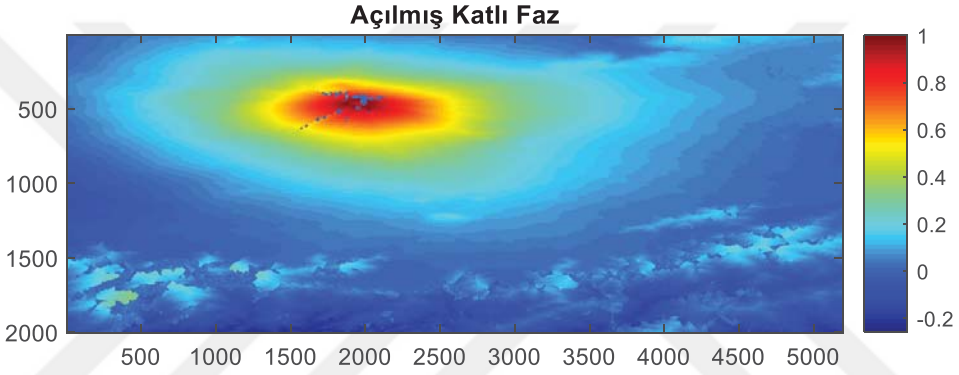


Şekil 5-50: Goldstein Kalıntı Haritası (C/C++)

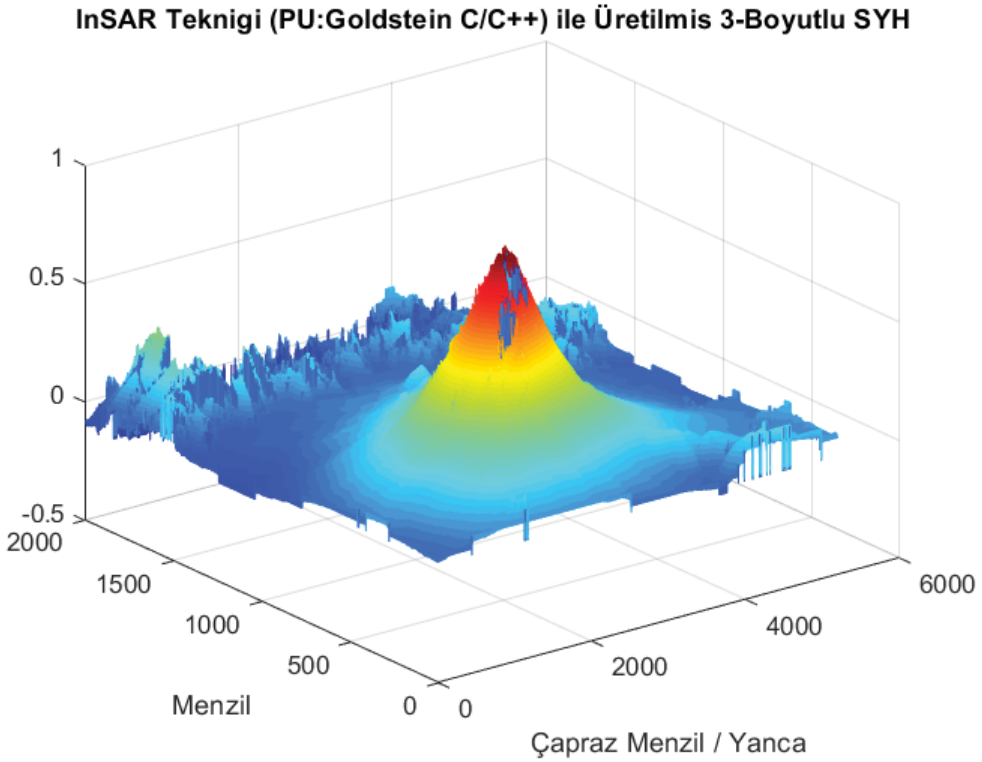


Şekil 5-51: Goldstein Oluşturulan Bariyer (Branch-cut) Haritası (C/C++)

Şekil 5-52 ve Şekil 5-53'te ise Goldstein katlı faz açma algoritmasının sonuçları paylaşılmıştır.



Şekil 5-52: Goldstein Açılmış Katlı Faz (C/C++)

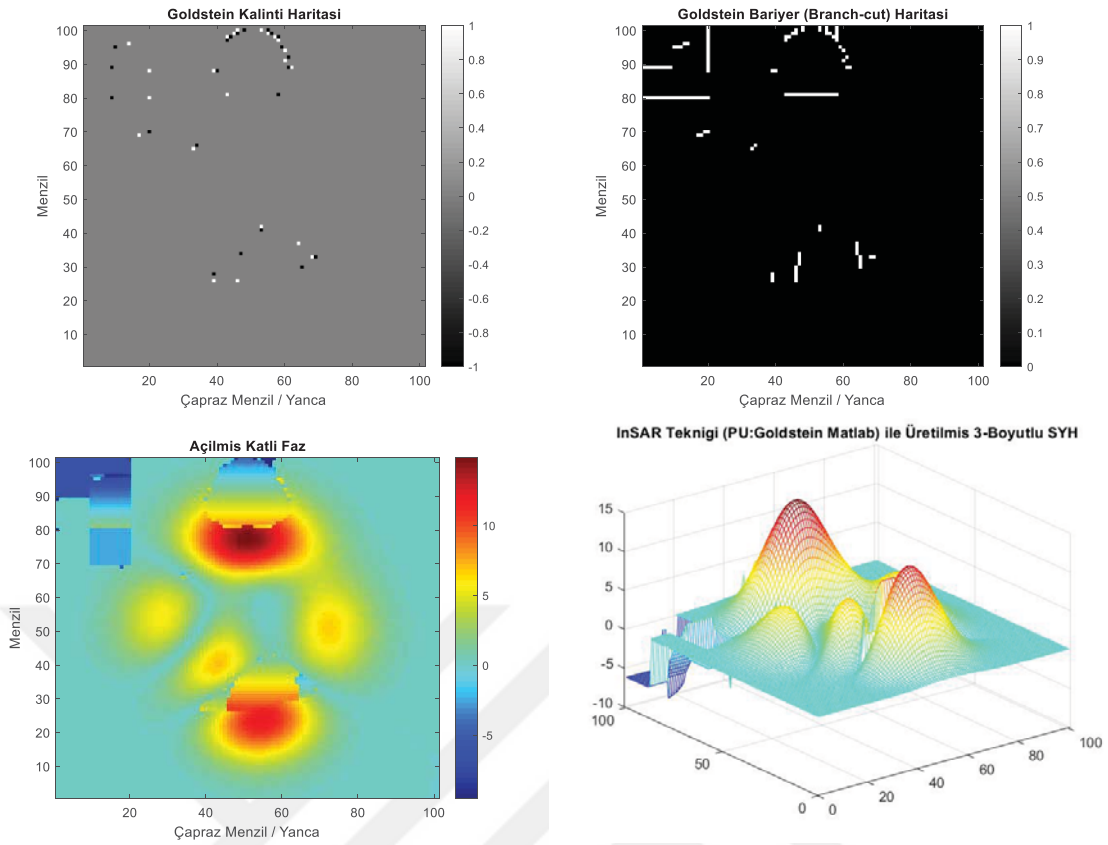


Şekil 5-53: Goldstein Branch Cut Yöntemi ile Üretilen SYM (C/C++)

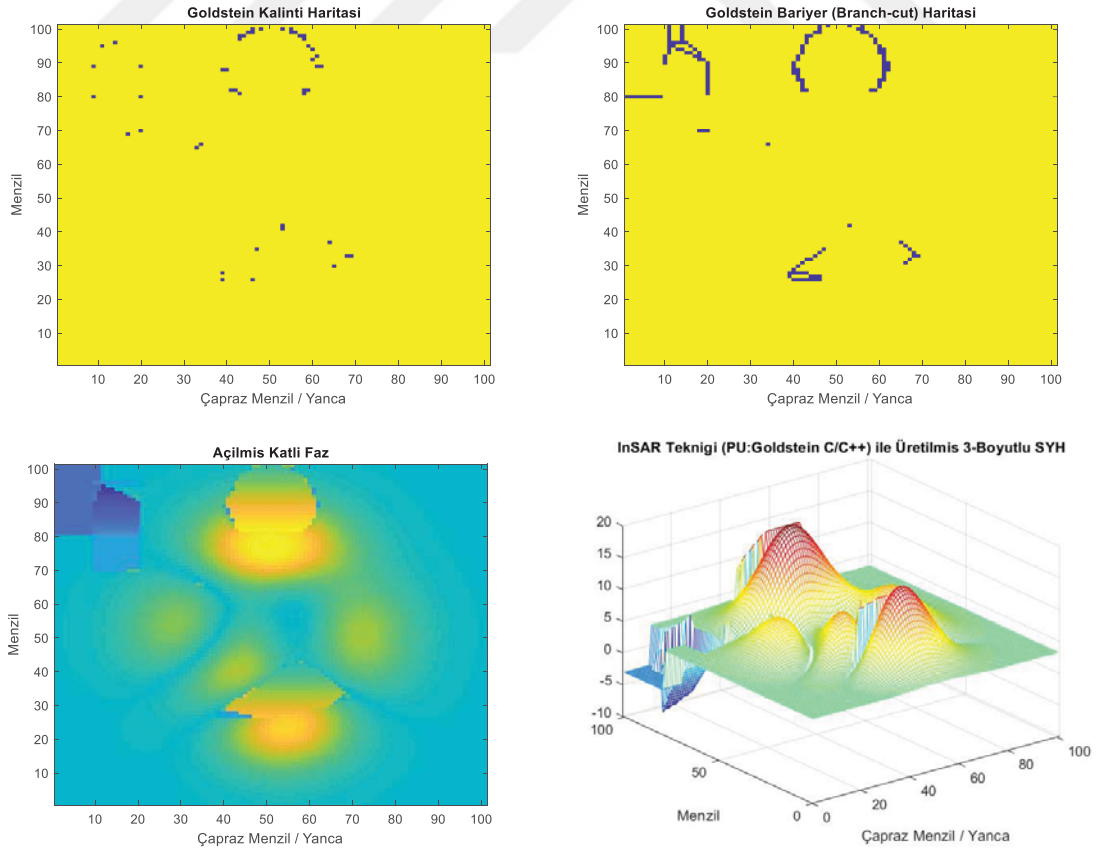
İkinci örnek olarak Sentetik olarak oluşturulan Şekil 5-41'deki sanal bölgenin katlı fazı açılarak Sayısal Yükseklik Modeli üretilmiştir. Sanal bölgeye ait Şekil 5-28'deki düzleştirilmiş interferogram Goldstein algoritmasına girdi olarak verilmiştir.

Goldstein algoritması beklendiği üzere;

- İlk olarak düzleştirilmiş interferogramdaki kalıntıları hesaplayarak kalıntı haritasını oluşturmuştur.
- Kalıntı haritası üzerinde bir pencere gezdirerek farklı değerdeki kalıntıları birbirine bağlayıp nötrlemeye ve bariyerleri (Branch-cut) oluşturmaya çalışır. Bu işlemi yaparken kalıntıları birleştirebilmek için pencere boyutunu büyütebilir. Eşleştiremediği kalıntıları görüntü kenarına birleştirebilir. Bu işleme topraklama (grounding) denir. Goldstein algoritması bariyerleri oluştururken dikkat ettiği iki nokta bulunmaktadır. Bunlardan ilki en kısa bariyerler yapmak, ikincisi de en kısa bariyerleri yapabilmek için en yakındaki farklı değerdeki kalıntıları birleştirerek nötrlemek. Ancak Şekil 2-47'deki örnekte de gösterildiği gibi en yakın kalıntıları birleştirerek nötrlemek her zaman doğru bariyerleri oluşturmak anlamına gelmemektedir. Hatta çoğunlukla hatalı sonuçlar doğurmaktadır. Şekil 5-54 ve Şekil 5-55'teki Goldstein bariyer haritalarında da benzer hatalar yapılmış ve kalıntılar olması gerektiği gibi birleştirilmemiştir. Bu hatalı bariyerler bir sonraki adım olan katlı fazın açılması adımında fazın hatalı açılmasına sebep olacaktır.
- Bariyerler oluşturulduktan sonra kullanıcın seçtiği bir başlangıç noktası referans alınıp başlangıç noktası seçilerek faz bariyerlerden geçmeyecek şekilde açılır.
- Açılan katlı fazda hatalı bariyerlerden kaynaklı olarak olmaması gereken ani yükselişler ve düşüşler görülmektedir.
- Açılan katlı fazda gölgede kalan alanların da hatalı olduğu görülmüştür. Bunun sebebi, gölgede kalan alanlardan doğru faz bilgisi alınamamış ve görüntüler arası faz farkı da doğru hesaplanamamıştır.
- Bu tip hatalı bariyer oluşumları ve gölge etkisi sonucunda hatalı katlı faz açma işlemi yapılmış ve yükseklik bilgisi yanlış hesaplanmış bölgeleri olan Sayısal Yükseklik Modeli oluşturulmuştur.
- Bu tip hataları engellemek ve doğru bariyerler oluşturmak için ek bilgiye ihtiyaç duyulmuştur. Hatalı bölgeleri düzeltmek ve daha yüksek doğrulukta SYM oluşturabilmek için *5.4. SAR İnterferometri ve Radargrametri Füzyonu* bölümünde bazı algoritmalar geliştirilmiştir.



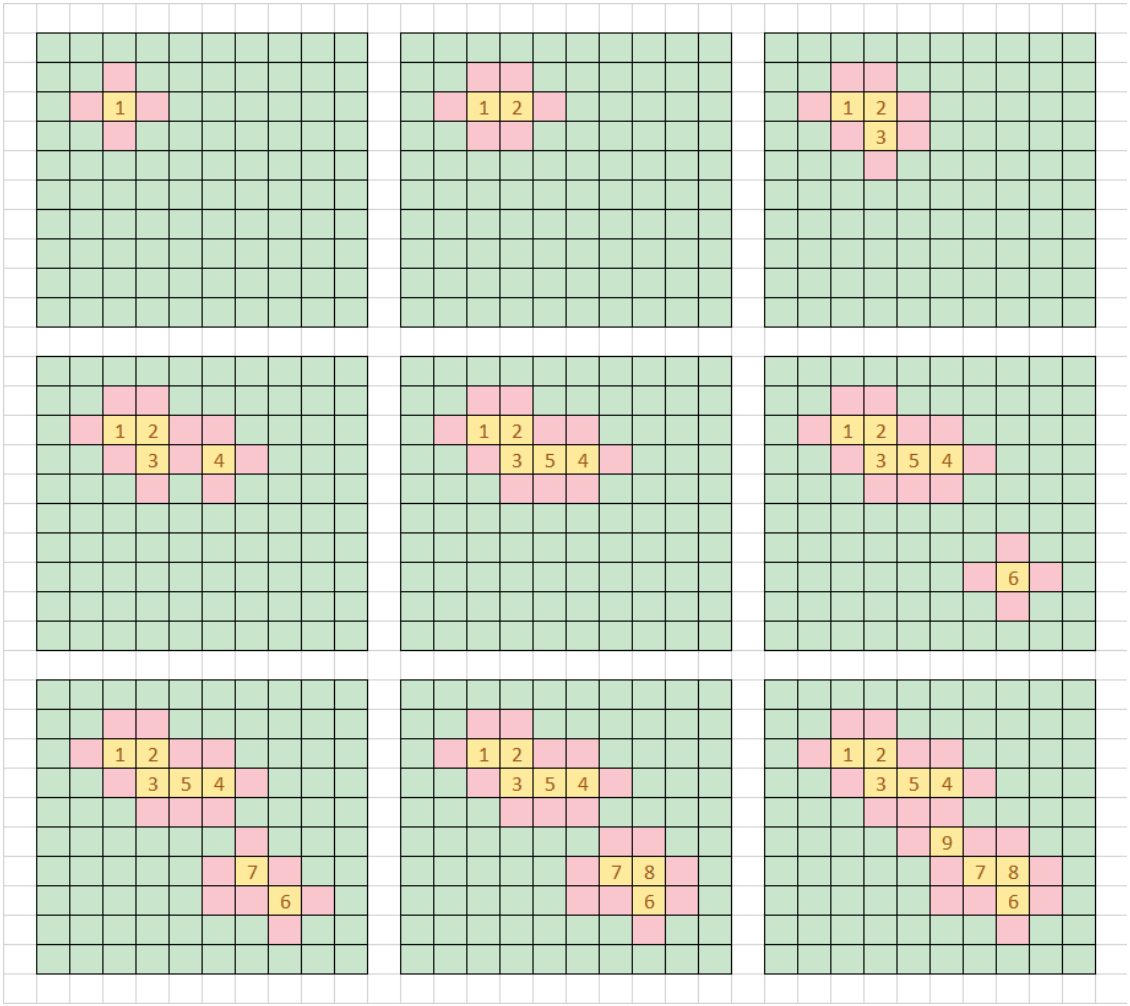
Şekil 5-54: Goldstein Branch Cut Algoritması Çıktıları (Matlab)



Şekil 5-55: Goldstein Branch Cut Algoritması Çıktıları (C/C++)

5.2.7.2.1.1.2. Kalite Rehberi Algoritması

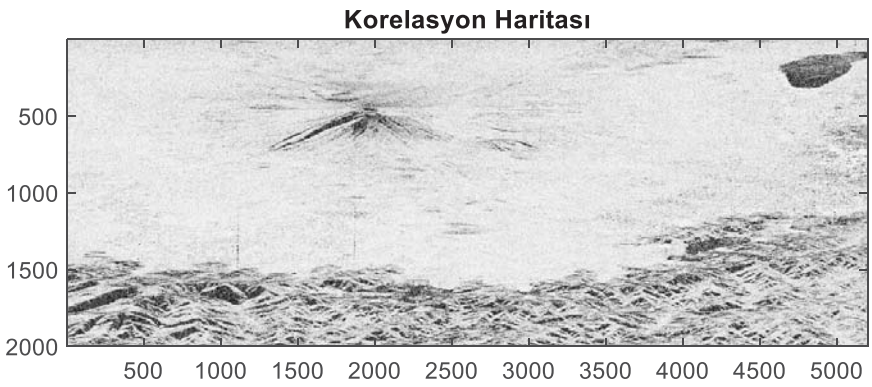
Kalite Rehberi algoritması katlı fazı açabilmek için bir kalite metriğine sahip rehber haritaya ihtiyaç duymaktadır. Rehber haritadaki pikseller ilgili kalite metriğine göre sıralanıp daha sonra da bu sıraya göre faz açılmaktadır. Fazı açarken izlenecek yolu doğrudan rehber harita belirlemektedir. Kalite Rehberi yönteminde, Goldstein yönteminin aksine katlı fazı açarken izlenecek yol üzerinde bir kısıt ya da bariyer bulunmamaktadır. Algoritmanın Matlab benzetimi oldukça yavaş çalışmaktadır. Ancak C/C++ versiyonu hızlı SYM üretebilmektedir.



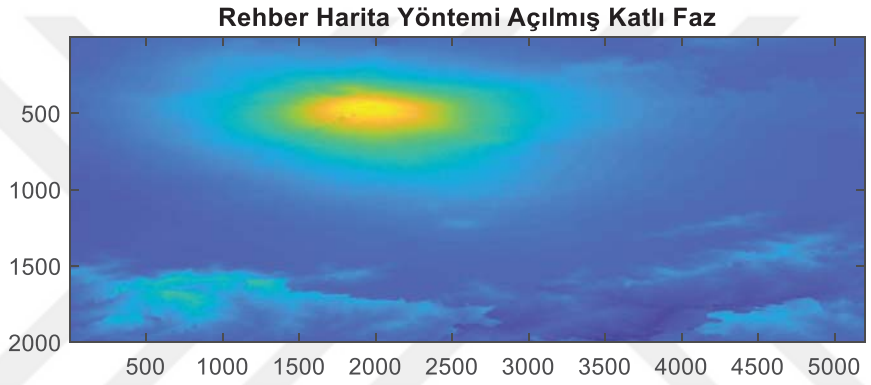
Şekil 5-56: Kalite Rehberi Yönteminde Katlı Faz Açılmasında İzlenen Yol

Kalite Rehberi yönteminde izlenecek yolu kullanılan rehber haritanın kalite metriği belirler. Örneğin kullanılan harita korelasyon haritası ise ilk olarak Şekil 5-56'daki gibi faz uyum değeri en yüksek ve ona komşu 4 pikselin katlı fazı açılır. Sonra en yüksek ikinci faz uyum değerine sahip piksele geçilir ve tüm piksellerin fazı açılana kadar işleme devam edilir. Dikkat edilmesi gerekli nokta katlı fazı açılan bir pikselin tekrar faz açma işlemine girmemesidir.

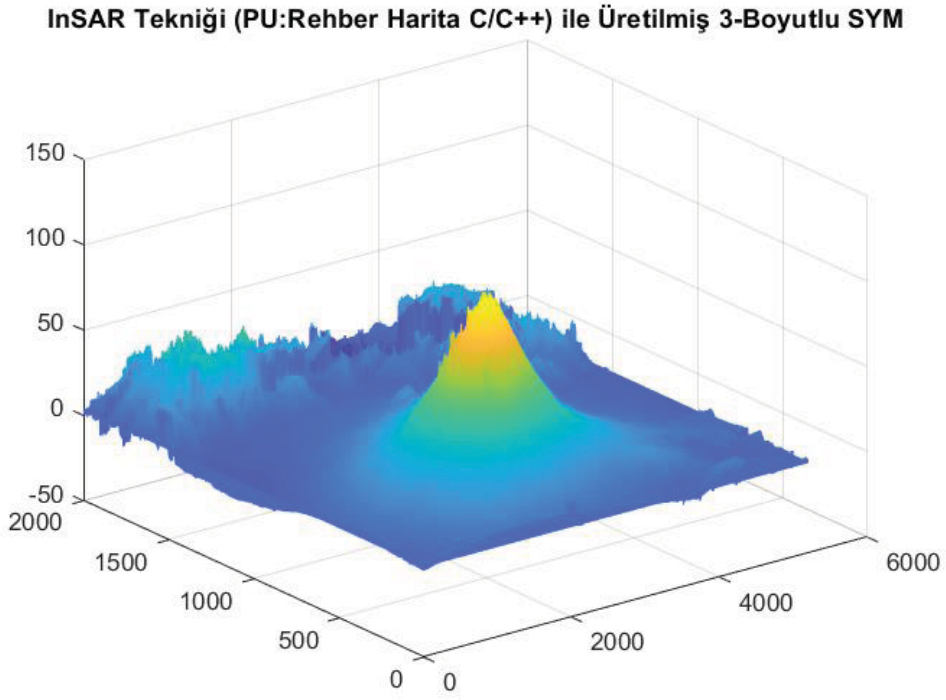
Şekil 5-57'deki korelasyon haritası kullanılarak Şekil 5-58'de katlı faz açılmış ve Şekil 5-59'daki SYM üretilmiştir.



Şekil 5-57: Korelasyon Haritası (ERS – İtalya/Etna)

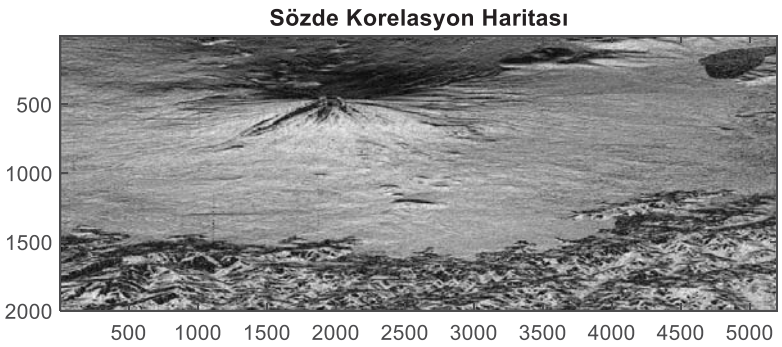


Şekil 5-58: Kalite Rehberi (Korelasyon Haritası) Yöntemi ile Açılmış Faz (C/C++)

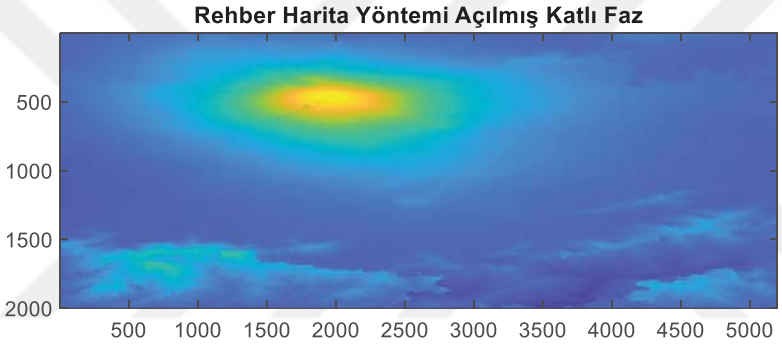


Şekil 5-59: Kalite Rehberi (Korelasyon Haritası) Yöntemi ile Üretilen SYM (C/C++)

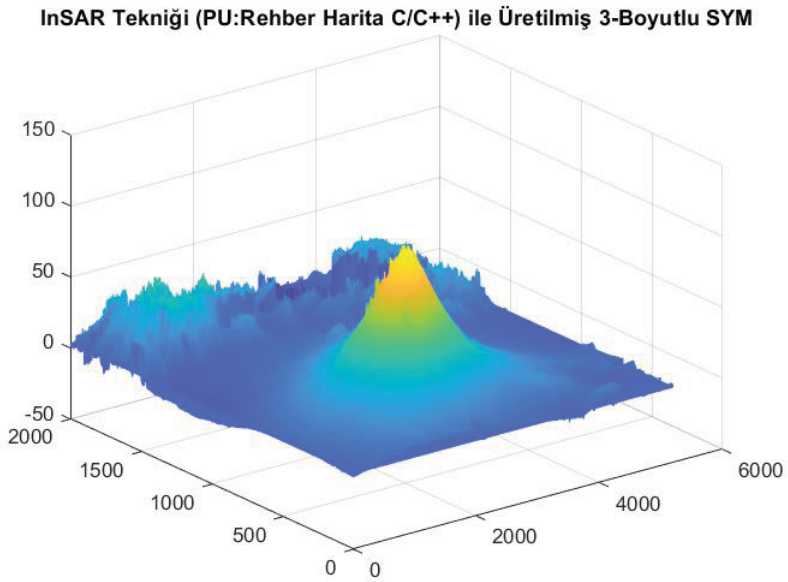
Rehber harita olarak korelasyon haritası yerine genlik bilgisini içermeyen sadece SAR görüntülerinin faz bilgisini kullanan sözde korelasyon haritası da kullanılabilir. Şekil 5-60'daki sözde korelasyon haritası kullanılarak Şekil 5-61'de katlı faz açılmış ve Şekil 5-62'deki SYM üretilmiştir.



Şekil 5-60: Sözde Korelasyon Haritası (ERS – İtalya/Etna)

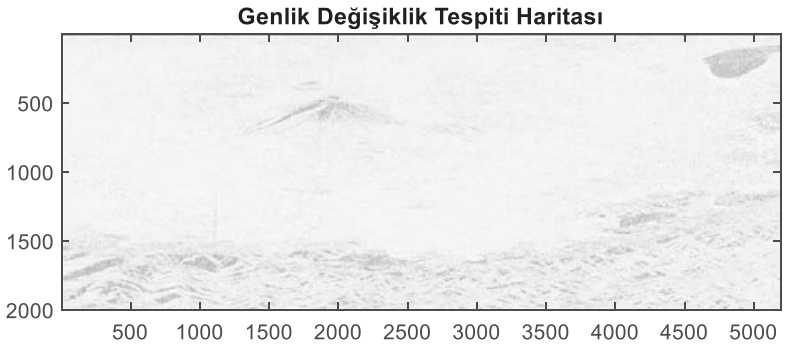


Şekil 5-61: Kalite Rehberi (Sözde Korelasyon Haritası) Yöntemi ile Açılmış Faz (C/C++)

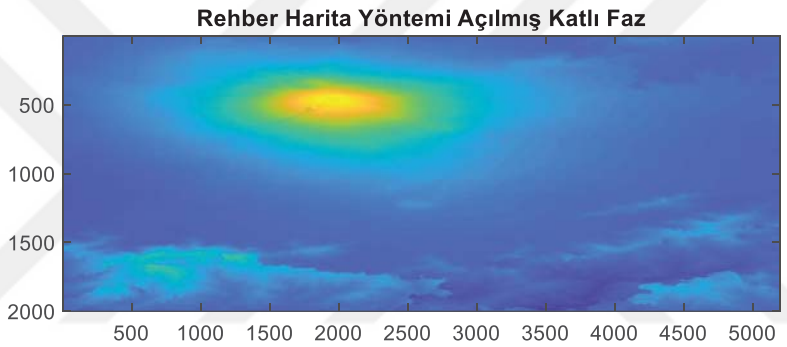


Şekil 5-62: Kalite Rehberi (Sözde Korelasyon Haritası) Yöntemi ile Üretilen SYM (C/C++)

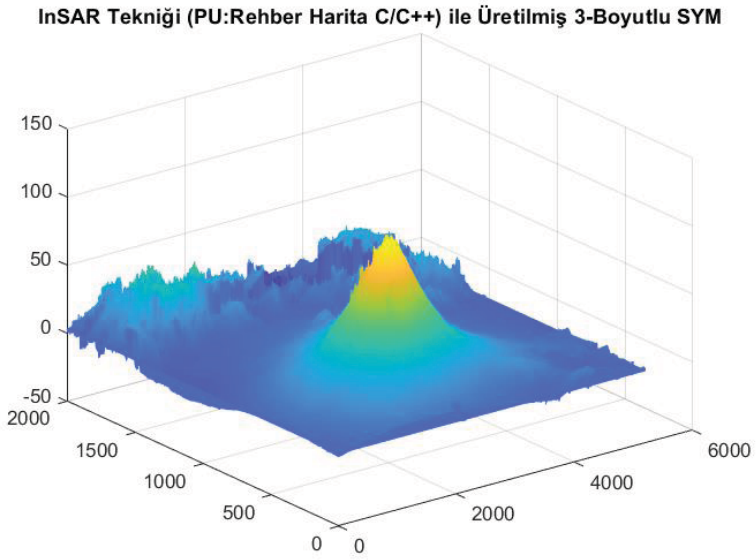
Rehber harita olarak korelasyon ve sözde korelasyon haritaları yerine sadece genlik bilgisini içeren ve SAR görüntülerinin faz bilgisini kullanmayan genlik değişiklik tespiti haritası da kullanılabilir. Şekil 5-63'teki genlik değişiklik tespiti haritası kullanılarak Şekil 5-64'te katlı faz açılmış ve Şekil 5-65'teki SYM üretilmiştir.



Şekil 5-63: Genlik Değişiklik Tespiti Haritası (ERS – İtalya/Etna)

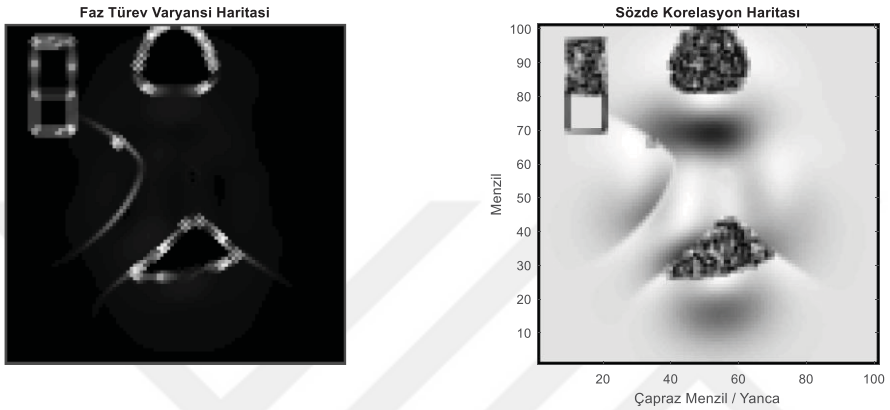


Şekil 5-64: Kalite Rehberi (Genlik Değişiklik Tespiti Haritası) Yöntemi ile Açılmış Faz (C/C++)

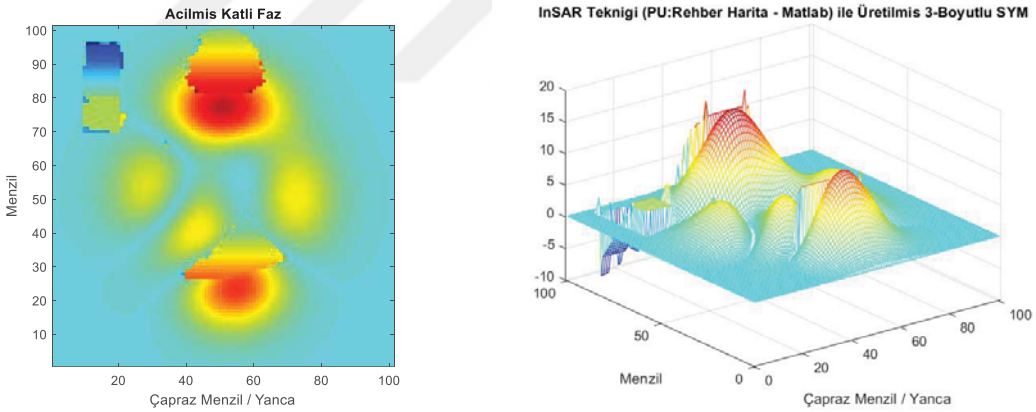


Şekil 5-65: Kalite Rehberi (Genlik Değişiklik Tespiti Haritası) Yöntemi ile Üretilen SYM (C/C++)

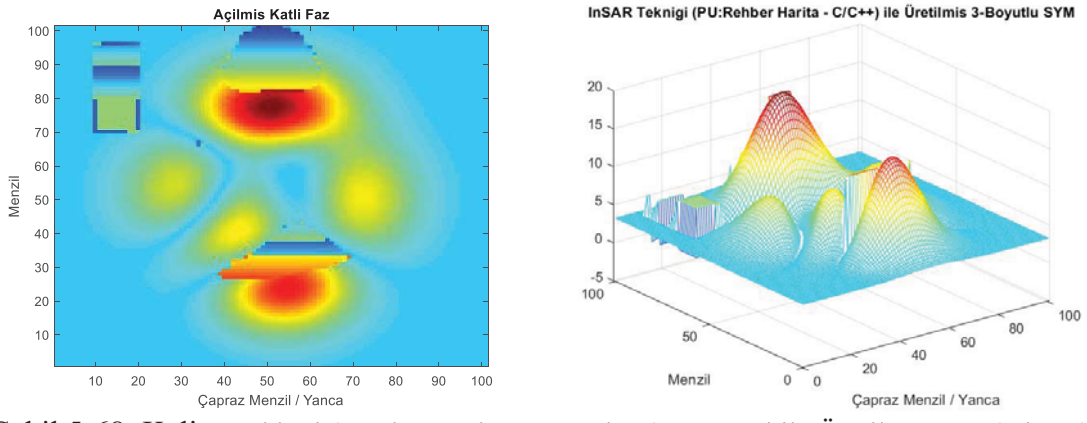
Sentetik olarak oluşturulan bölgeye ait Şekil 5-28'deki düzleştirilmiş interferogram ve Şekil 5-66'daki Faz Türev Varyansı ve Sözde Korelasyon Haritaları, Kalite Rehberi algoritmasına girdi olarak verilmiştir. Algoritma, katlı fazı açmış ve SYM'leri oluşturmuştur. Üretilen SYM'lerde belli hatalar olsa dahi korelasyon ve genlik değişiklik tespiti gibi genlik bilgisini kullanan haritalara göre daha yüksek doğruluktadır. Çünkü Şekil 5-66'te seçilen rehber haritalar, sadece faz bilgisini kullanarak üretilmiş haritalardır ve sentetik olarak üretilen verilerin sadece faz bilgileri bulunmaktadır.



Şekil 5-66: Sentetik Üretilen Faz Türev Varyansı ve Sözde Korelasyon Haritaları



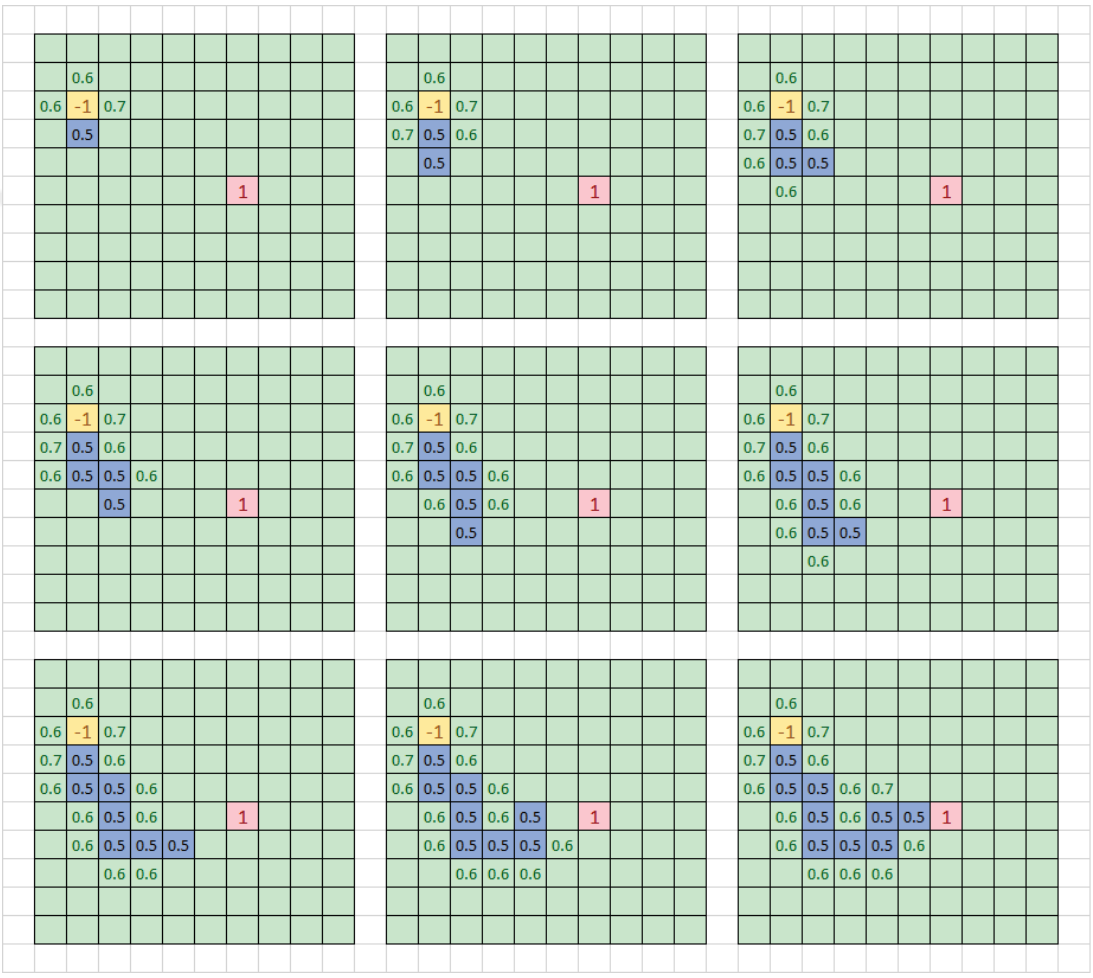
Şekil 5-67: Kalite Rehberi (Faz Türev Varyansı Haritası) Yöntemi ile Üretilen SYM (Matlab)



Şekil 5-68: Kalite Rehberi (Sözde Korelasyon Haritası) Yöntemi ile Üretilen SYM (C/C++)

5.2.7.2.1.1.3. Mask Cut Algoritması

Mask-cut algoritması; Goldstein Branch Cut ve Kalite Rehberi katlı faz açma algoritmalarının hibrit bir versiyonu olarak düşünülebilir. Mask-cut algoritmasında kalıntılar hesaplanıp bariyerler (Mask-cut) oluşturulurken kullanılan rehber haritanın kalite metriğinden yararlanılmaktadır. Böylelikle bariyerler Goldstein'deki gibi kalıntılar en yakın yoldan birleştirerek değil, kalite metriği en düşük yoldan ilerlenerek Şekil 5-69'daki gibi oluşturulmaktadır.



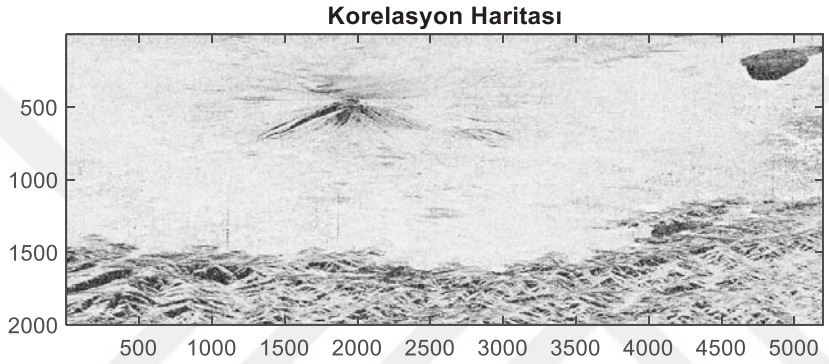
Şekil 5-69: Mask-cut Algoritmasında Bariyerlerin (Mask-cut'ların) Oluşturulması

Mask-cut algoritmasında kullanılan rehber haritaya bağımlı olunmaktadır. Bu yüzden eğer rehber haritanın ortalama değeri düşük ise kullanıldığında hatalı bariyerler oluşturulacak ve katlı faz hatalı açılacaktır.

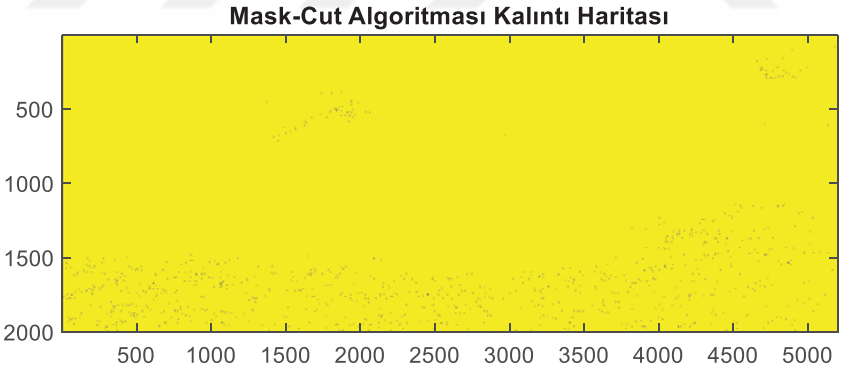
Goldstein algoritmasından bir diğer farkı da oluşturulan bariyerlerin katlı faz açma işlemi öncesi inceleştirilmesidir. Morfolojik işlemler yapılarak inceltme yapılır. Böylelikle bariyer olan piksel sayısı azaltılmış olur. Goldstein algoritmasından son farkı da katlı fazı açmaya başladığı piksel ve izlediği yoldur. Mask-cut algoritması, Goldstein yönteminde

olduğu gibi kullanıcı tarafından seçilen bir pikselden başlayıp rastgele bir yol izlemez. Bunun yerine Kalite Rehberi yöntemindeki gibi kullandığı haritanın metriğine göre en yüksek kalitedeki pikselden başlayıp aşağıya doğru ilerler. Bu işlemi yaparken bariyere denk gelen pikselleri pas geçer ve onları en sona bırakır. Son olarak onların da fazını açarak katlı faz açma işlemini tamamlar. Böylelikle hem Goldstein hem de Kalite Rehberi algoritmasını birlikte kullanan hibrit bir algoritma çalıştırılmış olur.

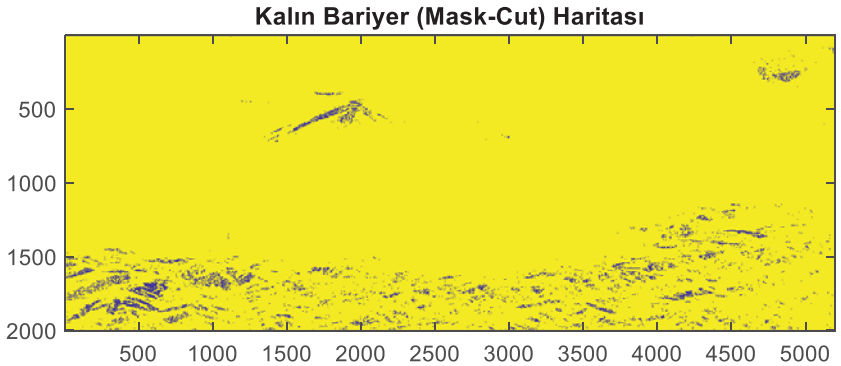
Şekil 5-70'teki korelasyon haritası kullanılarak Şekil 5-71'de kalıntı haritası oluşturulmuştur. Kalıntı haritasından Şekil 5-72 ve Şekil 5-73'teki kalın ve ince bariyer haritaları üretilmiştir. Şekil 5-74'te katlı faz açılmış ve Şekil 5-75'teki SYM üretilmiştir.



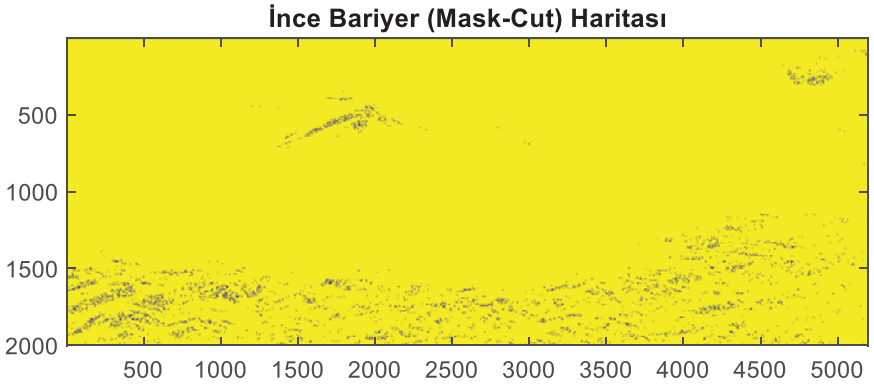
Şekil 5-70: Korelasyon Haritası (ERS – İtalya/Etna)



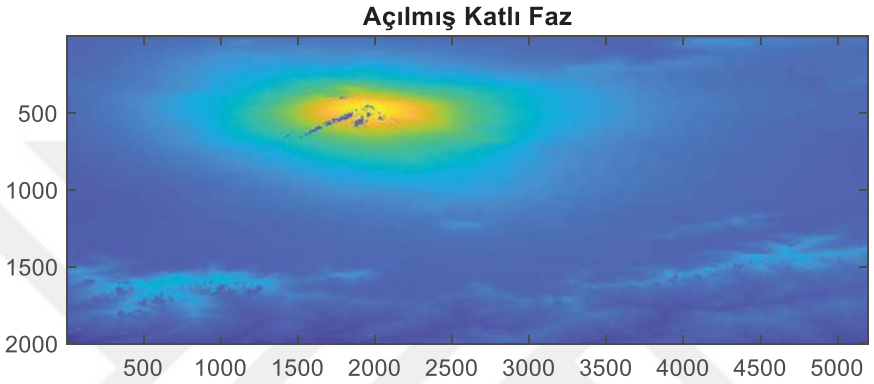
Şekil 5-71: Mask-cut Kalıntı Haritası (C/C++)



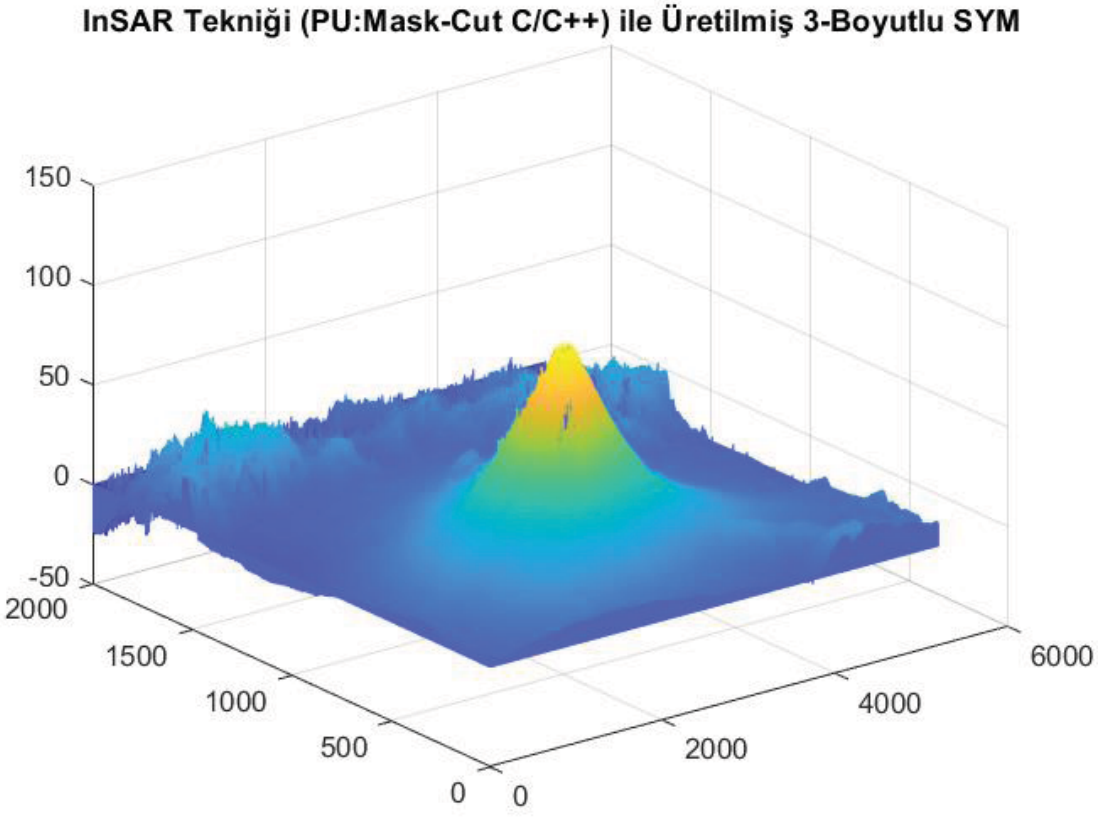
Şekil 5-72: Oluşturulan Kalın Bariyer (Mask-cut) Haritası (C/C++)



Şekil 5-73: Oluşturulan İnce Bariyer (Mask-cut) Haritası (C/C++)

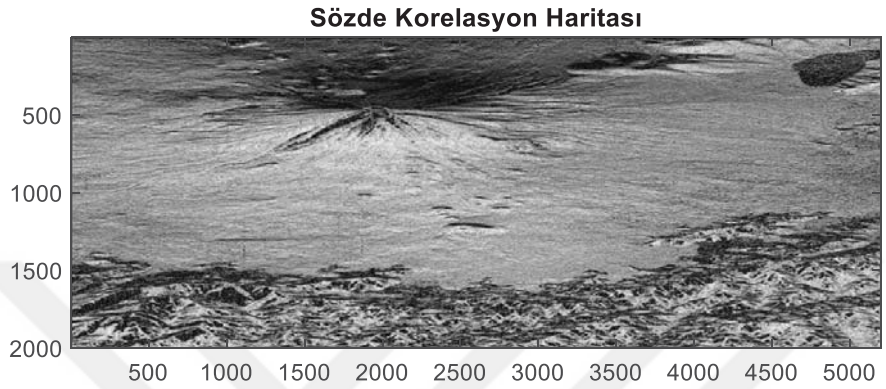


Şekil 5-74: Mask-cut Algoritması Açılmış Katlı Faz (C/C++)

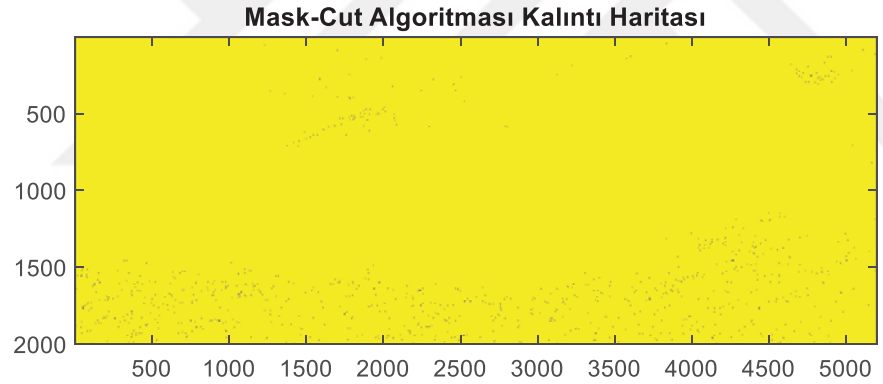


Şekil 5-75: Mask Cut Yöntemi ile Üretilen SYM (C/C++)

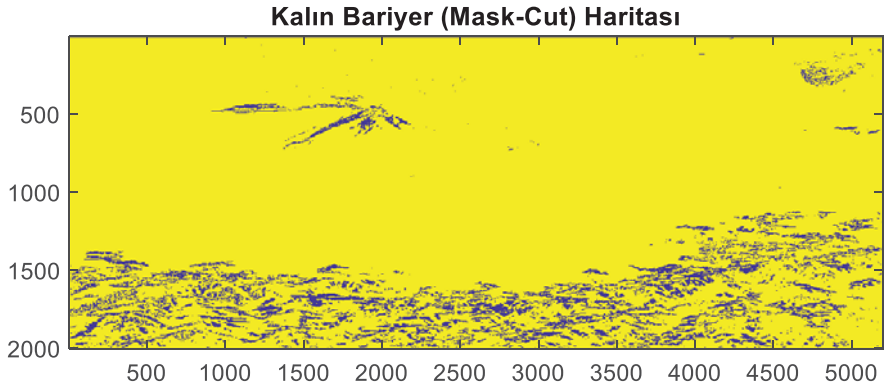
Rehber harita olarak korelasyon haritası yerine sözde korelasyon haritası da kullanılabilir. Şekil 5-76'daki sözde korelasyon haritası kullanılarak Şekil 5-77'de kalıntı haritası oluşturulmuştur. Kalıntı haritasından Şekil 5-78 ve Şekil 5-79'daki kalın ve ince bariyer haritaları üretilmiştir. Şekil 5-80'de katlı faz açılmış ve Şekil 5-81'deki SYM üretilmiştir. Sözde korelasyon haritası kullanılarak üretilen SYM, korelasyon haritası kullanılarak üretilenden farklıdır ve daha fazla kırılma/kesik ürettiği görülmüştür.



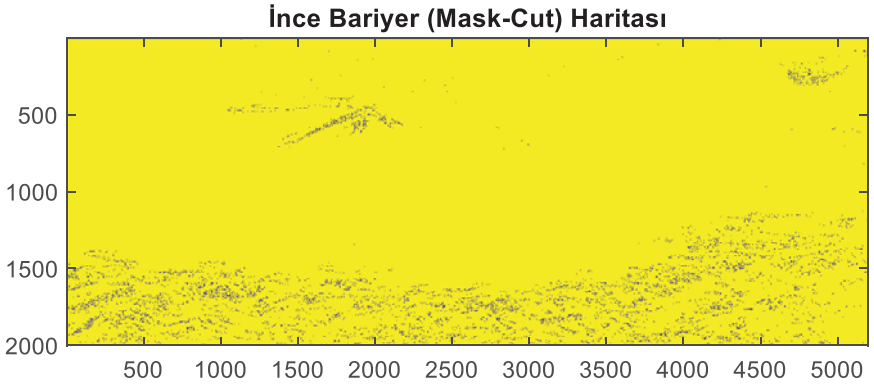
Şekil 5-76: Sözde Korelasyon Haritası (ERS – İtalya/Etna)



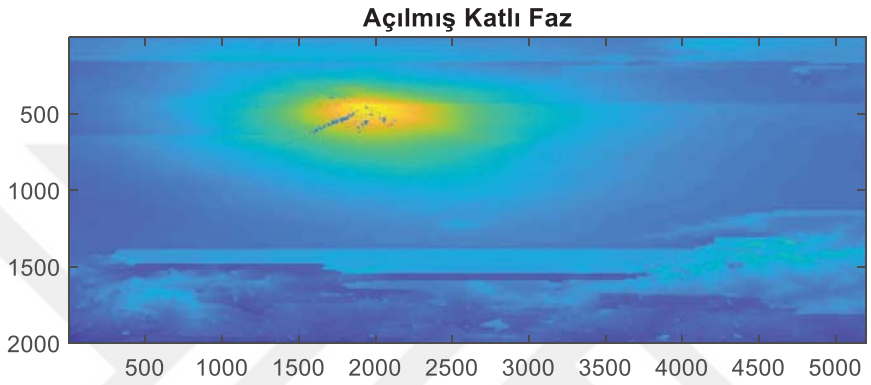
Şekil 5-77: Mask-cut Kalıntı Haritası (C/C++)



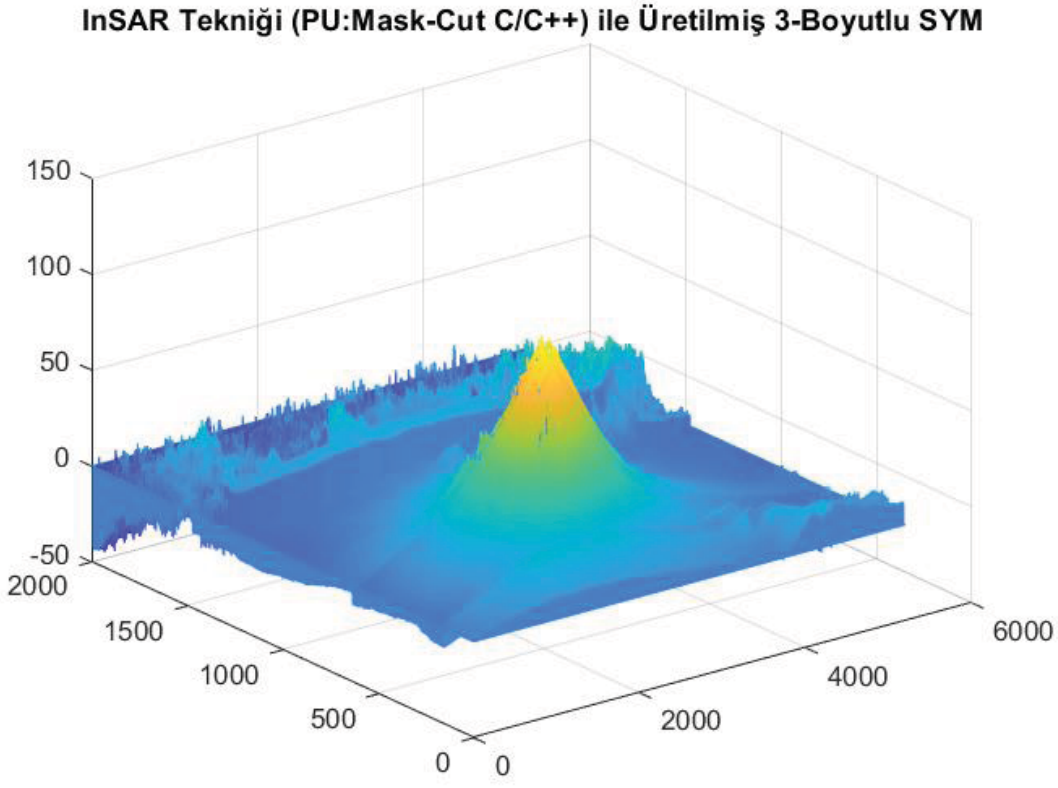
Şekil 5-78: Oluşturulan Kalın Bariyer (Mask-cut) Haritası (C/C++)



Şekil 5-79: Oluşturulan İnce Bariyer (Mask-cut) Haritası (C/C++)

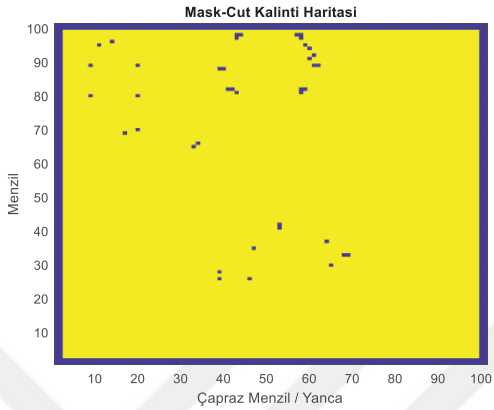


Şekil 5-80: Mask-cut Algoritması Açılmış Katlı Faz (C/C++)

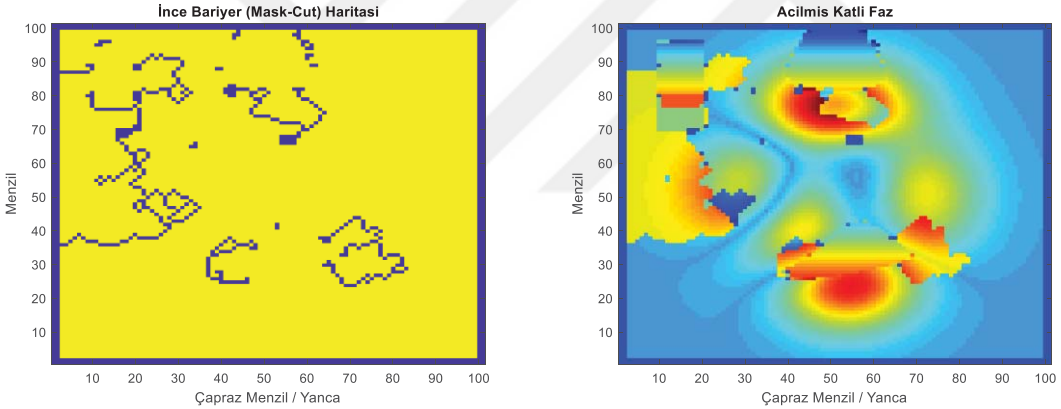


Şekil 5-81: Mask Cut Yöntemi ile Üretilen SYM (C/C++)

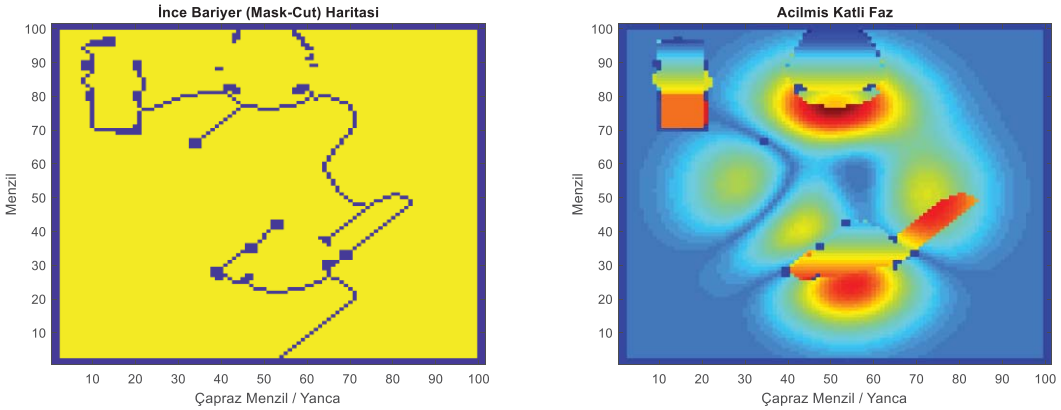
Sentetik olarak oluşturulan bölgeye ait Şekil 5-28'deki düzleştirilmiş interferogram ve oluşturulan tüm haritalar Mask-cut katlı faz açma algoritmasına girdi olarak verilmiştir. Kalıntılar aynı olmasına rağmen haritalardaki kalite metrikleri farklı olduğu için üretilen bariyerlerin çok farklı oluşturulduğu görülmektedir. Bu sebeple beklendiği üzere açılan faz ve üretilen SYM'de farklılık göstermektedir.



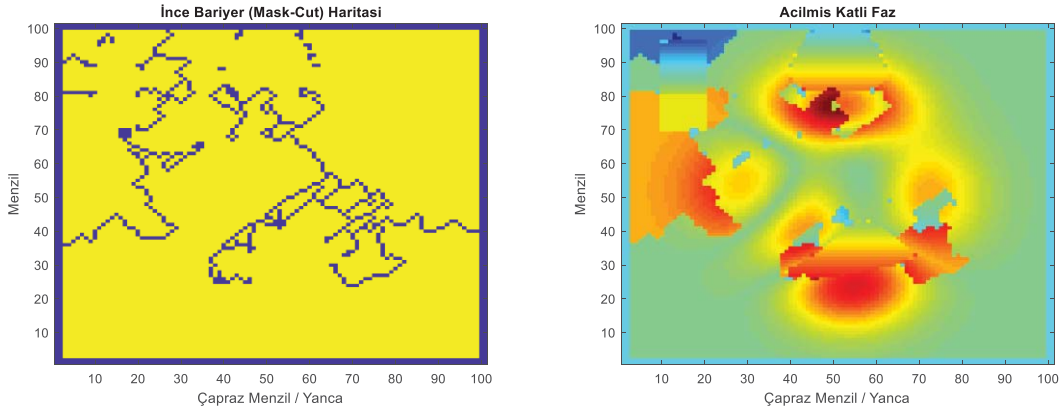
Şekil 5-82: Mask-cut Kalıntı Haritası



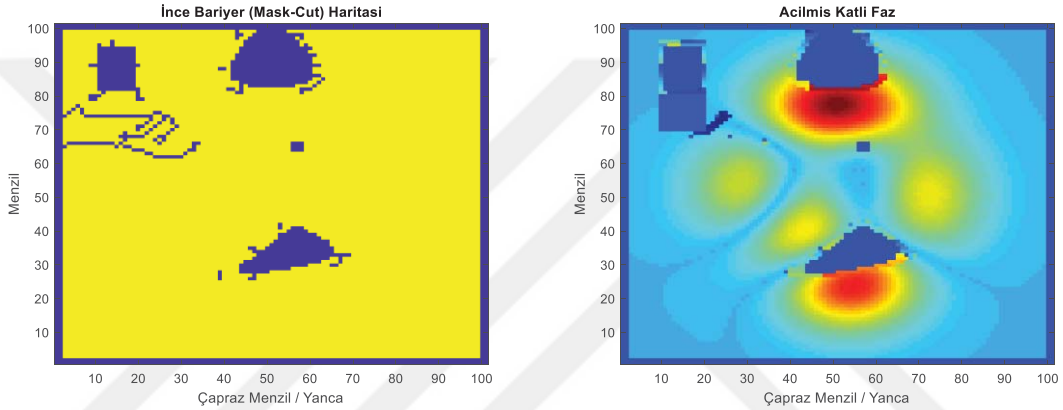
Şekil 5-83: Korelasyon Haritasıyla Üretilen Bariyer Haritası ve Açılmış Katlı Faz



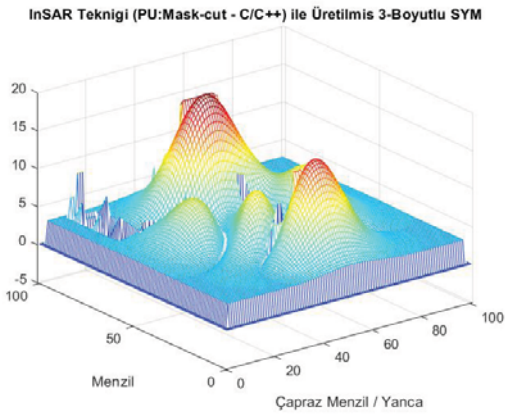
Şekil 5-84: Sözde Korelasyon Haritasıyla Üretilen Bariyer Haritası ve Açılmış Katlı Faz



Şekil 5-85: Genlik Değişiklik Tespiti Haritasıyla Üretilen Bariyer Haritası ve Açılmış Katlı Faz



Şekil 5-86: Faz Türev Varyansı Haritası ile Üretilen Bariyer Haritası ve Açılmış Katlı Faz

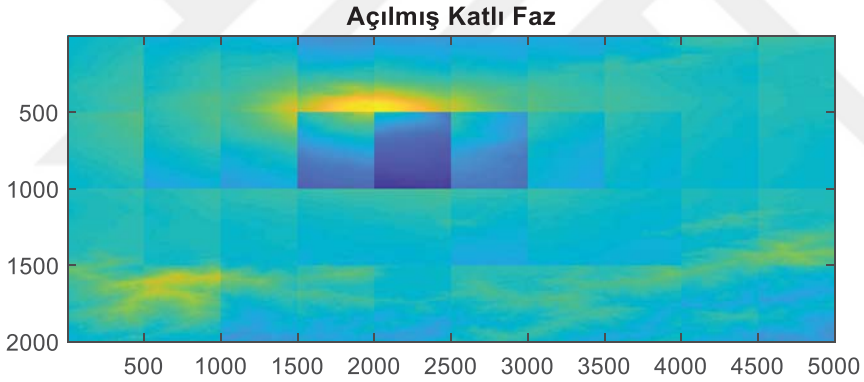


Şekil 5-87: Faz Türev Varyans Haritası kullanarak Mask Cut Yöntemiyle Üretilen SYM

Mask-cut katlı faz açma algoritmasında bariyerleri (Mask-cut) oluşturmak için rehber haritanın ne kadar etkin olduğu gözlemlenmektedir. Harita değiştikçe kalıntılar aynı olmasına rağmen oluşturulan bariyerler değişmekte ve üretilen SYM'ler fark etmektedir. Bu sebeple rehber harita seçimi oldukça önemlidir. Zira algoritmanın doğruluk performansı rehber haritaya tamamen bağımlıdır.

5.2.7.2.1.1.4. Flynn En Düşük Süreksizlik Yaklaşımı Algoritması

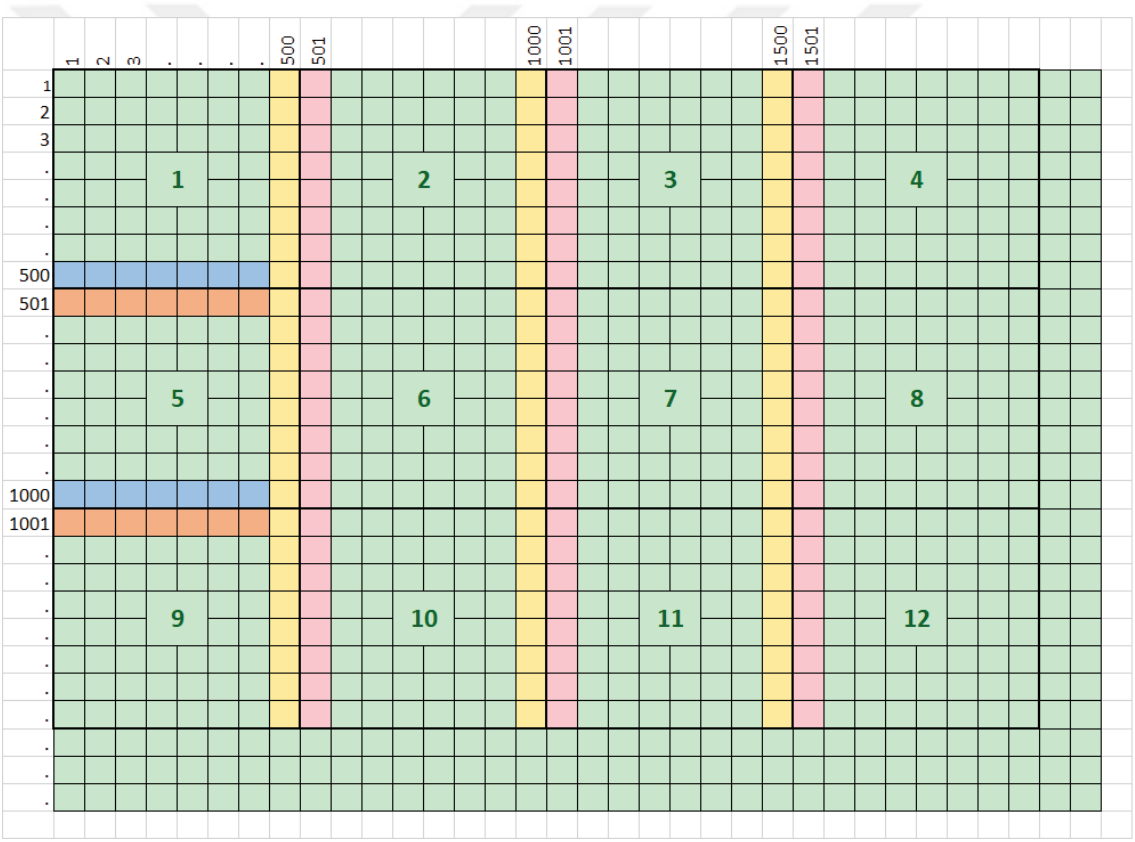
Flynn algoritması düzleştirilmiş interferogramı bir izohips haritası gibi düşünerek katlı fazı buradaki örgeler üzerinden açmayı hedefler. Ancak kalıntılar, gölgede kalan alanlar, topoğrafyadaki ani yükselmeler veya düşüşler ve gürültüden kaynaklı olarak örgeler üzerinde süreksizlikler bulunmaktadır. Bu sebeple örgelere bakarak katlı fazı açmak kolay olmayacaktır. Flynn algoritmasında süreksizlikler takip edilip bazı eklemeler yapılarak örgeler tamamlanmakta ve her tamamlamada katlı faz açılmaktadır. Algoritma çok büyük haritalarda ve çok karmaşık / gürültülü interferogramlarda sonuç üretememektedir. Flynn algoritması için yazılan C/C++ kodu girdi interferogramın boyutu büyüdükçe ve görüntü karmaşıklaştıkça herhangi bir sonuç üretemez hale gelmekte ve çalışmamaktadır. Bu sebeple tez kapsamında kullanılan ERS uydusuna ait İtalya'daki Etna yanardağını içeren görüntü çifti kullanılarak oluşturulan interferogram girdi olarak verilip Flynn algoritmasının çalışabildiği optimum interferogram boyutu belirlenmiştir.



Şekil 5-88: Flynn Algoritması ile Açılmış Katlı Faz Hatası

Girdi interferogram en fazla [500x500] boyutlarında olmalıdır. Bu sebeple Etna yanardağına ait interferogram parçalara ayrılıp algoritmaya o şekilde verilmiştir. Ancak bu seferde her bir pencerenin referansı farklı olduğu için açılan katlı faz sonucu üretilen SYM'ler her pencere için farklı yüksekliklerde olmaktadır ve katlı faz tüm pencereler için hatasız açılmış olsa bile genel görüntü Şekil 5-88'deki gibi hatalı olmaktadır. Bu durumu engellemek için pencerelerin komşu pencereler ile uyumlu hale getirilmesi gerekmektedir. Bu işlem için Şekil 5-89'daki görselde görüleceği üzere her bir [500x500]'lük pencere bir solundaki pencereyi referans alarak katlı faz açma işlemi sonrası kendisini güncellemektedir. Aynı satırdaki pencereler için soldaki pencerenin son sütununun (Şekil 5-89 sarı renk) ortalama açılmış faz değeri hesaplanır; sağdaki pencerenin ilk sütununun (Şekil 5-89 kırmızı renk) ortalama açılmış faz değeri hesaplanır

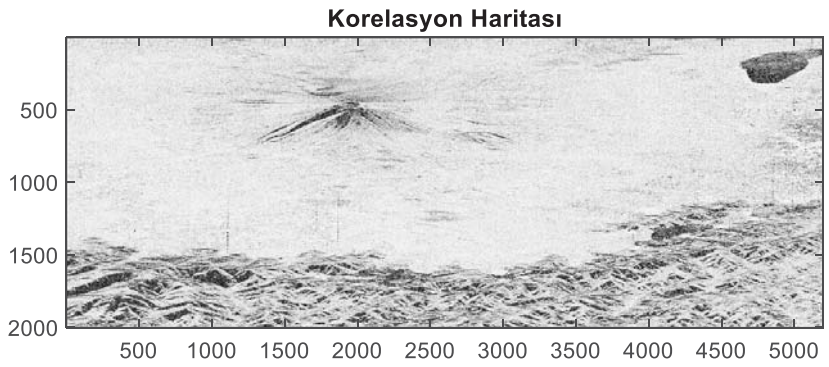
ve iki ortalama arasındaki fark kadar sağdaki pencerenin tüm piksellerine faz eklemesi yapılır. Böylelikle sağdaki pencerenin açılmış fazı soldakinin devamı gibi olur. Bu işlem her bir satırdaki ilk pencere için problem teşkil edecektir. İlk pencerelerde de aynı işlem bir üstteki pencere ile çözülür. Özetle aynı sütundaki pencerelerden üstte olanın son satırının (Şekil 5-89 mavi renk) ortalama açılmış faz değeri hesaplanır; alttaki pencerenin en üst satırının (Şekil 5-89 turuncu renk) ortalama açılmış faz değeri hesaplanır ve iki ortalama arasındaki fark kadar alttaki pencerenin tüm piksellerine faz eklemesi yapılır. Böylelikle alttaki pencerenin açılmış fazı üsttekinin devamı gibi olur. Bu işlem her satırdaki ilk pencere için uygulanacaktır. Böylelikle tüm pencereler komşu pencereleri ile yaklaşık uyumlu olacaklar ve pencereler arası fazda Şekil 5-88'deki gibi keskin geçişler gözlemlenmeyecektir.



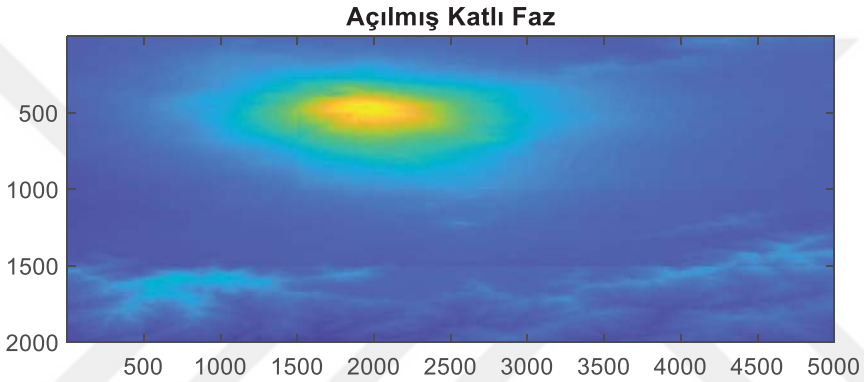
Şekil 5-89: Flynn Algoritma Çıktılarının Birleştirilmesi

Flynn algoritması opsiyonel olarak rehber harita kullanabilmektedir. Tıpkı diğer katlı faz açma algoritmalarında olduğu gibi üretilen tüm haritalar burada da kullanılabilmektedir. Eğer rehber harita kullanırsa her piksel için rehber haritadaki kalite metriği bir ağırlıklandırma katsayısı olarak Eşitlik 2.105'teki gibi eklenmektedir. Ancak harita kullanıldığı durumda da haritanın güvenirliliğine bağlı olarak performansı değişmektedir.

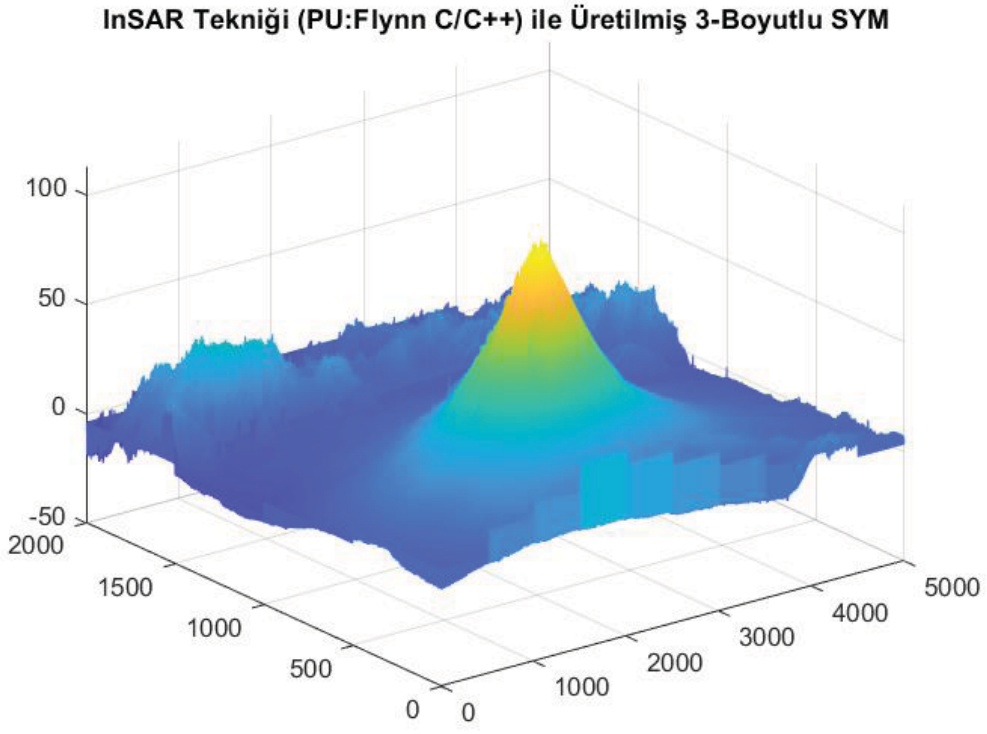
Şekil 5-90'daki korelasyon haritası kullanılarak Flynn algoritması ile katlı faz açılmış ve Şekil 5-91 elde edilmiştir. Sonuç olarak Şekil 5-92'deki SYM üretilmiştir.



Şekil 5-90: Korelasyon Haritası (ERS – İtalya/Etna)

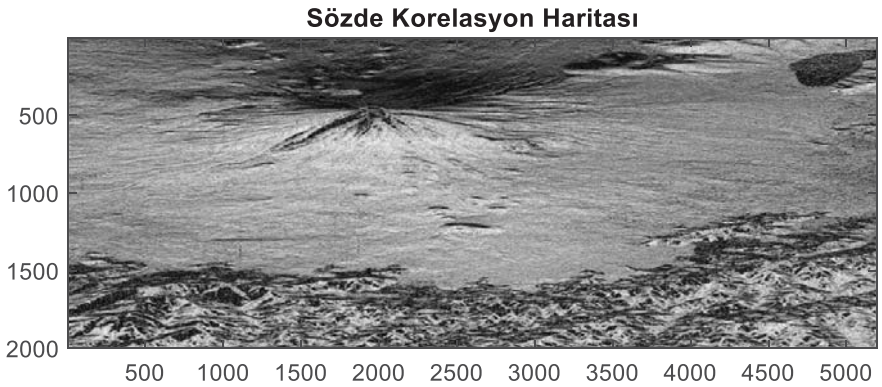


Şekil 5-91: Flynn Algoritması Açılmış Katlı Faz (C/C++)

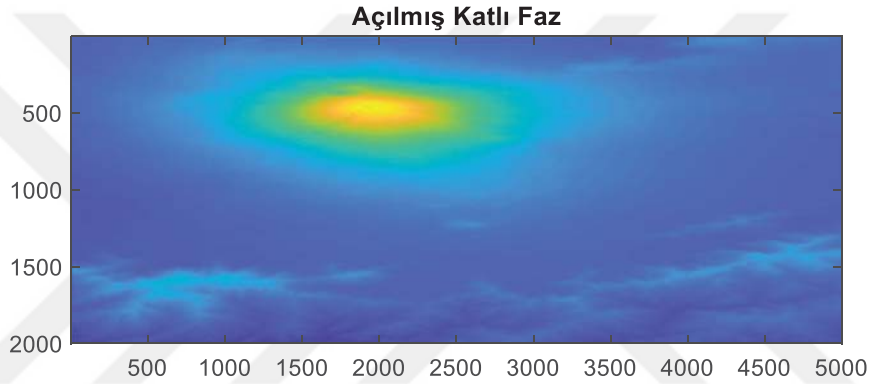


Şekil 5-92: Flynn Algoritması ile Üretilen SYM (C/C++)

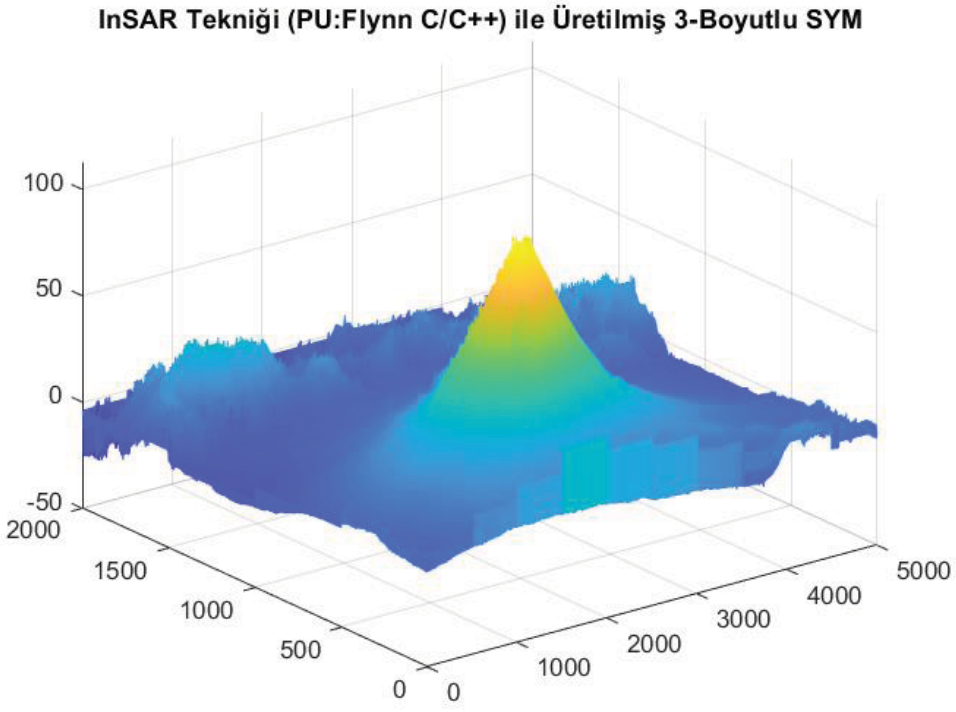
Şekil 5-93'teki sözde korelasyon haritası kullanılarak Flynn algoritması ile katlı faz açılmış ve Şekil 5-94 elde edilmiştir. Sonuç olarak Şekil 5-95'teki SYM üretilmiştir.



Şekil 5-93: Sözde Korelasyon Haritası (ERS – İtalya/Etna)



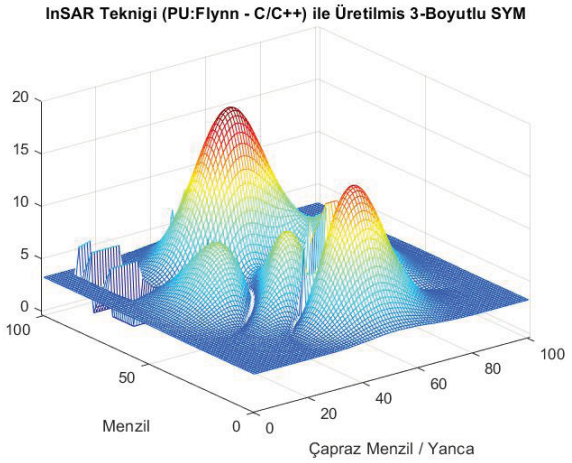
Şekil 5-94: Flynn Algoritması Açılmış Katlı Faz (C/C++)



Şekil 5-95: Flynn Algoritması ile Üretilen SYM (C/C++)

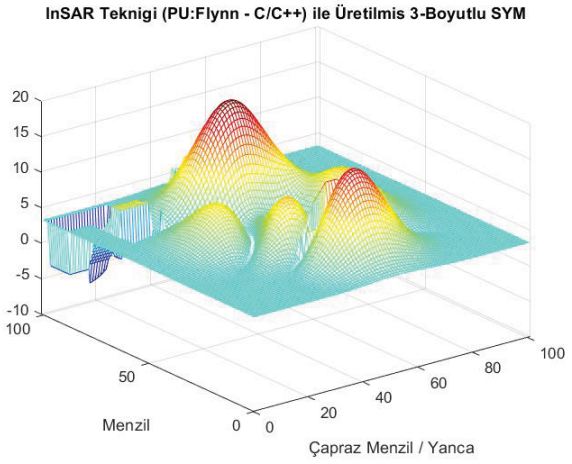
Korelasyon haritası kullanılarak oluşturulan SYM ve SYM'nin iki boyutlu görüntüsü olan açılmış katlı fazda pencereler arası geçişlerde farklılıklar göze çarpmaktadır. Ancak Şekil 5-94'teki sözde korelasyon haritasının açılmış katlı faz figüründe pencereler arası geçişler neredeyse hiç fark edilmemektedir. Flynn algoritmasında rehber harita olarak sözde korelasyon haritası tercih etmek daha doğru SYM üretmek anlamına gelmektedir.

Sentetik olarak oluşturulan bölgeye ait Şekil 5-28'deki düzleştirilmiş interferogram herhangi bir rehber harita olmadan Flynn katlı faz açma algoritmasına girdi olarak verilmiş ve Şekil 5-96'daki SYM elde edilmiştir.



Şekil 5-96: Rehber Harita Olmadan Flynn Algoritması ile Üretilen SYM

Sentetik olarak oluşturulan bölgeye ait Şekil 5-28'deki düzleştirilmiş interferogram herhangi bir rehber harita olmadan Flynn katlı faz açma algoritmasına girdi olarak verilmiş ve Şekil 5-97'deki SYM elde edilmiştir. Harita kullandığı durumda bazı hataların azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5-97: Korelasyon Haritası Kullanılarak Flynn Algoritması ile Üretilen SYM

5.2.7.3. Katlı Faz Açma Algoritmaları Süre Analizi

Benzetimi yapılan tüm katlı faz açma algoritmaları için süre ölçümleri yapılmıştır. Algoritmalar; 2.6 GHz temel frekansa sahip İntel Core İ7-9750H işlemcisi, 16GB RAM'i olan 6 çekirdekli bir dizüstü bilgisayarda çalıştırılmıştır. Çizelge 5-8'de girdi interferogramın boyutu büyük olduğu için Rehber Harita yönteminin Matlab benzetimi katlı fazı açmak için çok uzun süreye ihtiyaç duymuştur. Bu sebeple aynı görüntü kırpılarak küçültülmüş ve tüm algoritmalar bu kırpılan interferogram için tekrar çalıştırılarak Çizelge 5-9 oluşturulmuştur. Tablolardan görüleceği üzere algoritmaların Matlab benzetimleri beklendiği üzere daha yavaş çalışmaktadır. Tek boyutta katlı faz açmanın sırasıyla iki boyutta uygulandığı Itoh yöntemi ise işlemleri tek boyutta daha hızlı yapmaktadır. Kalıntıları belirleme veya bariyerler oluşturma gibi herhangi bir ön hazırlık işlemine gerek duymadığı için çok hızlı sonuç üretmektedir. Ancak oluşturduğu SYM'ler genelde hatalıdır.

Çizelge 5-8: ERS Uydusu Tüm İnterferogramı için KFA Algoritmaları Süre Analizi

ERS Uydusu İtalya / Etna Dağı (5200 x 2000 piksel)			
KFA Boyut	Katlı Faz Açma Algoritması	Kod	Süre (sn)
1B	Itoh Algoritması	Matlab	1.293
2B	Goldstein Branch Cut	Matlab	78.525
		C/C++	5.312
	Rehber Harita	Matlab	x
		C/C++	89.721
	Mask-Cut	C/C++	162.586
	Flynn En Küçük Süreksizlik	C/C++	130.629

Çizelge 5-9: ERS Uydusu Kısmi İnterferogramı için KFA Algoritmaları Süre Analizi

ERS Uydusu İtalya / Etna Dağı (1000 x 2000 piksel)			
KFA Boyut	Katlı Faz Açma Algoritması	Kod	Süre (sn)
1B	Itoh Algoritması	Matlab	0.311
2B	Goldstein Branch Cut	Matlab	10.181
		C/C++	1.142
	Rehber Harita	Matlab	
		C/C++	3.808
	Mask-Cut	C/C++	2.869
	Flynn En Küçük Süreksizlik	C/C++	60.297

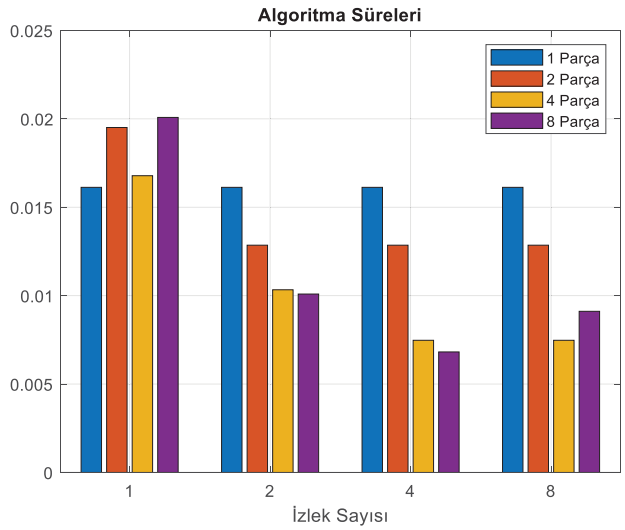
Algoritma süreleri sentetik olarak üretilen interferogram verileri için de Çizelge 5-10'daki gibi hesaplanmıştır.

Çizelge 5-10: Sentetik Veri İçin Katlı Faz Açma Algoritmaları Süre Analizi

Sentetik Üretilen Interferogram (101 x 101 piksel)			
KFA Boyut	Katlı Faz Açma Algoritması	Kod	Süre (sn)
1B	Itoh Algoritması	Matlab	0.082
2B	Goldstein Branch Cut	Matlab	0.843
		C/C++	0.344
	Rehber Harita	Matlab	1.148
		C/C++	0.379
	Mask-Cut	C/C++	0.458
	Flynn En Küçük Süreksizlik	C/C++	0.154

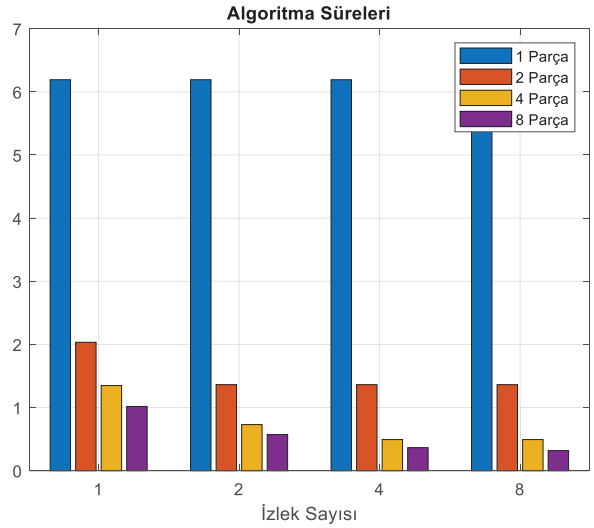
Algoritma süreleri, algoritmaların 100 tekrar çalıştırılıp hesaplanan sürelerin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Tablolardaki sürelere bakıldığında algoritmalar C/C++ kodlaması ile ciddi oranda hızlandırılmışlardır. C/C++ dilinde kodlama dışında bazı ek hızlandırma paralelleştirme faaliyetleri de yapılmıştır.

Goldstein Branch Cut algoritması için Çizelge 5-9 incelendiğinde, C/C++ kodlaması Matlab benzetim ortamına göre ~10 kat kadar hızlı çalışmaktadır. Algoritmayı daha fazla hızlandırabilmek adına iki farklı işlem uygulanmıştır. Bunlardan ilki, girdi interferogram farklı büyüklükte parçalara ayrılmış ve farklı izlek (thread) sayılarında denemeler yapılmış ve her bir kombinasyon için süreler hesaplanmıştır. Bu işlem sonucunda en iyi performans interferogramın 8 eşit parçaya bölünerek 4 izlek ile çalıştırıldığı durumda alınmıştır ve bu haliyle ~2.5 kat daha hızlanma görülmüştür. İkinci işlem olarak Derleyici Optimizasyon Seviye Ayarları değiştirilerek denemeler yapılmıştır. Varsayılan optimizasyon seviyesi olan *"O0"* değiştirilerek *"O1"* ve *"O2"* optimizasyon seviyeleri denenmiştir. Şekil 5-98'de *"O2"* optimizasyon seviyesindeki farklı izlek ve parça sayılarına göre süreler görülmektedir. 4 izlek ve 8 parça olduğu durumda algoritma süresinde ~2 kat kısalma olmaktadır. Böylelikle Goldstein Branch Cut algoritması, derleyici optimizasyonu *"O2"* olarak değiştirilip, 8 parça 4 izlek çalıştırılarak Matlab benzetimine göre ~50 kat hızlandırılabilmektedir.



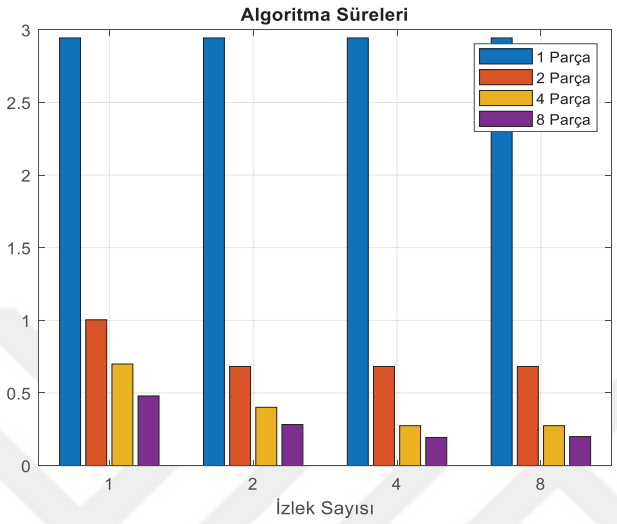
Şekil 5-98: Goldstein Branch-Cut Algoritması Farklı Parça - İzlek Sayısı için *"O2"* Optimizasyon Seviyesi Süreleri

Katlı faz açma algoritmaları içerisinde en yavaş çalışan Flynn algoritması yavaş çalışması sebebiyle Matlab benzetim ortmaında hiç modellenmemiştir. Bunun yerine C/C++ dili üzerinden başlanmış ancak yine de algoritmanın çok ağır kalması sebebiyle paralleştirme ve hızlandırma işlemleri uygulanmıştır. Zira algoritma büyük görüntüler için sonuç üretememektedir. Bu sebeple girdi interferogram 500x500 boyutlarında kare pencerelere ayrılarak çalıştırılmış ve çizelgelerdeki toplam süre bu şekilde hesaplanmıştır. Goldstein algoritmasında olduğu gibi Flynn algoritmasında da hızlandırma işlemleri için farklı uygulamalar denenmiştir. İlk olarak girdi interferogram farklı izlek ve parça sayılarında çalıştırılmış ve Şekil 5-99'daki süreler hesaplanmıştır.



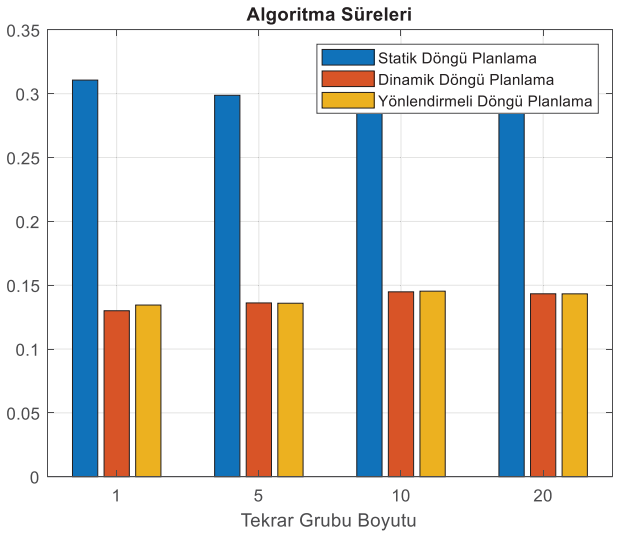
Şekil 5-99: Flynn Algoritması Farklı Parça - İzlek Sayısı için Algoritma Süreleri

Bu işlem sonucunda en iyi performans, interferogramın 8 eşit parçaya bölünerek 8 izlek ile çalıştırıldığı durumda alınmıştır ve bu haliyle ~20 kat hızlanma görülmüştür. Daha sonra Derleyici Optimizasyon Seviye Ayarları değiştirilerek denemeler yapılmıştır. Varsayılan optimizasyon seviyesi olan *"O0"* değiştirilerek *"O1"* ve *"O2"* optimizasyon seviyeleri denenmiştir.



Şekil 5-100: Flynn Algoritması Farklı Parça - İzlek Sayısı için *"O1"* Optimizasyon Seviyesi Süreleri

Şekil 5-100'de *"O1"* optimizasyon seviyesindeki farklı izlek ve parça sayılarına göre süreler görülmektedir. *"O1"* ve *"O2"* optimizasyon seviyesi farketmeksizin 8 izlek ve 8 parça olduğu durumda algoritma süresinde ~2 kat daha kısalma olmaktadır. Flynn algoritmasında son işlem olarak döngü planlama seçenekleri de değiştirilmiş ve süreye etkisi gözlemlenmiştir.



Şekil 5-101: Flynn Algoritması Farklı Yığın Sayıları için Döngü Planlama Yöntemleri Algoritma Süreleri

Farklı boyuttaki yığınlar (chunk) için varsayılan döngü planlama seçeneği olan “Statik” döngü planlama seçeneği değiştirilerek “Dinamik” ve “Yönlendirmeli” Döngü planlama seçenekleri denenmiş ve Şekil 5-101’deki süreler hesaplanmıştır. Dinamik ve Yönlendirmeli döngü planlamada, statik döngü planlamaya oranla algoritma süresinin ~2.5 kat daha kısaldığı görülmektedir. Böylelikle Flynn algoritması ilk herhangi bir paralleştirme ve optimizasyon yapılmamış ilk haline göre ~100 kat hızlandırılmıştır.

5.3. Radargrametri İşlem Adımları

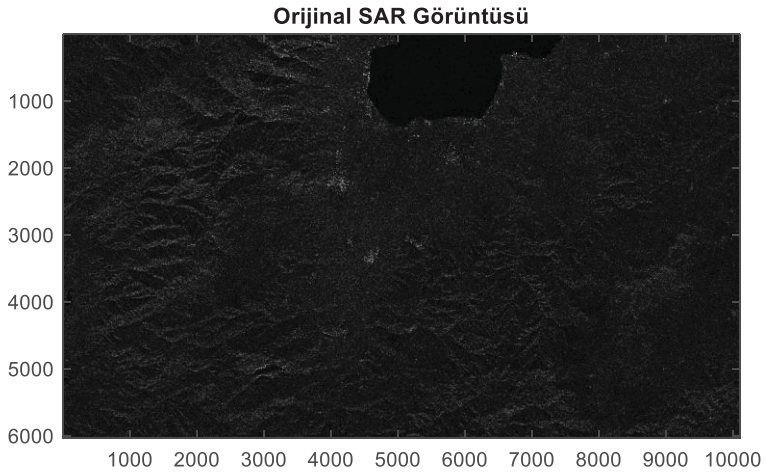
Radargrametrik Sayısal Yükseklik Modeli Oluşturma algoritmasının işlem adımları Şekil 3-2'de verilmiştir.

5.3.1. Gürültü Temizleme

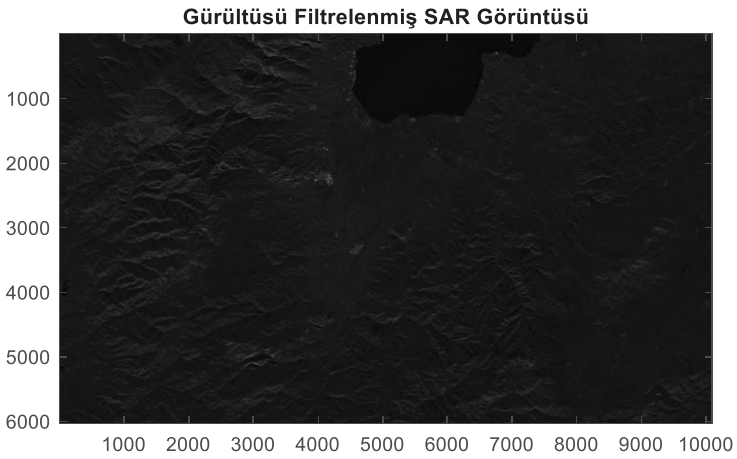
SAR görüntüleri SAR interferometri ve radargrametri tekniklerine ait algoritmaların ilk adımında opsiyonel olarak filtrelenebilir. Filtreleme işlemindeki amaç, SAR görüntüsü içerisindeki öznitelikleri daha belirgin hale getirmek ve görüntü çiftleri arasındaki korelasyonu arttırmaktır. Radargrametride SAR görüntülerinin faz bilgisine ihtiyaç duyulmamaktadır. Ancak hem azimut eksininde çakıştırma hem de özellikle eşleştirme adımında görüntü üzerindeki özniteliklerin belirgin hale gelmiş olması büyük katkı sağlayacaktır.

Kullanıcı arayüzünden filtre seçimi ve kare pencerenin kenar boyutu seçimi yapılabilmektedir.

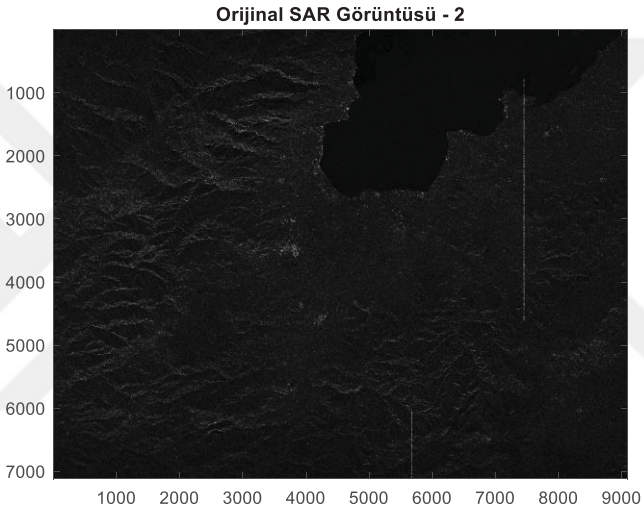
Şekil 5-102 ve Şekil 5-104'te RADARSAT uydusuna ait İzmit Körfezini içeren orijinal SAR görüntüleri, Şekil 5-103 ve Şekil 5-105'te ise 11x11'lik bir pencerede medyan filtre ile filtrelenmiş ve benek gürültüsü temizlenmiş SAR görüntüleri bulunmaktadır.



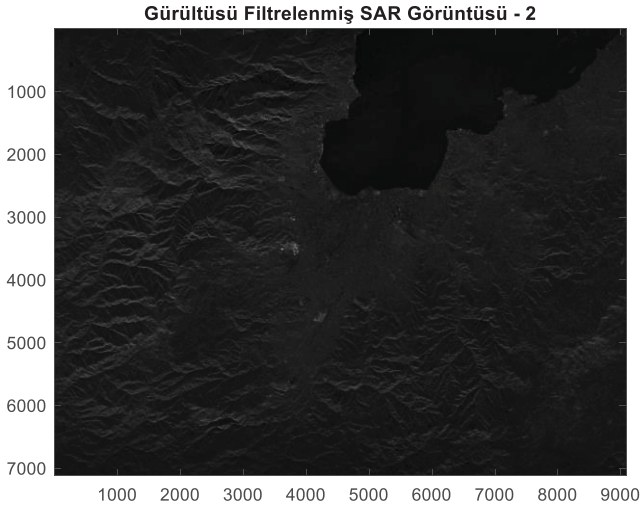
Şekil 5-102: Orijinal SAR Görüntüsü - 1 (RADARSAT – Türkiye / İzmit)



Şekil 5-103: Filtrelenmiş SAR Görüntüsü - 1 (RADARSAT – Türkiye / İzmit)



Şekil 5-104: Orijinal SAR Görüntüsü - 2 (RADARSAT – Türkiye / İzmit)



Şekil 5-105: Filtrelenmiş SAR Görüntüsü - 2 (RADARSAT – Türkiye / İzmit)

5.3.2. SAR Görüntüleri Arasında Bilinen Açı Farkını Düzeltme

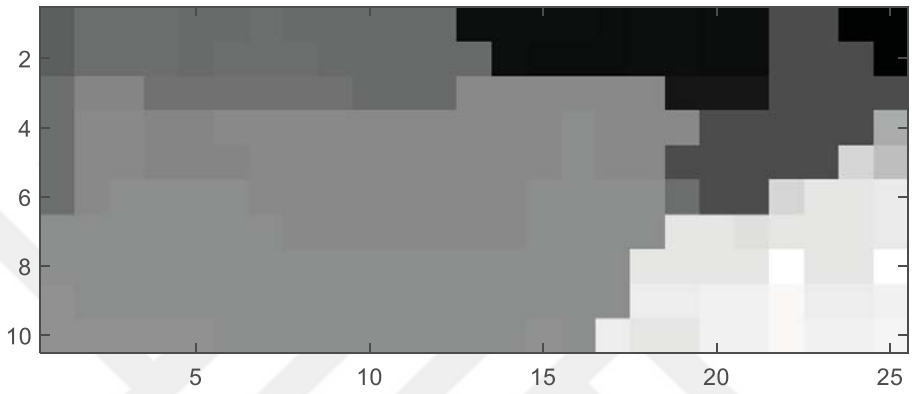
Tıpkı SAR interferometride olduğu gibi radargrametride de SAR görüntüleri kullanılmaktadır ve SAR görüntülerinin yanında ismi metadata olarak geçen, görüntüye ve sensörün konuşlu olduğu uyduya ait uçuş bilgilerinin yer aldığı dosya içerisinde platformun baş açıları yer almaktadır. Radargrametri tekniğine girdi olacak görüntülerin baş açıları arasındaki fark algoritmanın hemen başında eşitlenebilir ve açısal ofset düzeltilebilir. Bu adım SAR interferometride pas geçilse ve uygulanmasa bile çakıştırma adımında telafi edilebilecektir. Ancak radargrametride çakıştırma sadece azimut eksini yönünde piksel kaydırmasından ibaret olduğu için; açı farkı düzeltme işlemi radargramteride zorunlu bir adımdır. Bu işlem için gerekli olan SAR görüntülerinden birinin baş açısını diğerine eşitlemektir. Bu işlem yapılırken farklı yeniden örnekleme ve interpolasyon yöntemleri kullanılabilir. Hazır fonksiyonlar tercih edilebilir. Önemli olan görüntü çiftinin aynı yönelime getirilmesidir. Geliştirilen benzetim ortamında kullanıcı arayüzü üzerinden görüntüler arası baş açıları farkı girişi yapılabilmektedir.

Tez kapsamında radargrametri tekniğine uygun olarak toplanmış tek SAR görüntü çifti (RADARSAT – Türkiye/İzmit) bulunmaktadır ve bu görüntü çiftinin baş açıları arasında ~1.2º fark bulunmaktadır. Bu sebeple bir sonraki adıma geçmeden önce görüntülerin baş açılarının eşitlenmesi gerekmektedir.

SAR görüntü çifti baş açıları eşitlenme işleminin etkisini net olarak gözlemlemek için bazı ek işlemler yapılmıştır. İlk olarak baş açıları eşitlenmemiş orijinal SAR görüntü çifti SAR interferometrideki kaba çakıştırma bloğuna girdi olarak verilmiş ve açısal farklılığın etkisi görülmeye çalışılmıştır. Ancak görüntüler arasında çok ciddi bir kayma olduğu için pencere boyutu seçimi çok önemlidir. Görüntülerde deniz olan kısmından kayma miktarı aşağı yukarı tahmin edilerek en az iki katı büyüklüğünde bir pencere seçilmiştir. Ancak bu sefer de görüntü içerisine çok az pencere sığmaktadır ve dönme etkisi gözlenemeyecektir. Bu problem de örtüşme miktarı yüksek girilerek halledilmiştir. Sonuç olarak çakıştırma bloğuna, 4096x4096'lık pencereler %95 örtüşme oranı ile görüntüler beslenmiş ve her penceredeki kayma miktarı gözlenmiştir. Çizelge 5-11 ve Çizelge 5-12'den görüleceği üzere her pencereden gelen kayma miktarı görüntünün açısal olarak farklı yönelimde olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5-11: Pencerelerden Gelen Çapraz Korelasyon Sonucu (Menzil)

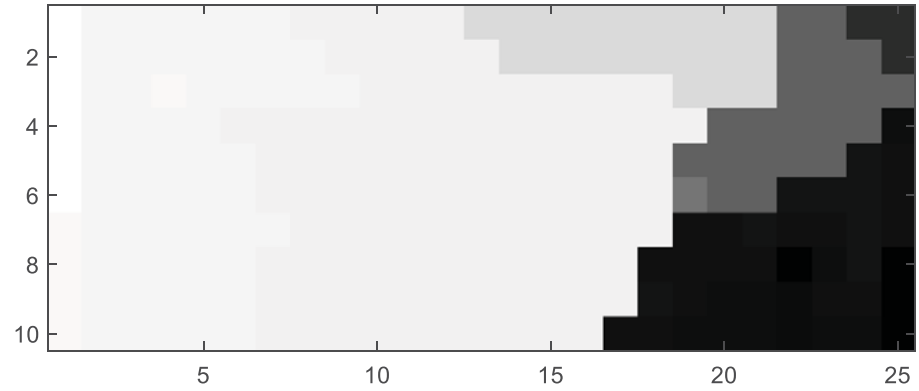
331	336	336	336	335	335	336	335	335	335	335	335	307	307	307	307	306	307	307	306	306	326	326	304	304
331	336	336	336	335	336	336	336	335	335	335	335	335	307	306	306	306	307	307	306	306	326	326	326	304
336	343	343	337	337	337	337	337	337	335	335	335	344	344	344	344	344	344	310	310	310	326	326	326	326
336	344	344	343	343	344	344	344	344	344	344	344	344	344	344	345	344	344	344	327	326	326	326	326	353
336	344	344	343	343	343	344	344	344	344	344	344	344	344	344	345	344	344	327	327	327	326	326	366	359
336	344	345	345	345	345	344	344	344	344	344	344	344	344	345	345	345	345	336	327	327	366	370	370	372
345	345	345	345	345	345	345	344	344	344	344	344	344	344	345	345	345	345	371	371	368	371	371	371	372
345	345	345	345	345	345	345	345	345	345	345	345	345	345	345	345	345	371	371	371	371	378	370	371	378
346	345	345	345	345	345	345	345	345	345	345	345	345	345	345	345	345	373	373	374	374	376	373	373	374
346	346	346	346	346	345	345	345	345	345	345	345	345	345	346	345	373	371	370	374	374	376	374	374	375



Şekil 5-106: Çizelge 5-11'in Siyah Beyaz Görseli

Çizelge 5-12: Pencerelerden Gelen Çapraz Korelasyon Sonucu (Çapraz Menzil)

-1247	-1249	-1249	-1249	-1249	-1249	-1249	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1258	-1258	-1258	-1258	-1258	-1258	-1258	-1258	-1295	-1295	-1312	-1312
-1246	-1249	-1249	-1249	-1249	-1249	-1249	-1249	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1258	-1258	-1258	-1258	-1258	-1258	-1258	-1258	-1295	-1295	-1295	-1312
-1246	-1249	-1249	-1248	-1249	-1249	-1249	-1249	-1249	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1258	-1258	-1258	-1295	-1295	-1295	-1295
-1246	-1249	-1249	-1249	-1249	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1295	-1295	-1295	-1295	-1295	-1323
-1246	-1249	-1249	-1249	-1249	-1249	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1295	-1295	-1295	-1295	-1295	-1321	-1322
-1246	-1249	-1249	-1249	-1249	-1249	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1289	-1295	-1295	-1320	-1321	-1321	-1322
-1248	-1249	-1249	-1249	-1249	-1249	-1249	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1322	-1322	-1320	-1322	-1322	-1320	-1322
-1248	-1249	-1249	-1249	-1249	-1249	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1322	-1322	-1322	-1322	-1326	-1323	-1320	-1326
-1248	-1249	-1249	-1249	-1249	-1249	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1321	-1322	-1323	-1323	-1324	-1322	-1322	-1325
-1248	-1249	-1249	-1249	-1249	-1249	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1250	-1322	-1322	-1323	-1323	-1323	-1324	-1323	-1323	-1325



Şekil 5-107: Çizelge 5-12'un Siyah Beyaz Görseli

İlk SAR görüntüsünün baş açısı 10.14º iken, ikinci SAR görüntüsünün baş açısı 8.89º'dir. Açısal ofset yaklaşık 1.24º civarındadır. İkinci görüntü aralarındaki fark kadar döndürülmüştür. Döndürüldükten sonra orijinal SAR görüntüsünde olduğu gibi yine 4096x4096'lık pencereler %95 örtüşme oranı olacak şekilde oryantasyonları eşitlenmiş SAR görüntü çifti üzerinde gezdirilerek pencerelerin korelasyon değerlerine bakılmıştır.

Çizelge 5-13 ve Çizelge 5-14'te dönme etkisi gözlemlenmemektedir. Sadece menzil ve çapraz menzilde görüntülerden birinin kaydırılması gerekmektedir. Bu işlem de bir sonraki adımda yapılacaktır.

Çizelge 5-13: Pencerelerden Gelen Çapraz Korelasyon Sonucu (Menzil)

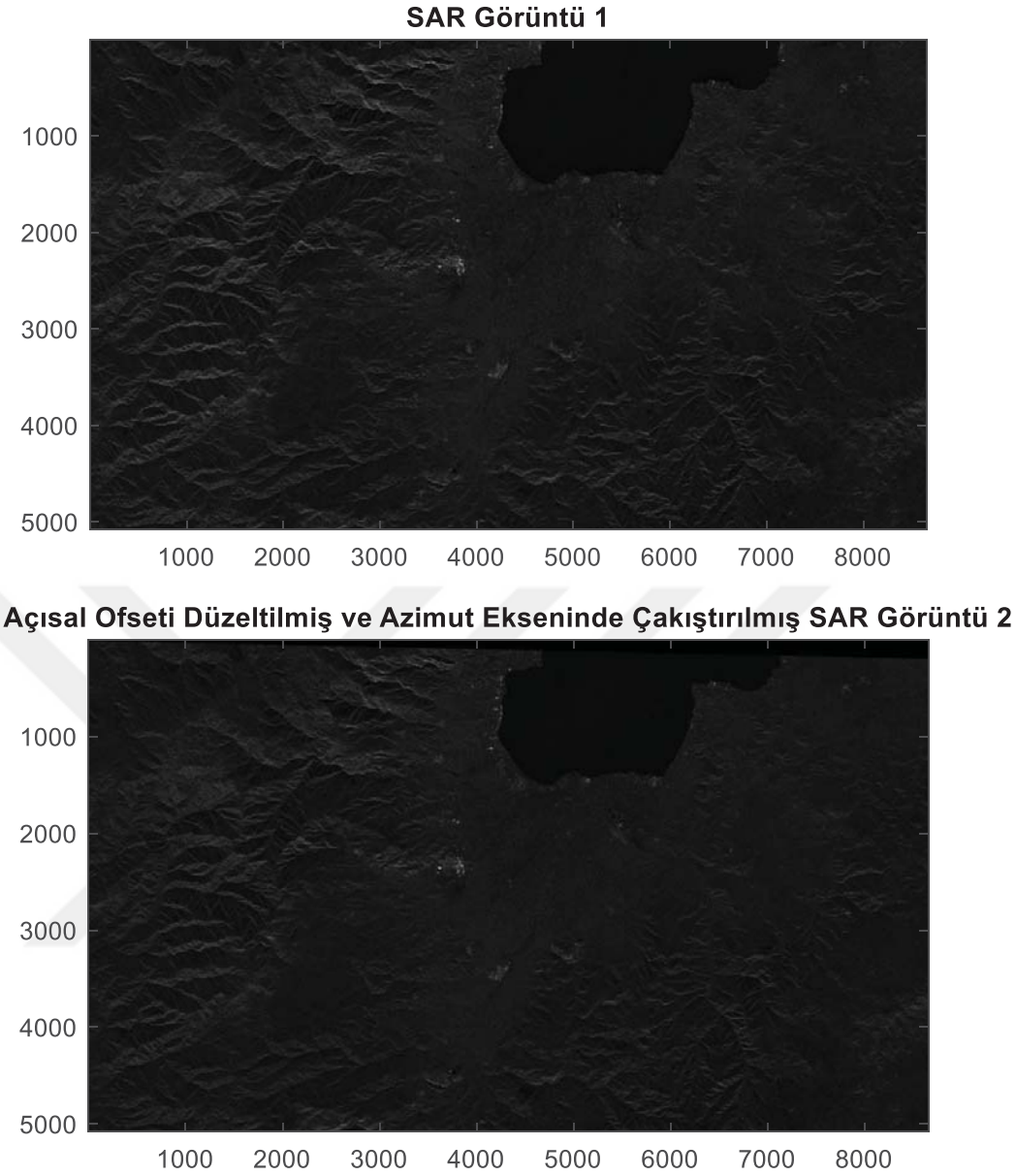
360	361	361	361	361	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	364	364	364	364
360	361	360	361	361	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	364	364	364	364
361	361	360	361	361	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	364	364	364	364
361	360	360	361	361	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	364	364	364	364
361	361	361	361	361	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	364	364	364	364	366	366
361	361	361	361	361	362	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	364	364	364	365	365	364
361	361	361	361	359	360	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	363	364	364	365	364	365	364
361	360	361	361	360	360	363	363	363	363	363	364	364	364	364	364	363	363	363	364	365	364	364	364	364	
362	362	361	361	361	360	363	363	363	363	364	364	364	364	364	364	364	364	364	364	364	364	364	364	365	
362	362	361	361	361	361	363	363	363	363	363	364	363	364	364	363	364	364	364	364	364	364	364	364	364	

Çizelge 5-14: Pencerelerden Gelen Çapraz Korelasyon Sonucu (Çapraz Menzil)

-1298	-1298	-1298	-1298	-1298	-1268	-1268	-1268	-1268	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1270	-1270	-1270	-1270
-1299	-1298	-1299	-1297	-1298	-1268	-1268	-1268	-1268	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1270	-1270	-1270	-1270
-1297	-1297	-1297	-1297	-1297	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1270	-1270	-1270	-1270
-1297	-1297	-1297	-1297	-1297	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1270	-1270	-1270	-1270	-1270
-1297	-1297	-1297	-1297	-1297	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1270	-1270	-1270	-1282	-1282
-1297	-1297	-1297	-1297	-1300	-1304	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1270	-1270	-1270	-1284	-1284	-1286
-1297	-1297	-1297	-1299	-1302	-1304	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1270	-1270	-1287	-1286	-1289	-1290
-1295	-1296	-1297	-1297	-1301	-1304	-1269	-1269	-1269	-1269	-1269	-1270	-1270	-1270	-1270	-1270	-1269	-1269	-1269	-1270	-1289	-1290	-1291	-1291	-1291	
-1293	-1293	-1296	-1297	-1299	-1304	-1269	-1269	-1269	-1270	-1270	-1270	-1270	-1270	-1270	-1270	-1270	-1270	-1270	-1291	-1291	-1291	-1291	-1293	-1294	
-1293	-1293	-1296	-1297	-1299	-1303	-1280	-1280	-1280	-1270	-1270	-1270	-1270	-1270	-1270	-1270	-1270	-1270	-1291	-1293	-1291	-1291	-1294	-1297	-1297	

5.3.3. Azimut Ekseninde Çakıştırma

Yönelimleri eşleştirilen görüntü çifti epipolar geometri için azimut ekseninde çakıştırılmalıdır. Böylelikle görüntü çifti için sadece menzil yönünde farklar oluşacak ve bu farklara paralaks ismi verilecektir. Her nokta için hesaplanan paralaks değeri sensörlerin bakış açıları ile birlikte kullanılarak bölgenin sayısal yükseklik modeli çıkarılacaktır. Azimut ekseninde çakıştırma işlemi Eşitlik 3.1 ve Eşitlik 3.2 kullanarak hesaplanacak piksel miktarı kadar kaydırmaktan ibarettir.



Şekil 5-108: Yönelimleri Aynı ve Azimut Ekseninde Çakıştırılmış Görüntü Çifti

SAR görüntü çifti arasındaki yaklaşık 1.24º civarındaki bilinen açı farkı giderilip yönelimleri eşitlenen ve daha sonra azimut ekseninde çakıştırılan görüntü çifti Şekil 5-108'de verilmiştir. Aslında Şekil 5-102 ve Şekil 5-104'teki orijinal hallerine bakıldığında ilk görüntüde herhangi bir değişiklik veya işlem yapılmamıştır. Sadece görüntü boyutları eşitlenmek için görüntüler kırpılmıştır. Açısal ofset düzeltme ve çakıştırma için görüntünün kaydırılması ikinci SAR görüntüsü üzerinden yapılmıştır. Şekil 5-108'de alttaki SAR görüntüsü dikkatle incelenirse açısal olarak döndürüldüğü görüntünün sağ üst kısmından anlaşılmaktadır.

5.3.4. Eşleştirme

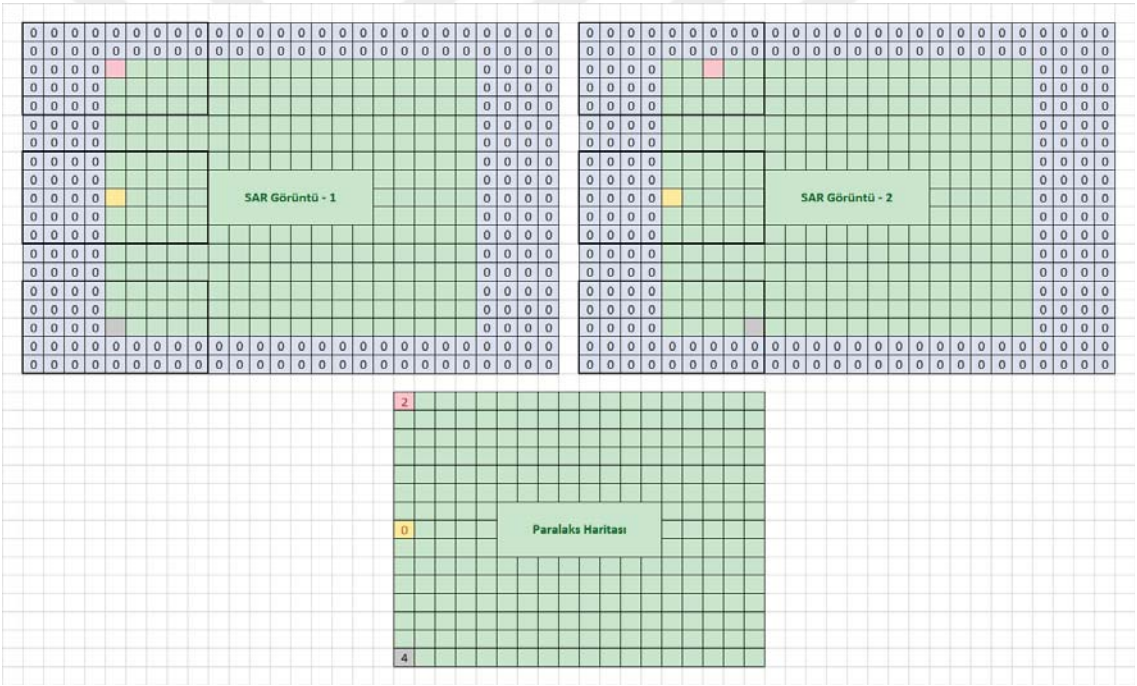
Eşleştirme bloğu radargrametrik teknik kullanılarak Sayısal Yükseklik Modeli oluşturmak için kritik bir öneme sahiptir. Zira eşleştirme bloğu sayesinde görüntülenen alandaki bir noktanın radargrametrik görüntü çiftinde hangi piksellere düştüğünün (homolog pikseller) tespiti ilgili noktanın yüksekliğinin hesaplanması için zorunludur. Eşleştirme bloğu ile radargrametrik görüntü çiftindeki tüm noktalar birbirlerine eşlenirler. Eşlenen tüm noktalar arasındaki piksel farklılıkları ve uçuş geometri bilgileri (görüntüleme platformunun bakış açısı ve yerden yüksekliği) kullanılarak görüntülenen alanın yükseklik modeli oluşturulur.

Eşleştirme bloğunda kullanılan algoritma, SAR interferometri tekniğindeki çakıştırma / hizalama bloğunda kullanılan algoritmaya çok benzemektedir. Ancak radargrametrik SAR görüntü çiftindeki piksellerin menzil yönünde çakıştırılması mümkün değildir. Görüntüleri alan sensörler arası uzaklık farkının (baz uzaklık) çok yüksek olmasından kaynaklı olarak görüntülenen alandaki bir noktanın iki SAR görüntüsündeki indisleri arasında bir fark oluşacaktır (paralaks). Paralaks değerinin tüm pikseller için hesaplanmasına da eşleştirme işlemi ismi verilmektedir. Eşleştirme için görüntüler üzerinde belli boyutlarda pencereler gezdirilerek homolog piksellerin SAR görüntüleri üzerindeki indisleri (konumları) hesaplanacak ve ilgili homolog pikseller için fark yani paralaks değeri bulunacaktır.

Eşleştirme bloğunun benzetimi yapılırken ilk olarak görüntü çiftleri Şekil 5-109'teki mavi alan gibi sıfırlardan oluşan bir pencere içerisine alınır. Buradaki amaç gezdirilecek pencerenin merkezinin SAR görüntüsünün köşe ve kenar noktalarına denk gelmesini sağlamaktır. Çünkü görüntü içerisindeki tüm noktalar için eşleştirme yapılacaktır. Geliştirilen benzetim ortamında kullanıcı arayüzü üzerinden eşleştirme adımında kullanılacak olan pencere için en ve boy boyutları ayrı ayrı girilebilmektedir.

Eşleştirme bloğunda, Çakıştırma bloğundan farklı olarak gezdirilecek pencere kare olmak zorunda değildir. Çünkü çapraz korelasyon çıktısı genelde tek bir yönde (Menzil) olacaktır. Bu sebeple kısa kenarı çok kısa, uzun kenarı ise çok uzun olan bir dikdörtgen pencere gezdirmek *3.2.4.2. Epipolar Geometri* bölümünde anlatılan yöntem ile eşleştirme yapmak anlamına gelecektir. Buradaki amaç; SAR görüntü çiftinin azimut yönünde çakıştırılmış olması dolayısıyla sadece menzil yönünde bir tarama yapılacağı için gezdirilen pencerenin boyutu azimut yönünde küçültülerek işlem yükünü hafifletmektir.

Eşleştirme işlemi Şekil 5-109 üzerinden anlatılacak olursa, SAR görüntülerinde aynı nokta için kırmızı, sarı ve gri renklerde olduğu gibi homolog pikseller bulunmaktadır. Bu piksellere denk gelen gerçek noktanın yükseklik bilgisinden ve sensörler arası mesafenin fazla olmasından kaynaklı olarak aynı nokta iki görüntüde farklı indislere düşmektedir. Görüntü üzerinde belli boyutlarda bir pencere gezdirilerek görüntü içerisindeki tüm piksellerin ikinci görüntüdeki homolog karşılıkları bulunur ve indisleri arasındaki fark Şekil 5-109'daki gibi hesaplanır. Örneğin kırmızı için 2 piksel, sarı için 0 ve gri için 4 piksel fark bulunmaktadır. Bu değerler ile aykırılık haritası oluşturulup geometrik geriçatım bloğuna girdi olarak verilir. Hesaplanan bu değerler tam sayıdır. Eğer daha hassas paralaks değerleri hesaplanmak istenir ise, SAR görüntülerinin ilk olarak üst örnekleme ile piksel çözünürlükleri arttırılıp daha sonra eşleştirme işlemi uygulamak gerekmektedir.



Şekil 5-109: Eşleştirme Hesaplama Algoritması

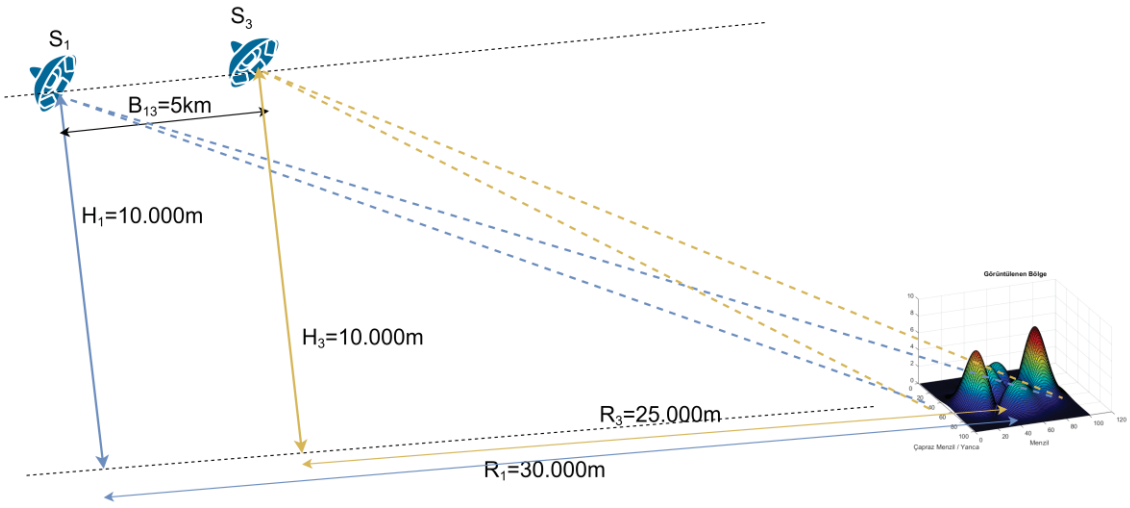
Aykırılık haritasında Şekil 5-109'da sarı piksel gibi paralaks değeri sıfır hesaplanmış bir nokta için homolog pikseller iki görüntüde de aynı indistedirler anlamına gelmektedir. Bu da ilgili noktanın yüksekliğinin sıfır olduğunu göstermektedir. Çünkü oldukça farklı iki bakış açısından görüntü alınmasına rağmen bir noktanın her iki SAR görüntüsünde de aynı piksel indisine düşmesi yüksekliğinin sıfır olmasıyla açıklanabilecektir. Aykırılık haritasında sıfırdan farklı olan tüm paralaks değerleri için uçuş bilgileri ile beraber geometrik geri çatım yapılarak her bir nokta için yükseklik bilgisi hesaplanacaktır.

Radargrametri tekniğinde kullanılmak üzere sentetik olarak üretilen veriler ile ilgili detaylar, *5.1.2. Sentetik Veri Üretimi* bölümünde anlatılmıştır. SAR interferometri tekniği için birinci ve ikinci sensörler kullanılırken, radargrametride de birinci ve üçüncü sensörler kullanılmıştır. Sensörler arası baz uzaklık interferometrideki baz uzaklığa göre oldukça fazladır. SAR görüntüleri üretilmemiş, bunun yerine ilk olarak görüntülenen bölgelerdeki her pikselin birinci ve üçüncü sensöre olan uzaklığı hesaplanmış ve Şekil 5-13'teki gibi menzil haritaları çıkarılmıştır. Daha sonra bu haritaların piksel bazında farkı hesaplanarak radargrametri tekniğinde kullanılacak olan aykırılık haritası oluşturulmuştur. Özetle sentetik olarak eşleştirme adımının çıktısı üretilmiştir.

Eşleştirme adımında üretilen paralaks değerlerinin ve paralaks değerlerinden oluşan aykırılık haritasının, oluşturulacak Sayısal Yükseklik Modeli üzerinde ne kadar etkili olduğu sentetik veriler kullanılarak çok net gözlemlenmektedir. Birkaç farklı örnek üzerinden etki gözlemlenecektir. Görüntülenen bölge 101x101 piksel ve piksel çözünürlüğü 1 metredir. Şekil 5-110'da ilk örnekte (Ö-1) baz uzaklık 5 km'dir.

Sensör 1: Yükseklik 10.000 m – Görüntülenen Bölgenin Merkezine Uzaklık 30.000 m

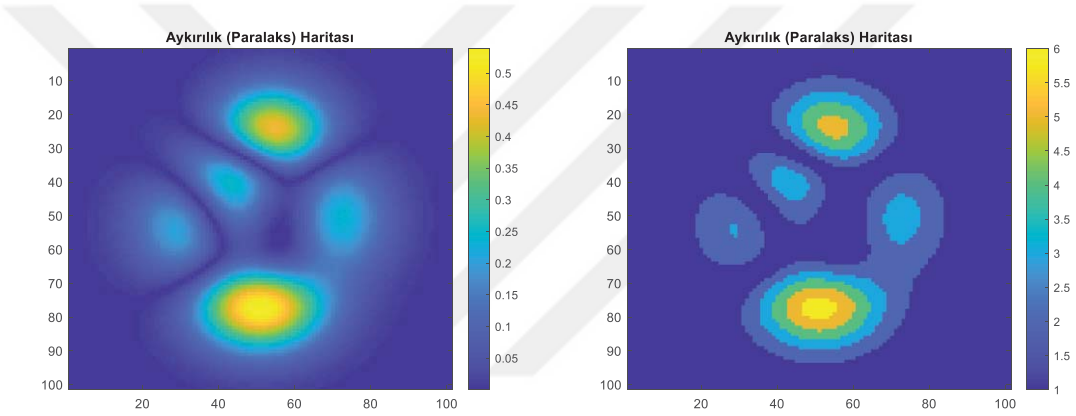
Sensör 3: Yükseklik 10.000 m – Görüntülenen Bölgenin Merkezine Uzaklık 25.000 m



Şekil 5-110: Radargrametri Tekniği İçin Üretilen Sanal Bölge Geometrisi (Örnek-1)

Böyle bir durumda bölgedeki en yüksek nokta (8.098 metre) için oluşan paralaks değeri 0.573 metre olmaktadır. Ancak gerçek verilerde homolog piksellerin eşleştirilmesi sonucunda paralaks değerinin 0.573 piksel gibi bir sonuç bulunma ihtimali yoktur. SAR görüntülerinde üst örnekleme yapılmadığı durumda bulunacak eşleştirme sonucu tam sayı olacaktır. Bu durumda da kaba bir sonuç elde edilecektir. Bu sebeple SAR görüntüleri

eşleştirme işlemi öncesinde, literatürde sık kullanılan değer olan 1/10 oranında yeniden örnekleme yapılarak piksel altı seviyede paralaks değeri hesaplanabilir duruma getirilecektir. Sanal bölgedeki en yüksek nokta için tam doğru sonucu veren paralaks değeri 0.573 piksel iken, üst örnekleme yapılmadığı durumda piksel farkına bakılarak hesaplanacak paralaks değeri ilgili nokta için 1 piksel olacaktır. Bu şekilde diğer tüm noktaların paralaks değeri de hesaplandığında paralaks değerlerinden oluşan aykırılık haritası bir ve çoğunlukla sıfırlardan oluşacak ve bu haritadan elde edilen SYM de oldukça kaba ve hatalı olacaktır. Ancak 1/10 oranında üst örnekleme yapıldığı durumda en yüksek nokta için hesaplanan paralaks değeri 6 piksel olacaktır. Paralaks değerleri, görüntüler üzerinden hesaplanması mümkün olmayan değerleriyle ve piksel seviyesinden 10 kat üst örnekleme yapılarak hesaplanmış haliyle Şekil 5-111'de çizdirilmiştir.



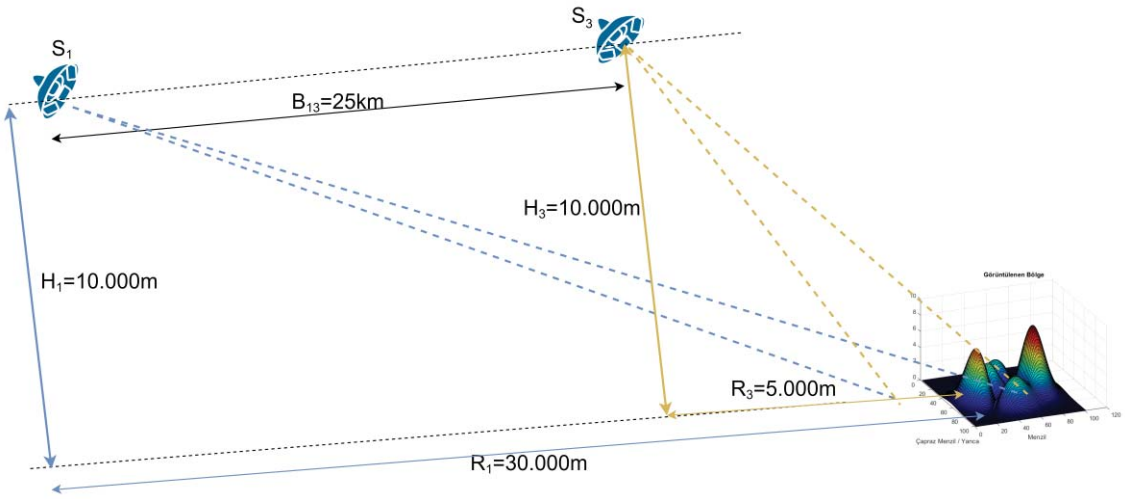
(a) (b)

Şekil 5-111: Gerçek Değer ve Pikselaltı Seviye Aykırılık Haritaları (Baz Uzaklık 5km), (a): Doğru SYM Oluşturmak için Gerekli Paralaks Değerleri, (b): 1/10 Üst Örnekleme Yapılarak Görüntü Çifti Üzerinden Hesaplanan Paralaks Değerleri

Şekil 5-112'de ikinci örnekte (Ö-2) SAR sensörleri arası baz uzaklık 25 km'ye çıkarılmış ve diğer tüm değerler sabit tutulmuştur. Baz uzaklık artışının aykırılık haritasına etkisi incelenmiştir.

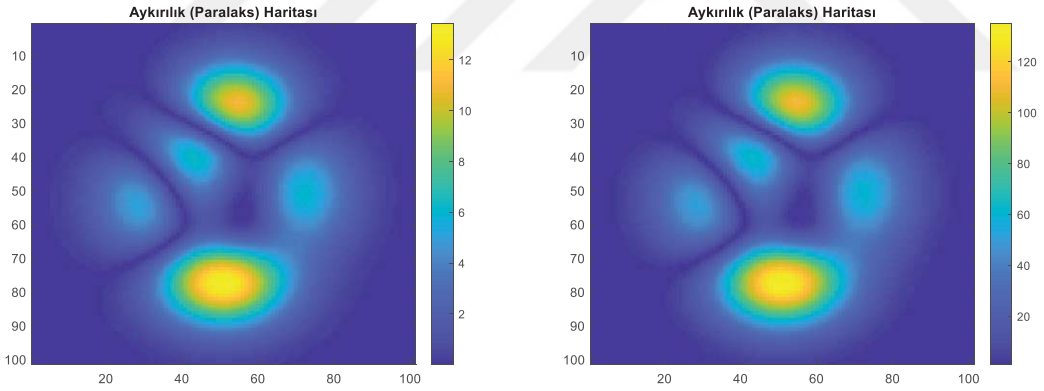
Sensör 1: Yükseklik 10.000 m – Görüntülenen Bölgenin Merkezine Uzaklık 30.000 m

Sensör 3: Yükseklik 10.000 m – Görüntülenen Bölgenin Merkezine Uzaklık 5.000 m



Şekil 5-112: Radargrametri Tekniği İçin Üretilen Sanal Bölge Geometrisi (Örnek-2)

Böyle bir durumda bölgedeki en yüksek nokta (8.098 metre) için oluşan paralaks değeri 13.431 metre olmaktadır. Piksel seviyesinde eşleştirme yapıldığı durumda 13 piksele, 10 kat üst örnekleme yapıldığında da 134 piksele denk gelecektir ve iyi bir çözünürlük elde edilecektir. Zaten elde edilen iyi çözünürlük Şekil 5-113'te sağdaki görselde de net bir şekilde görülmektedir.

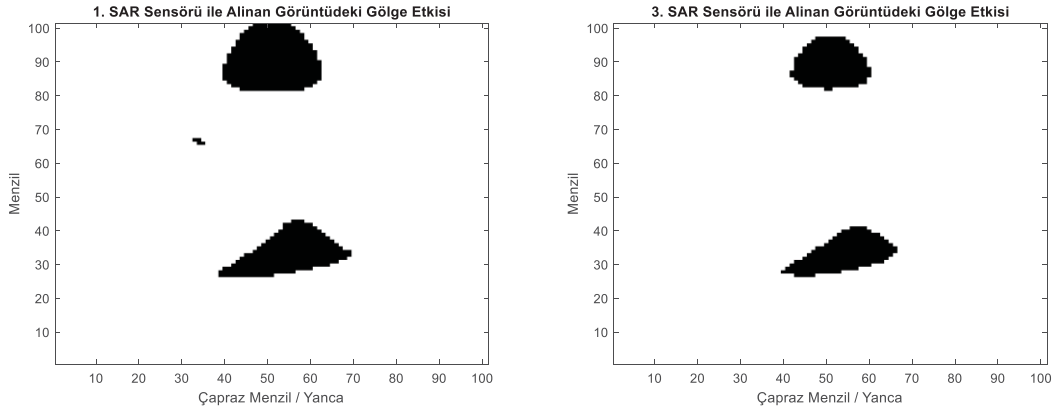


(a) (b)

Şekil 5-113: Gerçek Değer ve Pikselaltı Seviye Aykırılık Haritaları (Baz Uzaklık 25km) (a): Doğru SYM Oluşturmak için Gerekli Paralaks Değerleri, (b): 1/10 Üst Örnekleme Yapılarak Görüntü Çifti Üzerinden Hesaplanan Paralaks Değerleri

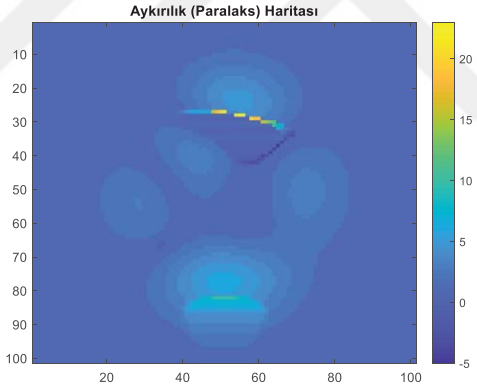
Baz uzaklığın artması radargrametride istenen bir durumdur. Çünkü baz uzaklık arttıkça eşleştirme adımının çıktısı daha yüksek çözünürlükte olmakta ve sonuç olarak daha doğru bir SYM üretilebilmektedir. Ancak baz uzaklık arttıkça da görüntüler birbirine benzememekte, gölge etkisi artmakta ve başka sorunlar oluşmaktadır. Bunun sonucunda eşleştirme adımının başarısı azalmaktadır.

Gölge alanların baz uzaklık farklılığına göre sonuca etkisi analiz edilmiştir. Örnek 1'deki senaryoya gölge etkisi eklenerek üçüncü örnek senaryo (Ö-3) oluşturulmuştur. Birinci ve üçüncü SAR sensörü ile alınan görüntülerdeki gölge etkileri Şekil 5-114'teki gibidir.



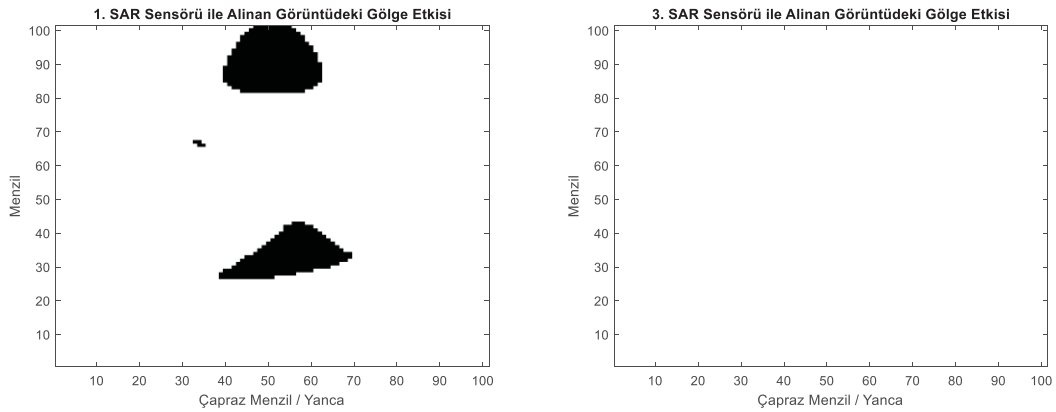
Şekil 5-114: Alınan Görüntülerdeki Gölge Etkileri (Baz Uzaklık 5km)

Gölgede kalan alanlar için en yakın komşuluğundaki değer üzerine belli bir rastgele değer eklenerek gerçek hayatta olması muhtemel bir senaryo oluşturulmuş ve Şekil 5-115'teki Aykırılık Haritası elde edilmiştir.



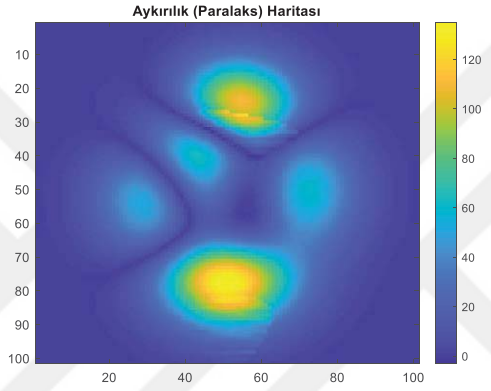
Şekil 5-115: Gölge Etkisi Varken Aykırılık Haritası (Baz Uzaklık 5km)

Son olarak ikinci örnekteki senaryoya gölge etkisi eklenerek son örnek senaryo (Ö-4) oluşturulmuştur. Şekil 5-116'daki birinci SAR sensörünün gölgesi Şekil 5-114'tekinin aynısıdır. Üçüncü SAR sensörü de bölgeye çok yaklaştığı için gölge alan oluşmamaktadır.



Şekil 5-116: Alınan Görüntülerdeki Gölge Etkileri (Baz Uzaklık 25km)

Son örnek senaryo (Ö-4) için üretilen Aykırılık Haritası Şekil 5-117'de verilmiştir.

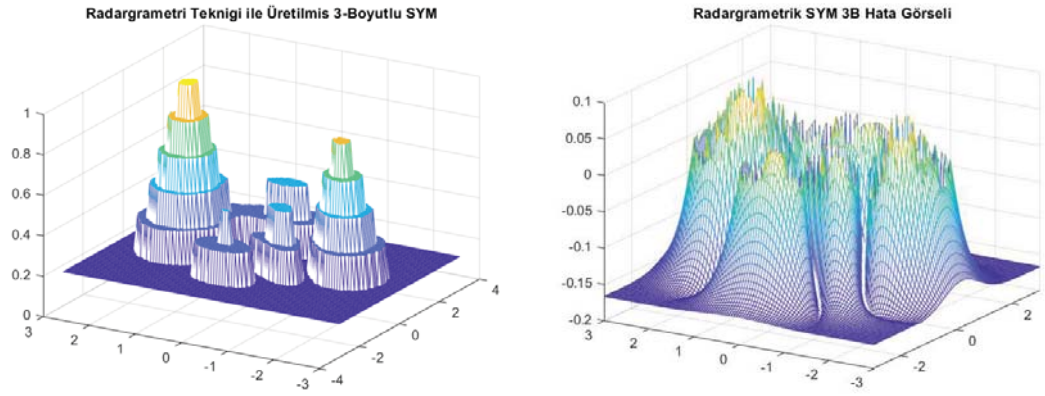


Şekil 5-117: Gölge Etkisi Varken Aykırılık Haritası (Baz Uzaklık 25km)

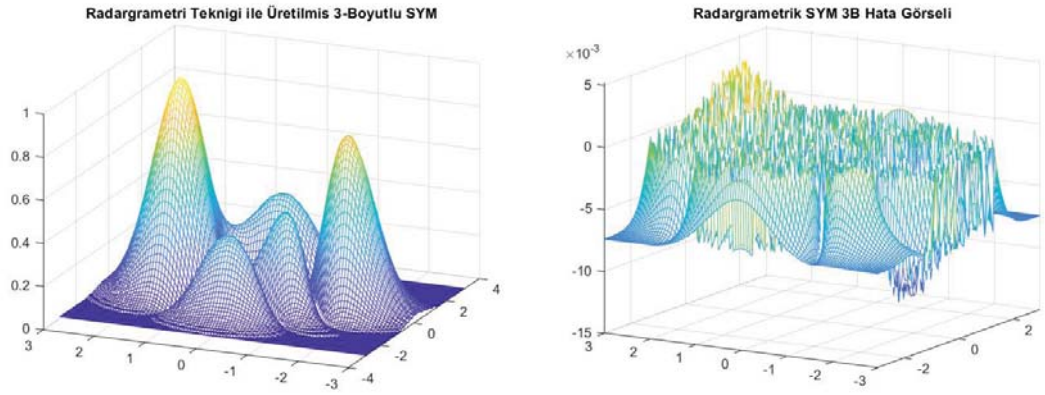
5.3.5. Geometrik Geriçatım

Geometrik olarak geriçatım yapılıp hesaplanan paralaks değerlerinden yükseklik bilgisinin elde edilmesi için bazı matematiksel hesaplamalara ihtiyaç duyulmaktadır. Yükseklik değerinin nasıl hesaplanacağına ilişkin üç farklı karmaşıklıkta formül bulunmaktadır. Tüm bilinenlerin hesaba katıldığı en karmaşık denklem Eşitlik 3.22'de verilmiştir. Sensörlerin yükseklik farkının hesaba katılmadığı ve aynı yükseklikte uçtukları varsayımı yapılan formül Eşitlik 3.24'te verilmiştir. Sadece sensörlerinin bakış açılarını kullanan en sade formül ise Eşitlik 3.26'da paylaşılmıştır. Tez çalışmasında geliştirilen benzetim ortamında kullanıcı arayüzü üzerinden geometrik geriçatımda kullanılacak formül seçimi yapılabilmektedir.

Geometrik geriçatım eşleştirme adımındaki sentetik verilerin sonuçları üzerinden analiz edilecektir. Dört örnek senaryonun her biri için Eşitlik 3.26 kullanılarak SYM oluşturulmuş ve referans harita ile farkına bakılarak ortalama hata kareleri karekökü hesaplanmıştır.



Şekil 5-118: Gölge Etkisi Yokken Üretilen SYM ve Hata Görseli (Baz Uzaklık 5km)



Şekil 5-119: Gölge Etkisi Yokken Üretilen SYM ve Hata Görseli (Baz Uzaklık 25km)

Şekil 5-118 ve Şekil 5-119'da baz uzaklığın üretilen SYM üzerindeki etkisi net olarak görülmektedir. Ortalama karesel hata hesabı üretilen SYM normalize edilip görüntülenen bölgenin normalize versiyonu ile farkına bakılarak hesaplanmıştır.

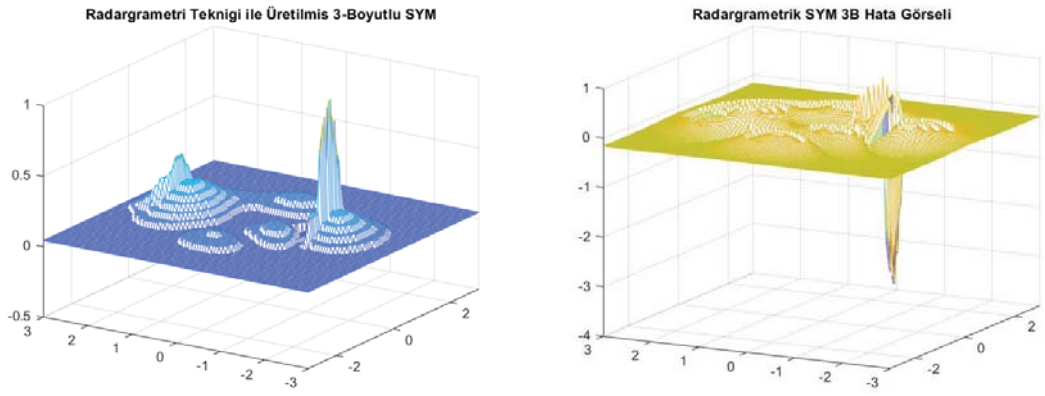
İlk örnek senaryo için (Şekil 5-111 ve Şekil 5-118), RMSE = 0.1219'dur.

İkinci örnek senaryo için (Şekil 5-113 ve Şekil 5-119), RMSE = 0.0049'dur.

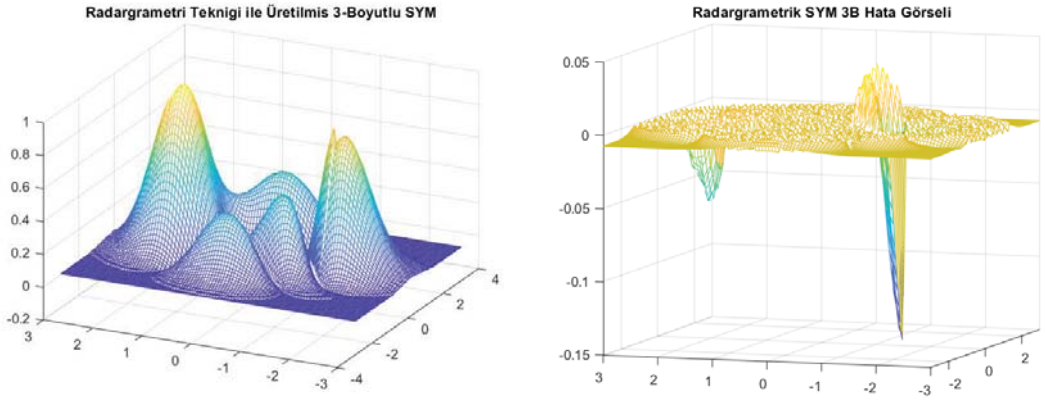
Şekil 5-120 ve Şekil 5-121'de ise baz uzaklık ve gölge etkisinin, üretilen SYM ve birbirleri üzerindeki etkisi net olarak görülmektedir. Gölgede kalan bölgelerde hatalı yükseklik bilgisi hesaplanmaktadır. Ancak baz uzaklık artışı gölge etkisinin getirdiği sorunu nispeten azaltmaktadır.

Üçüncü örnek senaryo için (Şekil 5-115 ve Şekil 5-120), RMSE = 0.1686'dır.

Dördüncü örnek senaryo için (Şekil 5-117 ve Şekil 5-121), RMSE = 0.0113'tür.



Şekil 5-120: Gölge Etkisi Varken Üretilen SYM ve Hata Görseli (Baz Uzaklık 5km)

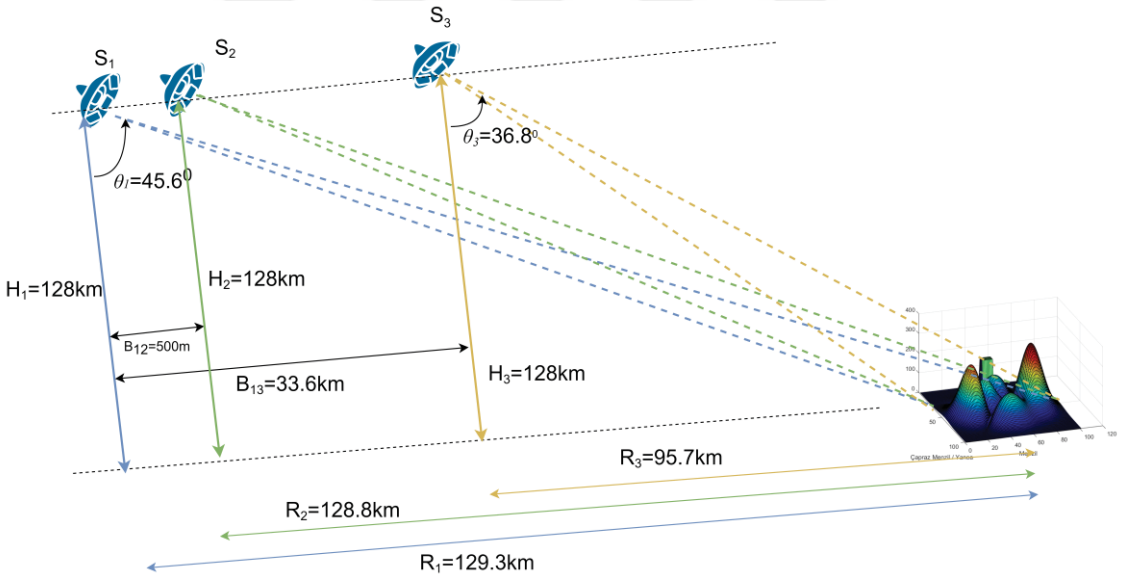


Şekil 5-121: Gölge Etkisi Varken Üretilen SYM ve Hata Görseli (Baz Uzaklık 25km)

5.4. SAR İnterferometri ve Radargrametri Füzyonu

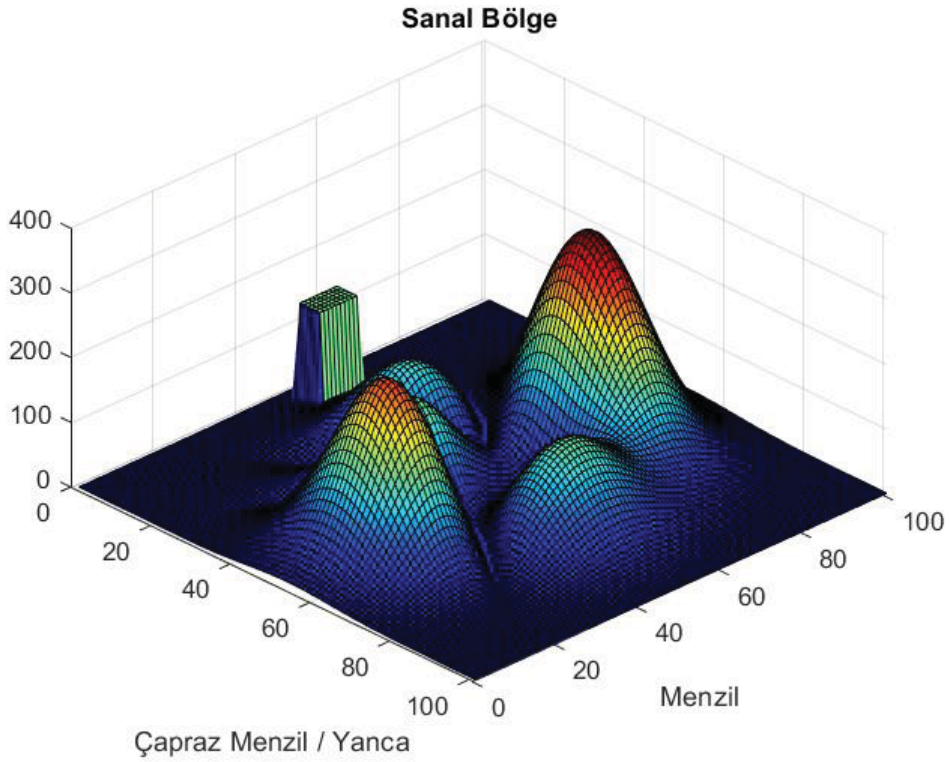
SAR interferometri ve radargrametri SAR görüntülerinden görüntüdeki bölgenin Sayısal Yükseklik Modelini çıkaran iki farklı tekniktir. Bu sebeple aynı bölgeye ait görüntüler kullanıldığı durumda her iki tekniğin de çıktısı olan yükseklik modelleri füzyon işlemine tabi tutularak daha yüksek kalitede SYM elde edilebilir.

Bu bölümde füzyon algoritmalarına geçmeden önce, SAR interferometri ve radargrametri tekniklerinin sentetik olarak oluşturulan sanal bölge için ürettikleri tüm sonuçlar bir arada analiz edilecektir. Daha sonra her iki tekniğin ürettikleri SYM'lerden birer tanesi alınarak statik füzyon işlemine girdi olarak verilecek ve statik füzyon algoritmalarının çıktısı olan SYM'ler paylaşılacaktır. Son kısımda ise radargrametri tekniği ile üretilen SYM, SAR interferometri tekniğine beslenerek dinamik füzyon algoritmasının çıktısı olan SYM'ler üretilecektir. Son kısımda ise hem tekniklerin tek başına ürettiği SYM'ler hem de füzyon algoritmaları sonucunda üretilen SYM'ler görseller ve hata değerleri üzerinden yorumlanacaktır.



Şekil 5-122: Füzyon Algoritmaları İçin Üretilen Sanal Bölge Geometrisi

Füzyon algoritmalarının tekniklerle ve birbirleri ile kıyaslamalarını görmek adına Şekil 5-122'deki parametreler ile Şekil 5-123'teki sanal bölge görüntülenerek sentetik veriler üretilmiştir. SAR sensörlerinin üçü de 128 km yüksekliğe çıkarılmış ve baz uzaklık interferometri için 500 metre seçilmiştir. Radargrametri için kullanılan 1 ve 3. Sensörlerin bakış açıları da 45.3º ve 36.8º olarak belirlenmiştir ve böylelikle *5.1.1.4. RADARSAT Uydusu SAR Görüntüleri* bölümündeki gerçek görüntülerin parametreleri kullanılmıştır.

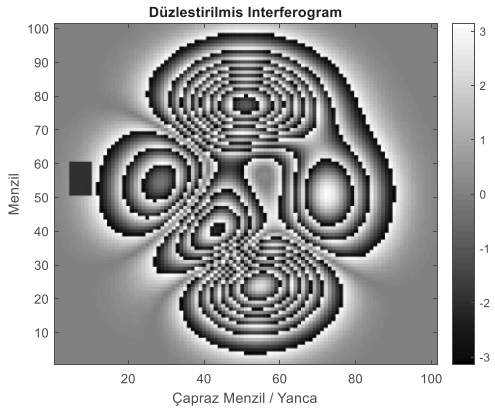


Şekil 5-123: Görüntülenen Bölge

Benzetim çalışmalarında anlatıldığı gibi üç sensör ile bölgenin görüntülendiği düşünülmüştür. Görüntülenen bölgeye ilk olarak SAR interferometri tekniği uygulanmıştır. Uygulanan teknikte farklı katlı faz açma algoritmaları kullanılarak birbirinden farklı hata oranlarına sahip olan SYM'ler üretilmiştir. Ayrıca rehber harita kullanan katlı faz açma algoritmalarında farklı rehber haritalar seçilerek rehber haritaların etkileri de gözlemlenmiştir. *5.2.7.2.1.1 Yol İzleme Metotları* bölümünde tek tek ele alınan katlı faz açma algoritmaları, bu kısımda hep birlikte incelenerek kıyaslamalı analizleri yapılacaktır. Her bir katlı faz açma algoritmasına girdi olarak aynı geometriden üretilen sanal bölgeye ait Şekil 5-124'daki düzleştirilmiş interferogram verilecektir ve algoritmaların performansları incelenecektir.

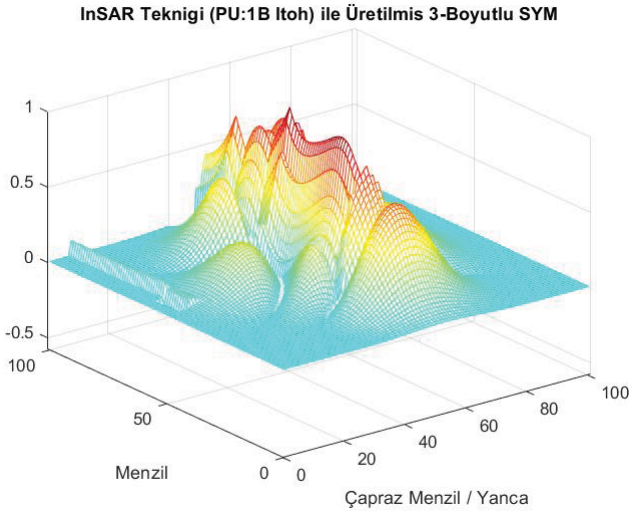
Ayrıca Şekil 5-122'de yer alan bir ve üçüncü sensörlerden oluşan görüntüleme geometrisi ile radargrametri tekniği uygulanarak Sayısal Yükseklik Modeli oluşturulacaktır.

Her iki teknik ile üretilen Sayısal Yükseklik Modellerinden birer tanesi alınarak Statik Füzyon algoritmasına girdi olarak verilecektir.

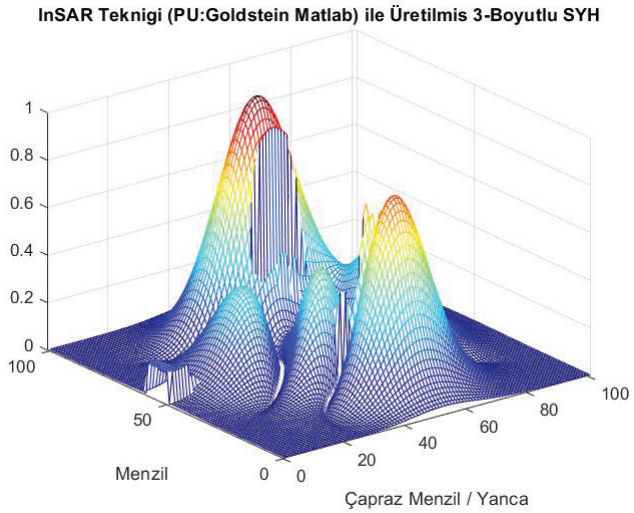


Şekil 5-124: Düzleştirilmiş İnterferogram

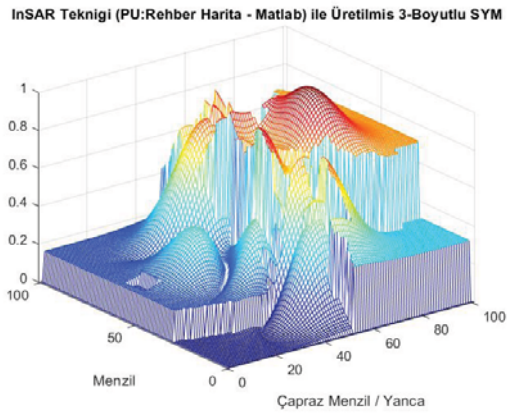
Katlı faz açma algoritmalarının oluşturduğu SYM'ler verilmiştir.



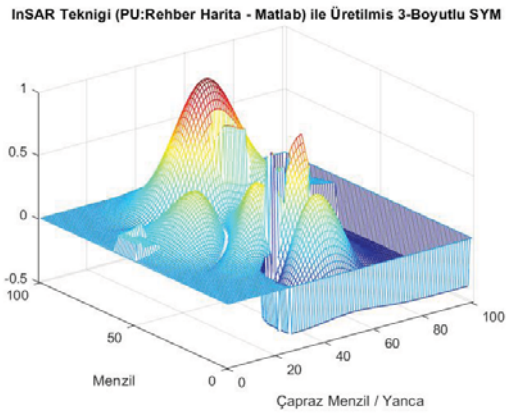
Şekil 5-125: 1B Katlı Fazı Açma Algoritması (Itoh) ile Oluşturulan SYM



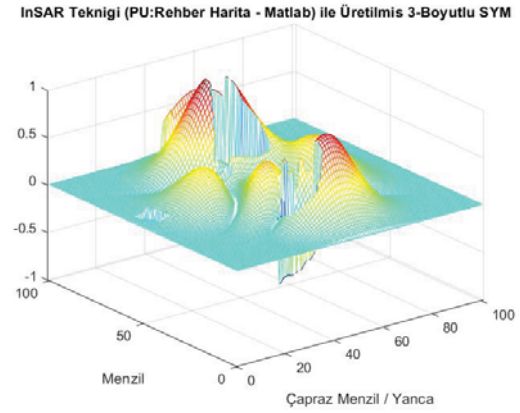
Şekil 5-126: Goldstein Branch Cut (Matlab) Algoritması ile Oluşturulan SYM



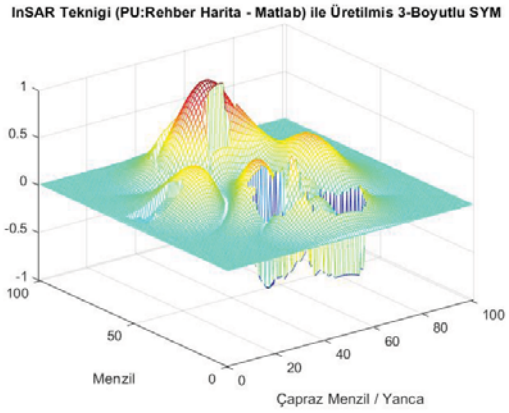
(a)



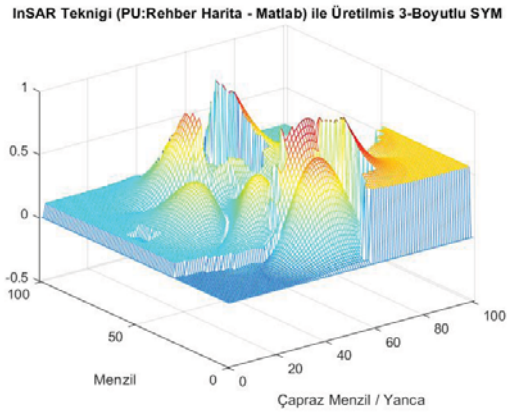
(b)



(c)

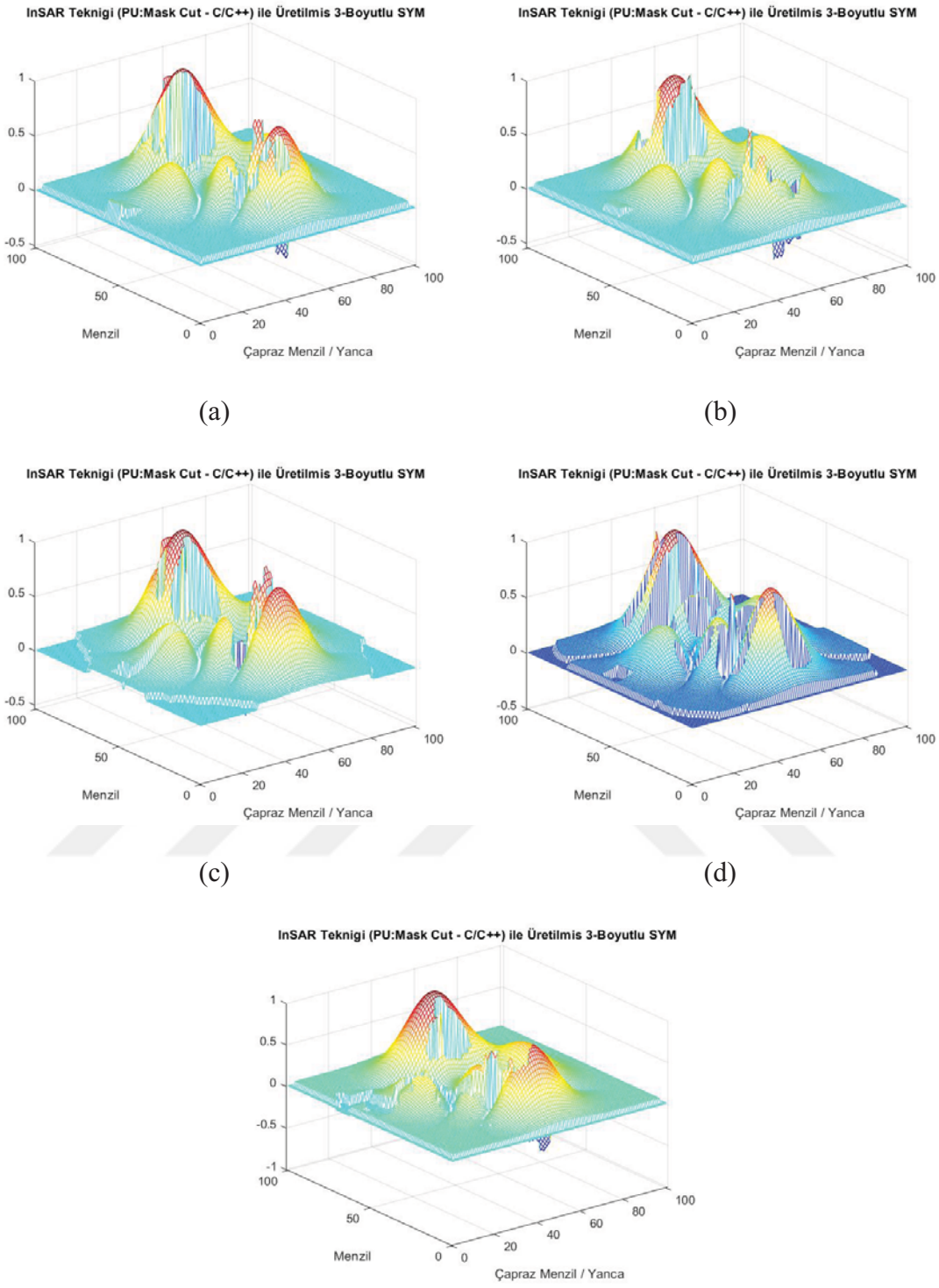


(d)

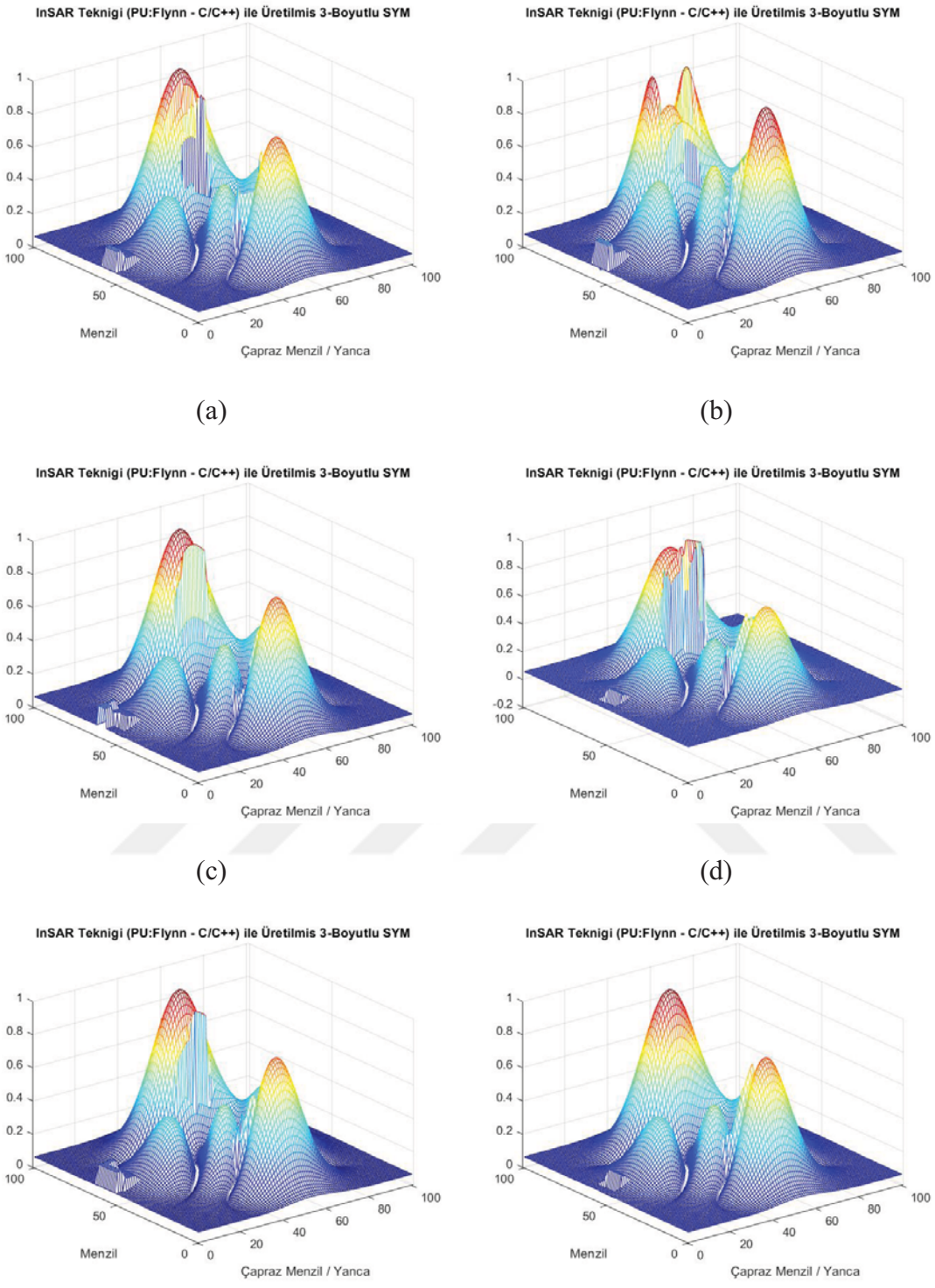


(e)

Şekil 5-127: Kalite Rehberi (Matlab) Algoritması ile Oluşturulan SYM'ler, (a): Korelasyon Haritası ile, (b): Sözde Korelasyon Haritası ile, (c): Faz Türev Varyansı Haritası ile, (d): En Yüksek Faz Türevi Haritası ile, (e): Genlik Değişiklik Tespiti Haritası ile



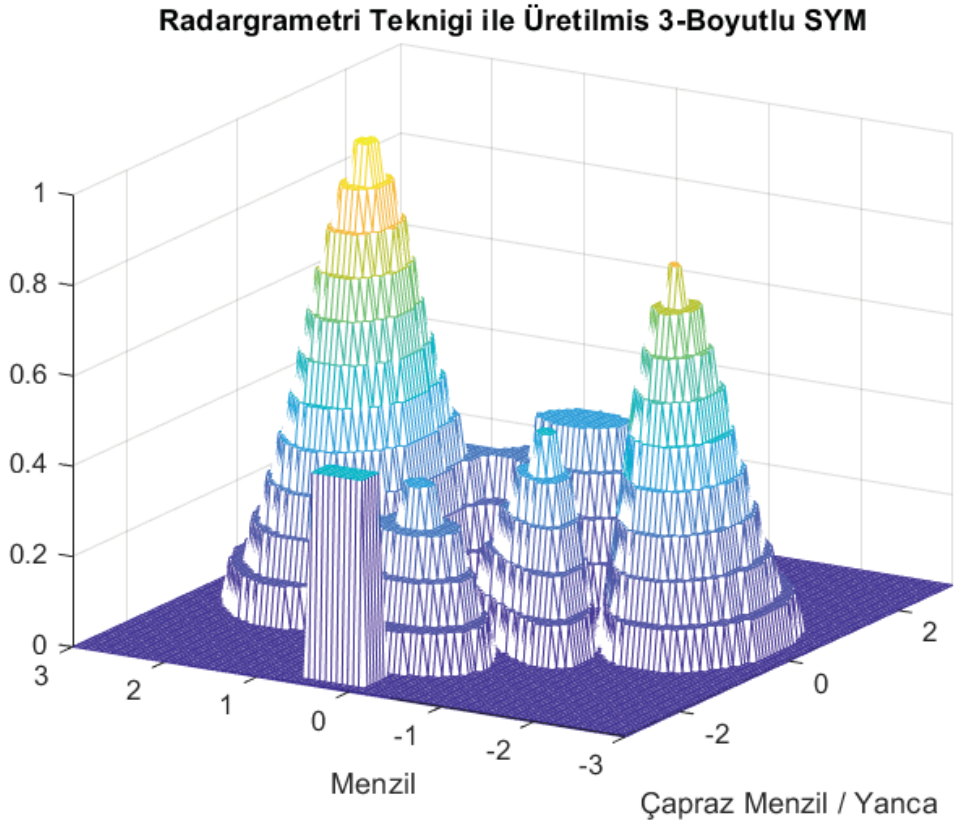
Şekil 5-128: Mask-Cut (C/C++) Algoritması ile Oluşturulan SYM'ler, (a): Korelasyon Haritası ile, (b): Sözde Korelasyon Haritası ile, (c): Faz Türev Varyansı Haritası ile, (d): En Yüksek Faz Türevi Haritası ile, (e): Genlik Değişiklik Tespiti Haritası ile



Şekil 5-129: Flynn (C/C++) Algoritması ile Oluşturulan SYM'ler, (a): Korelasyon Haritası ile, (b): Sözde Korelasyon Haritası ile, (c): Faz Türev Varyansı Haritası ile, (d): En Yüksek Faz Türevi Haritası ile, (e): Genlik Değişiklik Tespiti Haritası ile, (f): Harita Kullanmadan Üretilen SYM

SAR interferometri tekniği kullanılarak SYM'ler oluşturulmuştur. Şekil 5-125'te Itoh tek boyutlu katlı faz açma algoritması kullanılarak üretilen SYM, Şekil 5-126'da Goldstein Branch-cut algoritması kullanılarak üretilen SYM, Şekil 5-127'de Kalite Rehberi algoritması kullanılarak üretilen SYM'ler, Şekil 5-128'de Mask-cut algoritması kullanılarak üretilen SYM'ler, Şekil 5-129'da da Flynn algoritması kullanılarak üretilen SYM'ler bulunmaktadır.

Şekil 5-130'da ise radargrametri tekniği kullanılarak üretilen SYM paylaşılmıştır.



Şekil 5-130: Radargrametri Tekniği ile Oluşturulan SYM

Çizelge 5-15'te tüm katlı faz açma algoritmalarının sonuçları verilmiştir. Aynı algoritmanın C/C++ ve Matlab benzetimlerinden bir tanesi seçilerek hata hesaplamaları yapılmıştır. Rehber harita kullanan katlı faz açma algoritmalarının kullanılan rehber haritalara göre performansları da çizelgede görülmektedir. Flynn katlı faz açma algoritması hem rehber harita kullanarak hem de harita kullanmadan sonuç üretebildiği için 6 farklı sonuç üretmiştir. Radargrametri tekniğinin hata değeri de görülebilmektedir.

Çizelge 5-15: İnterferometri ve Radargrametri Teknikleriyle Üretilen SYM'lerin Hataları

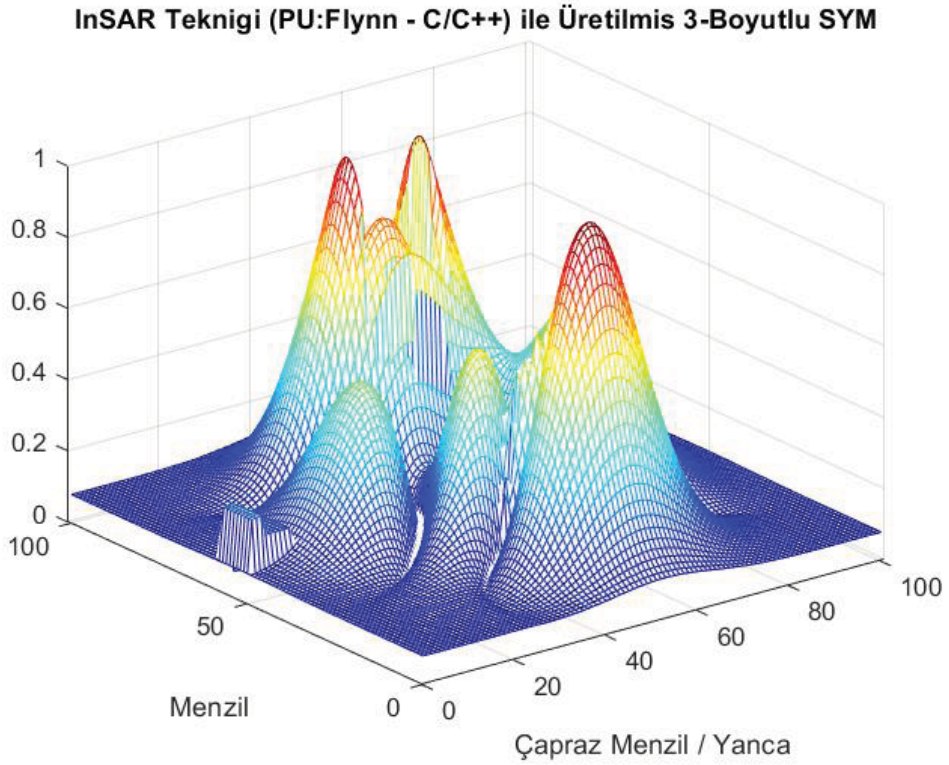
No	Teknik / Şekil	KFA Algoritması	Kullanılan Harita	RMSE
1	InSAR / Şekil 5-125	1B Itoh (Matlab)	-	0.1556
2	InSAR / Şekil 5-126	Goldstein (Matlab)	-	0.0532
3	InSAR / Şekil 5-127 (a)	Kalite Rehberi (Matlab)	Korelasyon	0.3660
4	InSAR / Şekil 5-127 (b)		Sözde Korelasyon	0.2427
5	InSAR / Şekil 5-127 (c)		Faz Türev Varyansı	0.1376
6	InSAR / Şekil 5-127 (d)		En Yüksek Faz Türevi	0.1844
7	InSAR / Şekil 5-127 (e)		Genlik Değişiklik Tespiti	0.2643
8	InSAR / Şekil 5-128 (a)	Mask Cut (C/C++)	Korelasyon	0.1272
9	InSAR / Şekil 5-128 (b)		Sözde Korelasyon	0.1551
10	InSAR / Şekil 5-128 (c)		Faz Türev Varyansı	0.1173
11	InSAR / Şekil 5-128 (d)		En Yüksek Faz Türevi	0.1400
12	InSAR / Şekil 5-128 (e)		Genlik Değişiklik Tespiti	0.1351
13	InSAR / Şekil 5-129 (a)	Flynn (C/C++)	Korelasyon	0.0475
14	InSAR / Şekil 5-129 (b)		Sözde Korelasyon	0.0731
15	InSAR / Şekil 5-129 (c)		Faz Türev Varyansı	0.0377
16	InSAR / Şekil 5-129 (d)		En Yüksek Faz Türevi	0.0710
17	InSAR / Şekil 5-129 (e)		Genlik Değişiklik Tespiti	0.0398
18	InSAR / Şekil 5-129 (e)		-	0.0401
19	Radargrametri / Şekil 5-130	-	-	0.0368

5.4.1. Statik Füzyon

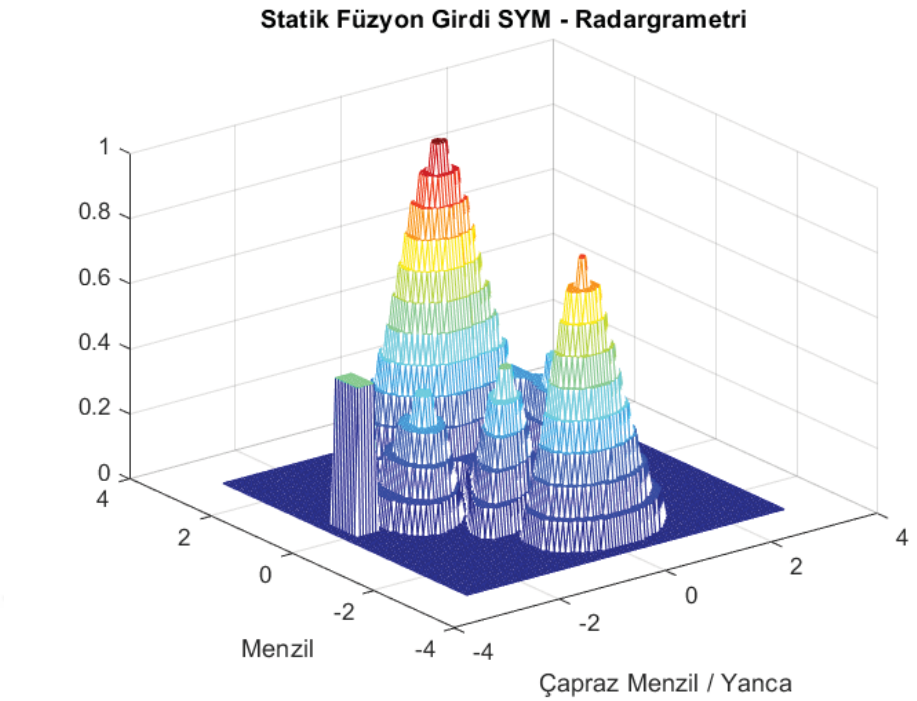
Statik olarak isimlendirdiğimiz füzyon işlemi aslında geleneksel olarak bilinen füzyon işlemidir. Her iki tekniğin çıktılarını belli kurallara göre füzyon işlemine tabi tutarak birleştirip yeni bir SYM elde etme işine statik füzyon denilmiştir.

Benzetim çalışmalarında anlatıldığı gibi üç sensör ile sanal bölgenin görüntülendiği düşünülmüştür. SAR interferometri tekniği için anlatıldığı üzere görüntülenen bölgeden yansıyan sinyallerin sensörlerdeki faz bilgisi kullanılarak düzleştirilmiş interferogram üretilmiş ve algoritma bu adımdan itibaren uygulanmıştır. Radargrametri tekniğinde ise görüntülenen bölgenin sensörlere olan uzaklık bilgisi hesaplanarak tüm noktaların görüntülerde hangi pikselde olacakları hesaplanmış ve homolog piksellerin indisleri arası fark hesaplanarak paralaks değerleri bulunmuş ve eşleştirme adımı sonucu oluşan aykırılık haritası üretilerek algoritma bu adımdan itibaren uygulanmıştır.

Statik füzyon algoritmasına girdi olacak Sayısal Yükseklik Modelleri Şekil 5-131 ve Şekil 5-132'de verilmiştir. Statik füzyon algoritmasına beslemek için SAR interferometri tekniğinin ürettiği SYM'ler içinden Flynn katlı faz açma algoritmasının Sözde Korelasyon haritasını rehber olarak kullanarak oluşturduğu SYM seçilmiştir.



Şekil 5-131: Statik Füzyon Algoritmasına Beslenen SAR İnterferometrik SYM

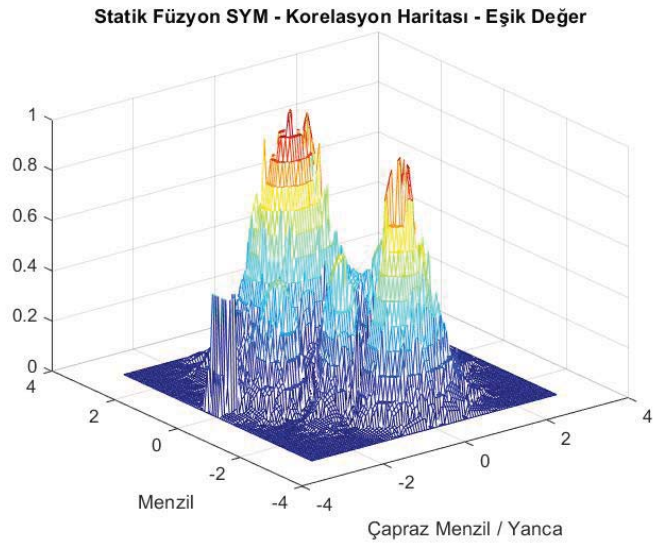


Şekil 5-132: Statik Füzyon Algoritmasına Beslenen Radargrametrik SYM

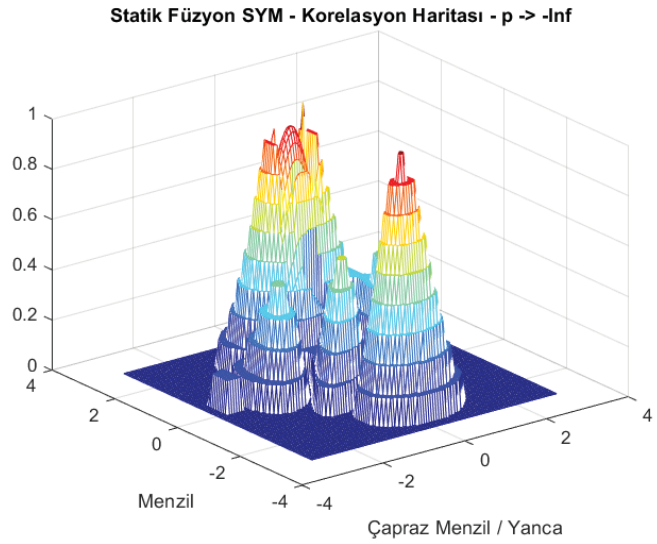
SAR interferometri tekniğinde ani şekilde yüksekliği artan bölgelerde ve buna bağlı olarak sanal bölgedeki en yüksek tepenin tamamında hatalar vardır. Ayrıca binanın olduğu bölgede katlı fazı açma adımında büyük hatalar yapılmıştır. Bu beklenen bir durumdur. Zira ani yükseklik değişimlerinin olduğu bölgelerde katlı faz açma algoritmaları hata yapmakta ve bu hatalar diğer komşu piksellerde de devam etmektedir. Bu sebeple üretilen modelde özellikle bölgesel büyük hatalar bulunmaktadır.

Radargrametri tekniği ile modelin her bölgesinde hata miktarı birbirine yakın olan bir SYM elde edilmiştir. Ancak eşleştirme işlemi öncesi üst örnekleme yapılmadığı için oluşan paralaks değerlerinin de tam sayı olmasından kaynaklı olarak, beklendiği üzere radargrametri tekniği ile üretilen SYM daha kaba bir yükseklik modelidir. Tekniğin teorik arka planı anlatılırken de bahsedildiği üzere radargrametri tekniği ile üretilen SYM'nin hatası modelin tamamına homojen dağılmıştır.

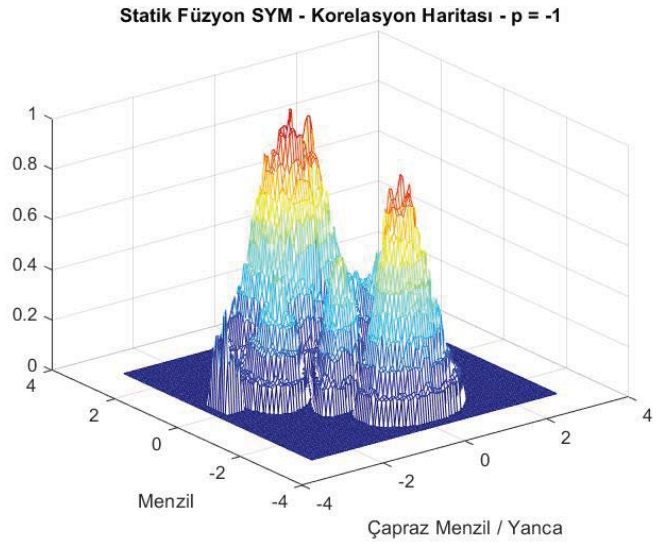
Statik füzyon algoritmalarına girdi olarak verilecek SYM'ler, statik füzyon işlemine tabi tutulurken uygulanacak prosedürler *4.2.2. Statik Füzyon* bölümünde anlatılmıştır. SAR interferometri tekniği içerisinde üretilen beş farklı rehber harita için ilk olarak eşik değer belirlenerek füzyon işlemi yapılmıştır. Eşik değeri olarak da kullanılan haritanın metrik değerlerinin ortalaması seçilmiştir. Ayrıca her harita için Holder ortalamaları ile ağırlıklandırma yapılarak statik füzyon işlemi uygulanmıştır.



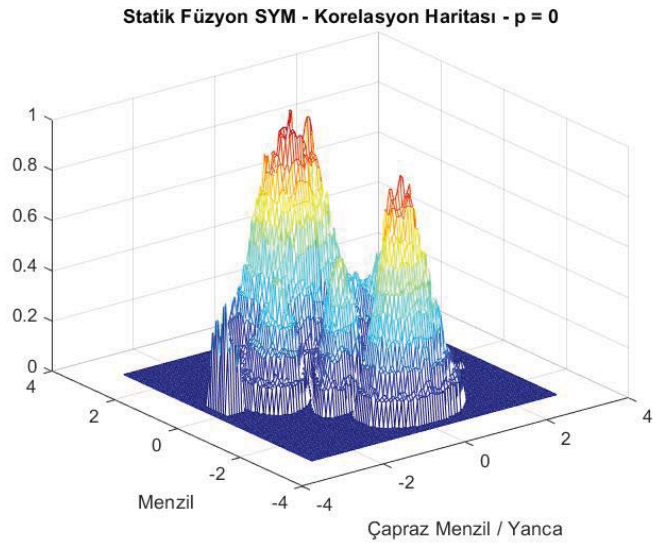
Şekil 5-133: Korelasyon Haritası Kullanarak Statik Füzyon (Eşik Değer)



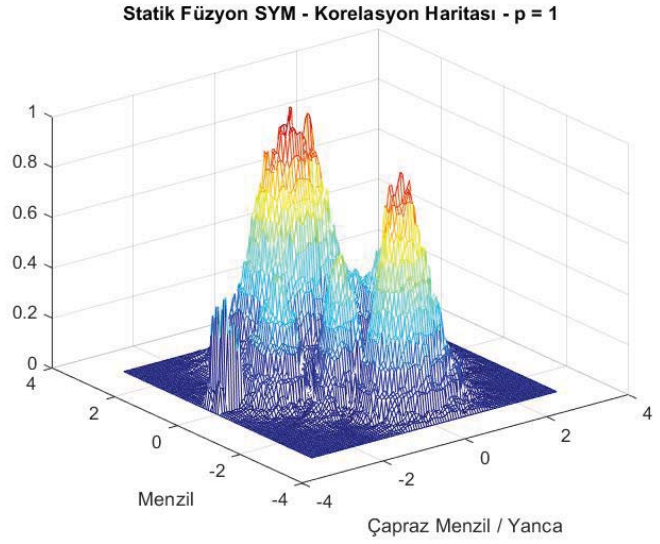
Şekil 5-134: Korelasyon Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p \to -\infty$)



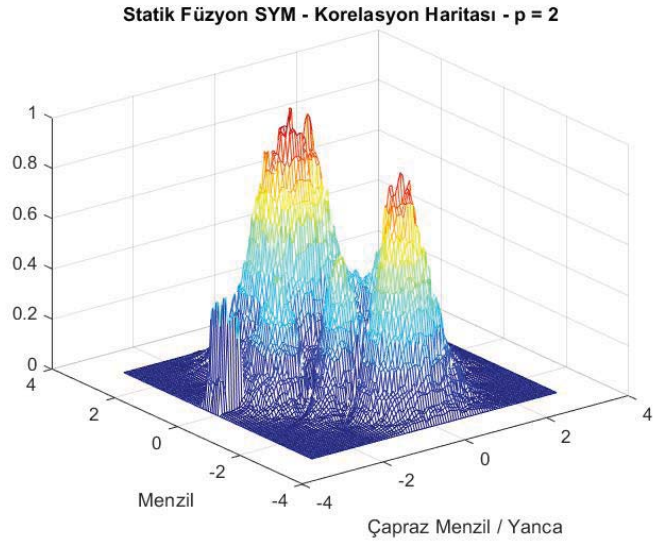
Şekil 5-135: Korelasyon Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = -1$)



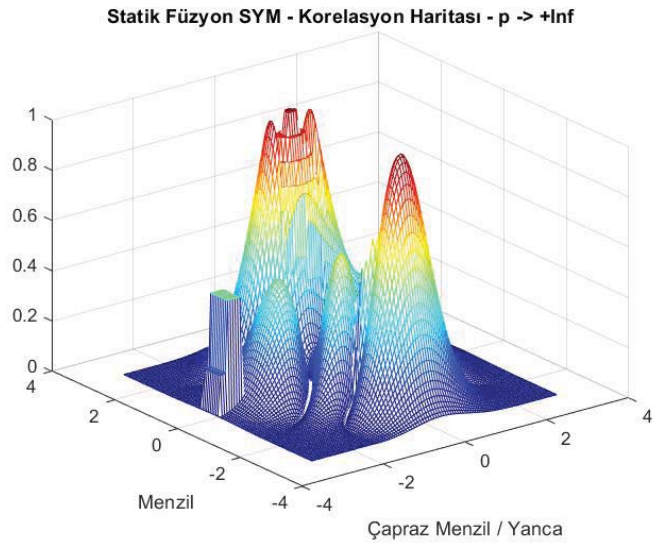
Şekil 5-136: Korelasyon Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 0$)



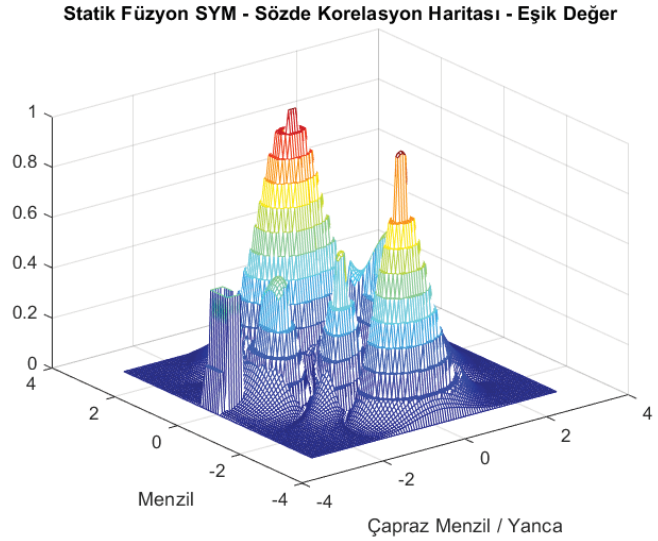
Şekil 5-137: Korelasyon Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 1$)



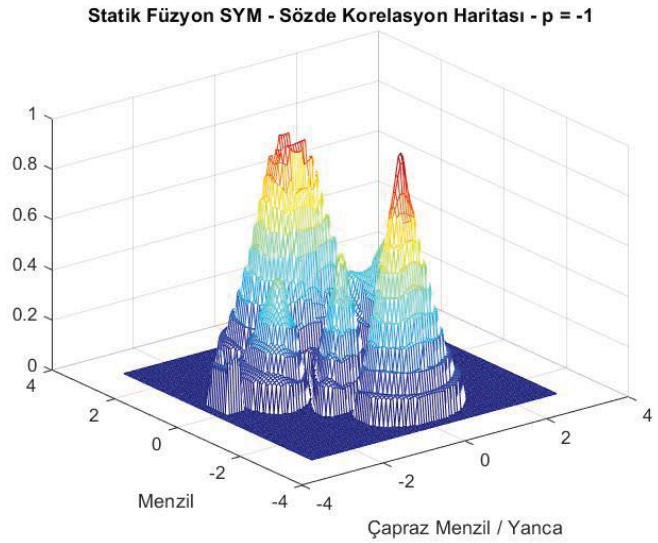
Şekil 5-138: Korelasyon Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 2$)



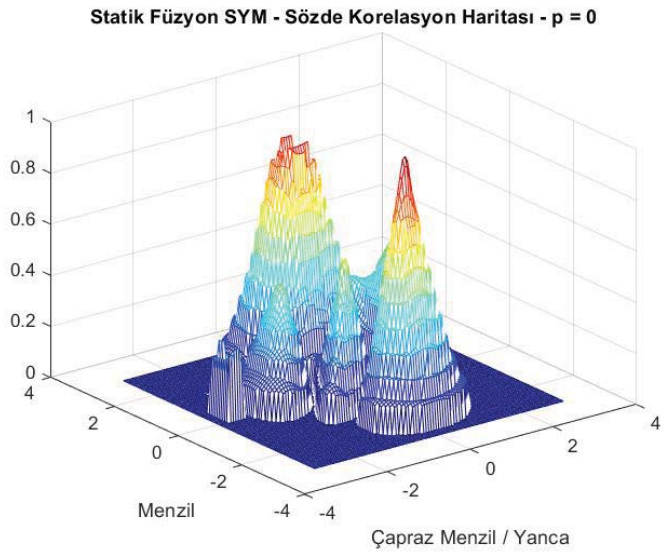
Şekil 5-139: Korelasyon Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p \to +\infty$)



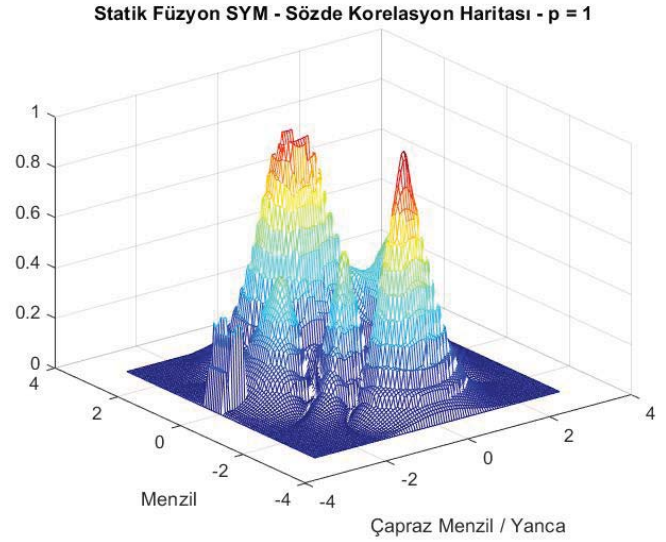
Şekil 5-140: Sözde Korelasyon Haritası Kullanarak Statik Füzyon (Eşik Değer)



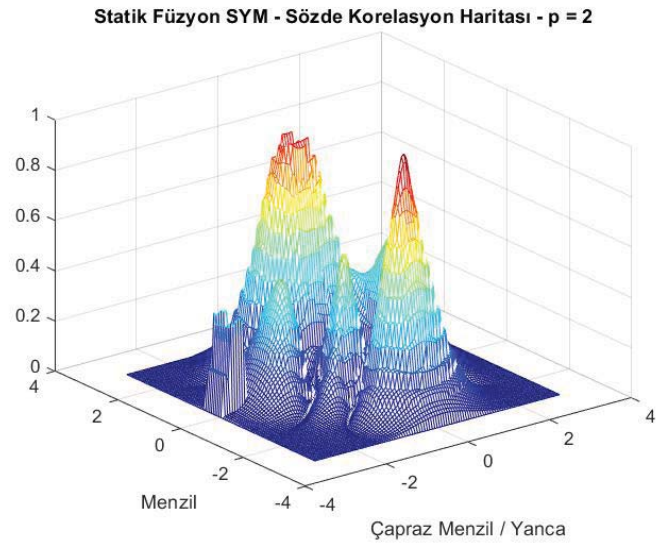
Şekil 5-141: Sözde Korelasyon Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = -1$)



Şekil 5-142: Sözde Korelasyon Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 0$)



Şekil 5-143: Sözde Korelasyon Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 1$)

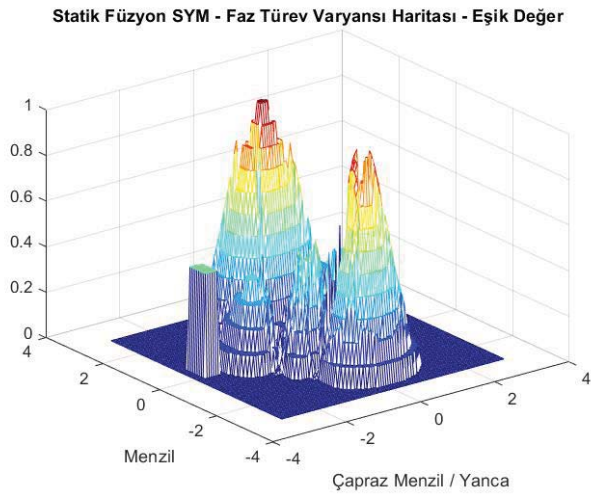


Şekil 5-144: Sözde Korelasyon Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 2$)

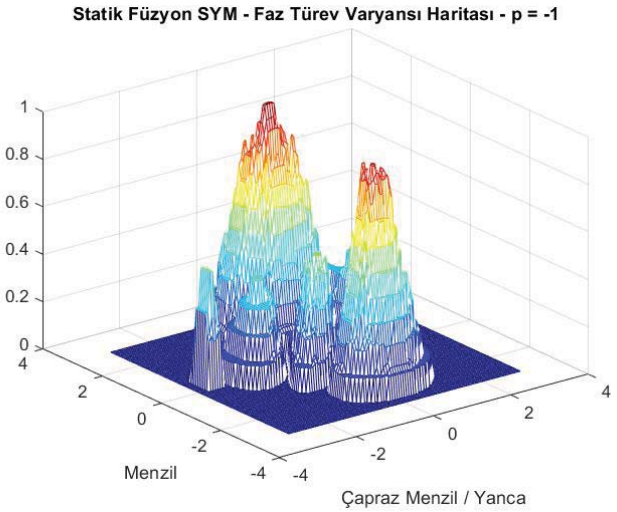
Korelasyon haritası baz alınarak yapılan statik füzyon işlemlerinden Şekil 5-133'te Eşik Değer kullanılarak üretilen SYM paylaşılmıştır. Şekil 5-134, Şekil 5-135, Şekil 5-136, Şekil 5-137, Şekil 5-138 ve Şekil 5-139 ise ağırlıklandırılmış Holder ortalamalarının uygulandığı statik füzyon işlemi sonucu üretilen SYM'lerdir.

Şekil 5-134 ve Şekil 5-139 ağırlıklandırılmış Holder ortalamasında p değerinin eksi ve artı sonsuza gittiği formülasyonlar için üretilen SYM'lerdir. Eşitlik 4.22 ve Eşitlik 4.27 incelenirse p değerinin artı ve eksi sonsuza gittiği durumlarda statik füzyon işlemi ağırlıklandırma katsayısından bağımsız hale gelmektedir. Bu sebeple bu iki SYM diğer haritalar kullanılarak üretildiği durumda da tıptatıp aynı sonucu vereceği için görselleri tez içerisinde tekrar paylaşılmamıştır.

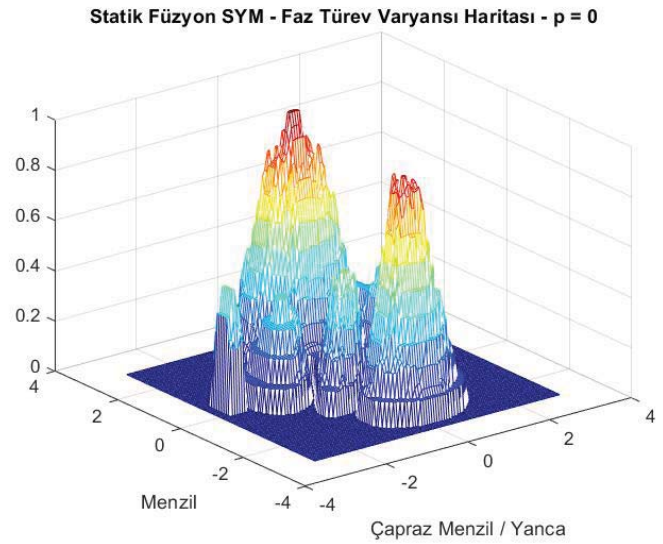
Sözde korelasyon haritası baz alınarak statik füzyon işlemi sonucu üretilen SYM'ler Şekil 5-140, Şekil 5-141, Şekil 5-142, Şekil 5-143 ve Şekil 5-144'te verilmiştir.



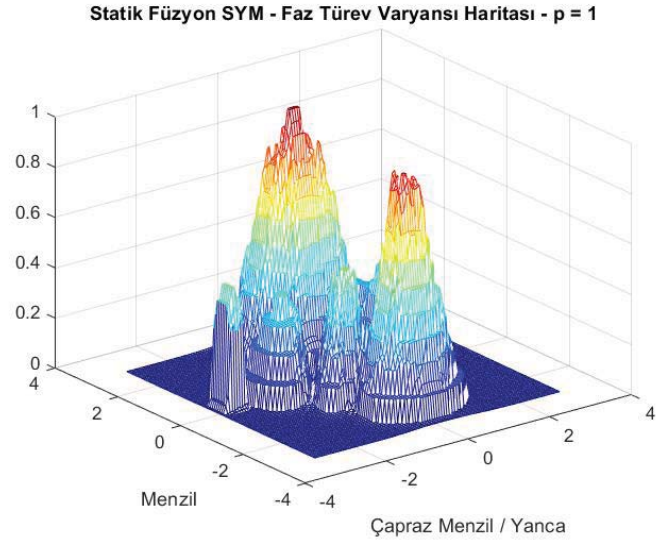
Şekil 5-145: Faz Türev Varyansı Haritası Kullanarak Statik Füzyon (Eşik Değer)



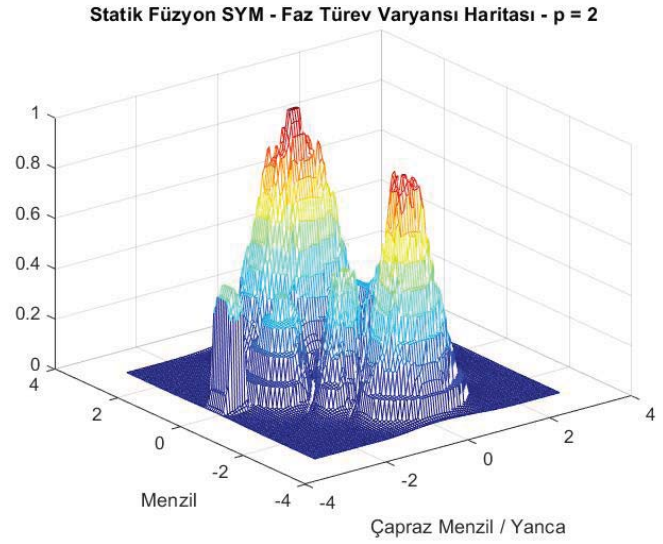
Şekil 5-146: Faz Türev Varyansı Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = -1$)



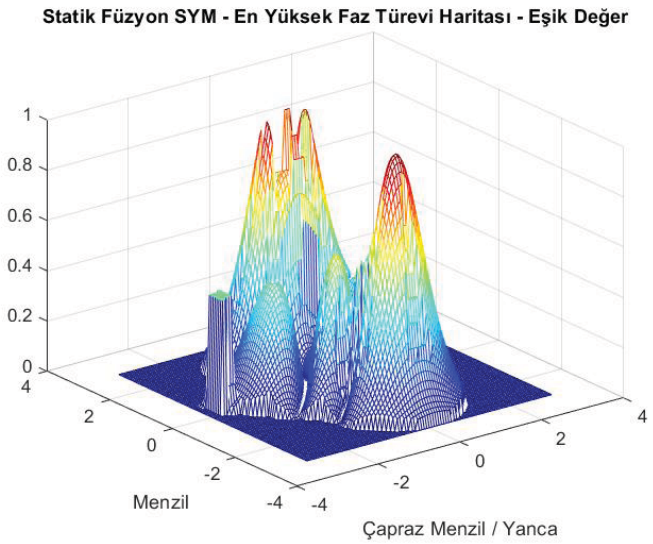
Şekil 5-147: Faz Türev Varyansı Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 0$)



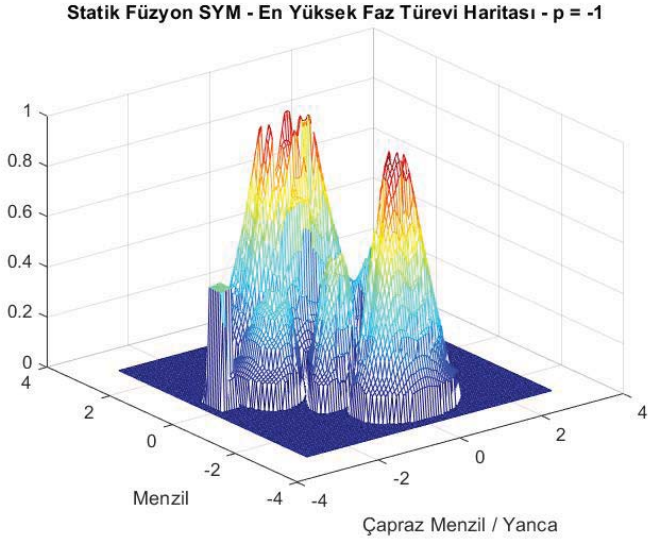
Şekil 5-148: Faz Türev Varyansı Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 1$)



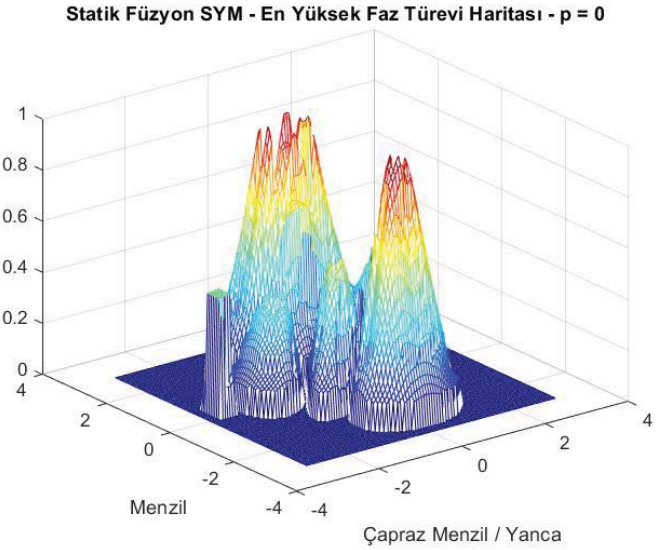
Şekil 5-149: Faz Türev Varyansı Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 2$)



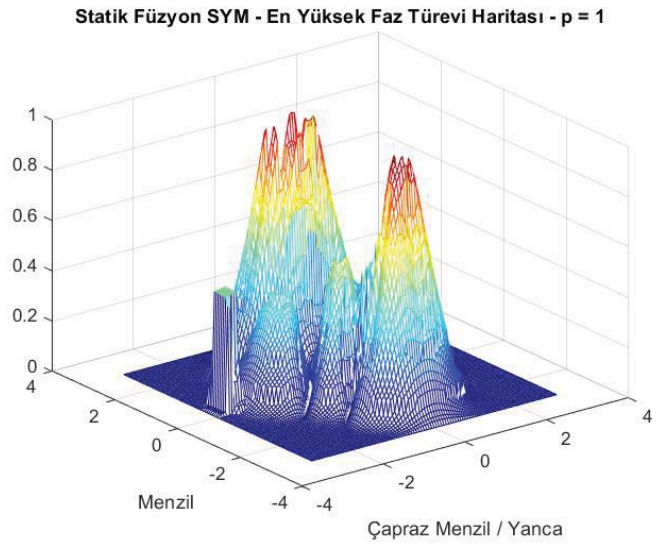
Şekil 5-150: En Yüksek Faz Türevi Haritası Kullanarak Statik Füzyon (Eşik Değer)



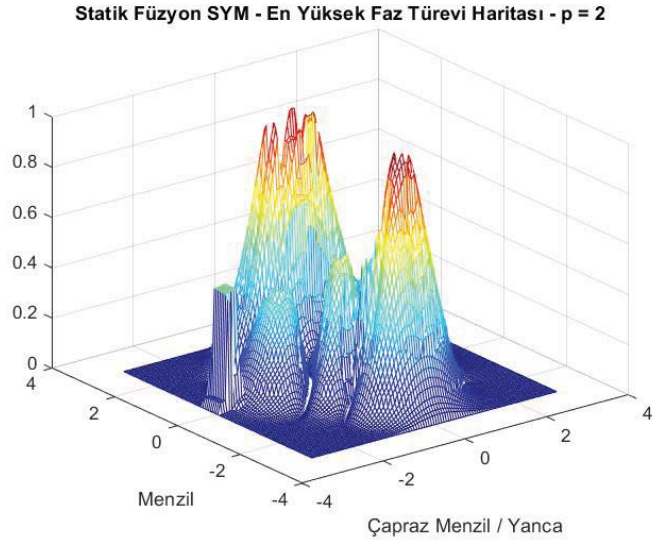
Şekil 5-151: En Yüksek Faz Türevi Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = -1$)



Şekil 5-152: En Yüksek Faz Türevi Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 0$)



Şekil 5-153: En Yüksek Faz Türevi Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 1$)

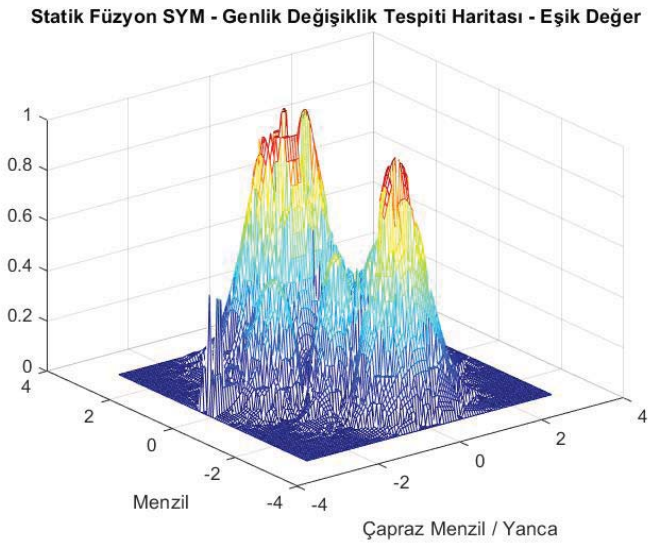


Şekil 5-154: En Yüksek Faz Türevi Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 2$)

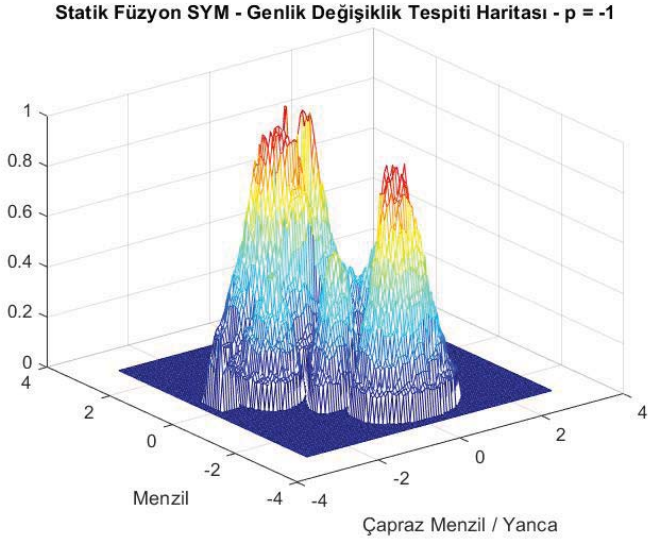
Faz Türev Varyansı Haritası baz alınarak statik füzyon işlemi sonucu üretilen SYM'ler Şekil 5-145, Şekil 5-146, Şekil 5-147, Şekil 5-148 ve Şekil 5-149'da verilmiştir.

En Yüksek Faz Türevi Haritası baz alınarak statik füzyon işlemi sonucu üretilen SYM'ler Şekil 5-150, Şekil 5-151, Şekil 5-152, Şekil 5-153 ve Şekil 5-154'te verilmiştir.

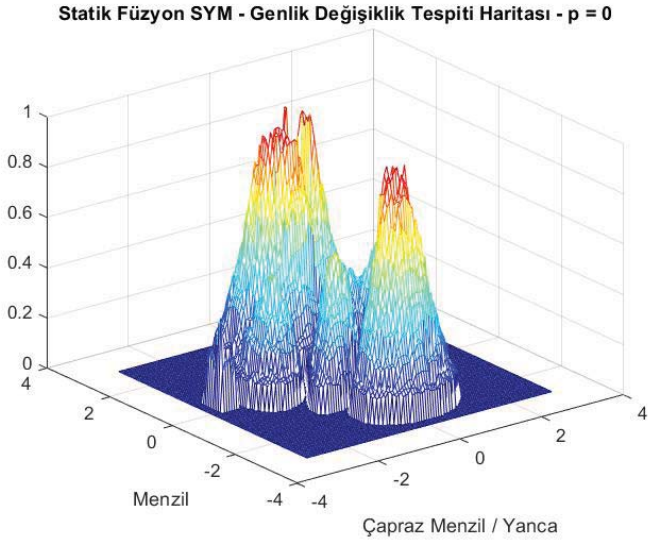
Genlik Değişiklik Tespiti Haritası baz alınarak statik füzyon işlemi sonucu üretilen SYM'ler Şekil 5-155, Şekil 5-156, Şekil 5-157, Şekil 5-158 ve Şekil 5-159'da verilmiştir.



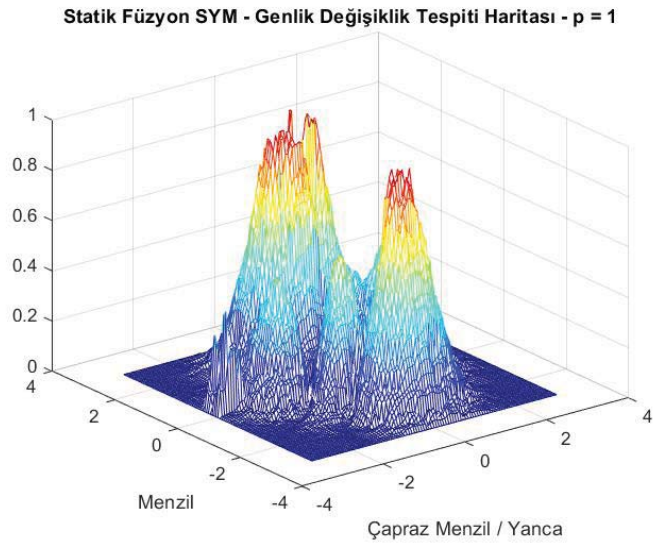
Şekil 5-155: Genlik Değişiklik Tespiti Haritası Kullanarak Statik Füzyon (Eşik Değer)



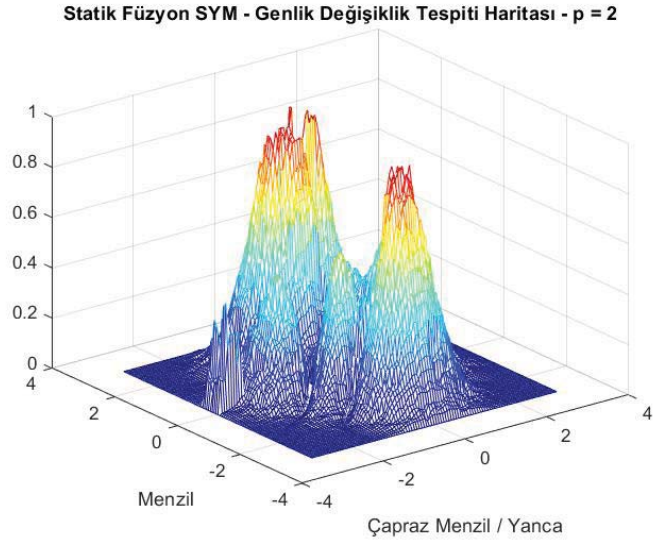
Şekil 5-156: Genlik Değişiklik Tespiti Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = -1$)



Şekil 5-157: Genlik Değişiklik Tespiti Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 0$)



Şekil 5-158: Genlik Değişiklik Tespiti Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 1$)



Şekil 5-159: Genlik Değişiklik Tespiti Haritası Kullanarak Statik Füzyon ($p = 2$)

Hata miktarı (RMSE) hesaplanırken; üretilen ve normalize edilen yükseklik modeli ile görüntülenen bölgenin gerçek değerinin farkı alınır ve her piksel için yapılan hata hesaplanır. Daha sonra ortalama hata kareleri karekökü (RMSE) hesabı ile tüm SYM'de yapılan hata miktarı bulunur.

SAR interferometri tekniği ile üretilen normalize SYM'nin ortalama karekök hatası 0.0731, radargrametri tekniğine ait normalize SYM'nin ise 0.0368'dir. Ancak interferometri tekniğindeki hatanın tamamı katlı fazın hatalı açıldığı binanın olduğu alan ve haritada ani yükselen bölgelerdedir. Bu kısımlar dışında geri kalan kısmın ortalama karesel hatası 0.009'dur.

Çizelge 5-16: Statik Füzyon Haritaları Oluşturma Yöntemleri ve RMSE Değerleri

Harita Tipi	Statik Füzyon	Eşik Değer / p Değeri	RMSE
Korelasyon Haritası	Eşik Değer	0.4166	0.0502
	Holder Ortalama	$p \to -\infty$	0.0525
		$p = -1$	0.0430
		$p = 0$	0.0415
		$p = 1$	0.0350
		$p = 2$	0.0330
		$p \to +\infty$	0.0545
Sözde Korelasyon Haritası	Eşik Değer	0.6706	0.0408
	Holder Ortalama	$p \to -\infty$	0.0525
		$p = -1$	0.0441
		$p = 0$	0.0426
		$p = 1$	0.0352
		$p = 2$	0.0346
		$p \to +\infty$	0.0545
Faz Türev Varyansı Haritası	Eşik Değer	0.4932	0.0449
	Holder Ortalama	$p \to -\infty$	0.0525
		$p = -1$	0.0392
		$p = 0$	0.0377
		$p = 1$	0.0363
		$p = 2$	0.0349
		$p \to +\infty$	0.0545
En Yüksek Faz Türevi Haritası	Eşik Değer	0.3237	0.0654
	Holder Ortalama	$p \to -\infty$	0.0525
		$p = -1$	0.0544
		$p = 0$	0.0547
		$p = 1$	0.0537
		$p = 2$	0.0532
		$p \to +\infty$	0.0545
Genlik Değişiklik Tespiti Haritası	Eşik Değer	0.5030	0.0611
	Holder Ortalama	$p \to -\infty$	0.0525
		$p = -1$	0.0511
		$p = 0$	0.0505
		$p = 1$	0.0464
		$p = 2$	0.0456
		$p \to +\infty$	0.0545

Çizelge 5-17: Statik Füzyon Haritaları Oluşturma Yöntemleri ve RMSE Değerleri

	Korelasyon Haritası	Sözde Korelasyon Haritası	Faz Türev Varyansı Haritası	En Yüksek Faz Türevi Haritası	Genlik Değişiklik Tespiti Haritası
Eşik Değer	0.0502	0.0408	0.0449	0.0654	0.0611
$p \to -\infty$	0.0525	0.0525	0.0525	0.0525	0.0525
$p = -1$	0.0430	0.0441	0.0392	0.0544	0.0511
$p = 0$	0.0415	0.0426	0.0377	0.0547	0.0505
$p = 1$	0.0350	0.0352	0.0363	0.0537	0.0464
$p = 2$	0.0330	0.0346	0.0349	0.0532	0.0456
$p \to +\infty$	0.0545	0.0545	0.0545	0.0545	0.0545

Çizelge 5-17, Çizelge 5-16'nın farklı bir gösterimidir. Statik füzyon yöntemleri arasında kıyas yapabilmeyi kolaylaştırması açısından her iki çizelge de verilmiştir.

Çizelge 5-16 ve Çizelge 5-17 incelendiğinde Statik Füzyon işlemi sonucunda üretilen her SYM'de iyileşme görülmektedir. Sonuçlar birbirine oldukça yakın olsa da en iyi sonuçlar, hata oranına bakıldığında tüm rehber haritalar için Holder Ortalamasında *p=2* iken alınmıştır.

Holder ortalamasında p değeri negatif sonsuza ve pozitif sonsuza giderken harita kalite metriğinden bağımsız olarak tekniklerin çıktısı içerisinden küçük veya büyük değer seçimi yapılmaktadır. Bu sebeple tüm haritalar için p eksi sonsuza giderken füzyon sonucunda aynı hata değeri hesaplanmaktadır. Aynı şekilde p artı sonsuza giderken de tüm haritalar için sonuç aynıdır. Yükseklik bilgisi için herhangi bir kalite metriğine bakmaksızın yüksek veya düşük değeri seçmek doğru bir birleştirme işlemi olmamaktadır. Bu sebeple tez kapsamında analiz edilmiş olsa bile kullanımı önerilmemektedir.

Eşik değer kullanılarak füzyon işlemi yapıldığı durumda ise hata oranları haritadan haritaya oldukça değişkenlik göstermektedir. En iyi sonucun beklendiği üzere sözde korelasyon haritası kullanıldığı durumda alınmıştır. Zira üretilen sentetik verilerde SAR interferometri tekniği için sadece faz bilgisi kullanılmıştır. Sözde korelasyon haritasının da sadece faz bilgisi kullanılarak üretilen bir harita olduğu hatırlanacak olursa, en iyi füzyon sonucunun sözde korelasyon haritası ile alınmış olması süpriz olmayacaktır.

Füzyon sonucu oluşan SYM'ler detaylı olarak incelendiğinde her iki tekniğin de büyük hata yaptığı bölgelerde statik füzyon ile nasıl bir ağırlıklandırılma yapılırsa yapılsın yüksek doğrulukta sonuç almanın mümkün olmadığı net olarak görülecektir. Çünkü ilgili bölge her iki SYM'de de hatalı ise statik füzyon sonucu üretilen SYM'de de hatalı olacaktır. Bu sebeple tez kapsamında statik füzyon algoritmalarına ek olarak farklı bir yaklaşımla teknikleri birleştiren dinamik füzyon yaklaşımı önerilmiştir.

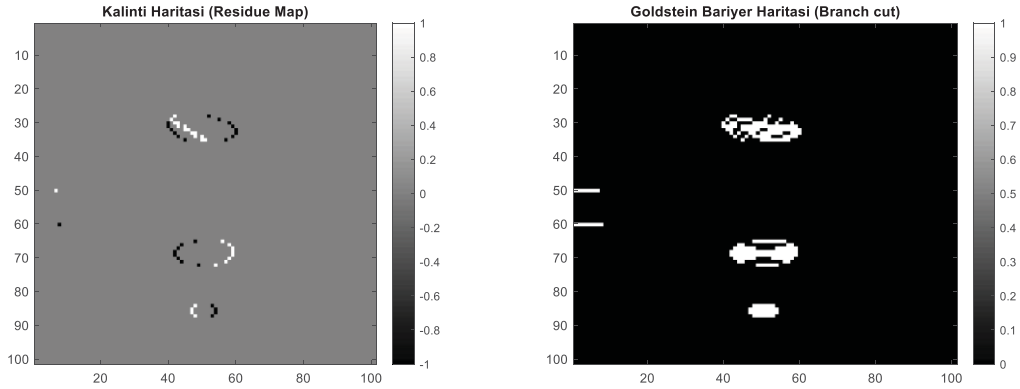
5.4.2. Dinamik Füzyon

Dinamik olarak isimlendirdiğimiz füzyon işlemi özetle, geleneksel olarak bilinen füzyon işleminin aksine çıktıların belli bir kurala göre birleştirilmesi şeklinde olmayıp daha farklı bir yaklaşımla radargrametri tekniğine ait çıktı SYM'nin SAR interferometri tekniğinde referans olarak kullanılarak SAR interferometri tekniğinde daha yüksek doğrulukta bir SYM elde edilmesine dayanmaktadır. Bu işlem için birbirinden farklı birkaç alternatif yaklaşım önerilmiştir. Yaklaşımlarda dinamik füzyon işleminin etkisini gözlemlemek için farklı senaryolarda sentetik veriler üretilmiş ve sonuçlar analiz edilmiştir. Füzyon işlemi için ilk olarak her iki tekniğin ürettikleri SYM'lerin aynı çözünürlükte olmaları sağlanmalıdır. Bu işlem sayesinde düşük çözünürlükte olan Radargrametri tekniğine ait SYM, interpolasyon işlemi ile üst örnekleme yapılarak interferometrik SYM ile aynı çözünürlükte olur. Tekniklere ait SYM'lerin yönelimleri de farklı olabilir. SYM'lerin yönelimlerinin ortaklanması ve çıktı SYM'lerin çakışık olması her iki füzyon işlemi için de hayati öneme sahiptir. Yönelim düzeltildiğinde eş pikseller üst üste gelecektir.

Şekil 5-122'deki parametreler ile üretilen Şekil 5-123'teki sanal bölge için, iki teknikte toplam üç sensör kullanılıp sensörlerden biri ortaklandığı için yönelim farklılığı sorunu en baştan ortadan kaldırılmıştır.

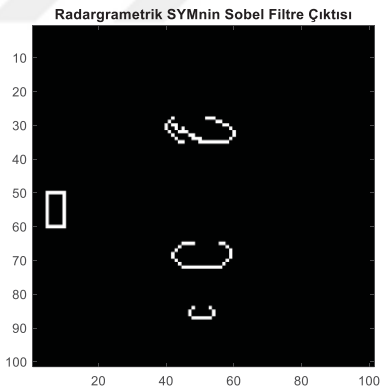
Radargrametri tekniğinin ürettiği Şekil 5-132'deki Sayısal Yükseklik Modeli dinamik füzyon algoritmalarında girdi SYM olarak kullanılmıştır.

Dinamik füzyon algoritmaları ile ilgili algoritmik detaylar *4.2.3 Dinamik Füzyon* bölümünde anlatılmıştır. İlgili bölümde dinamik füzyon algoritması için iki yol önerilmiştir. Bu algoritmalardan ilki *4.2.3.1 Yol İzleme Yaklaşımına Dayalı KFA Yöntemleri için Bariyer Belirleme* bölümünde anlatılmıştır. Yol izleme tabanlı yöntemlerin, katlı fazı açmadan önce bariyer belirleme esnasın yapılacak hataların açılan fazın doğruluğunu doğrudan etkilemesi sebebiyle düzgün bariyer belirlenebilirse katlı faz da doğru açılacaktır tezi ileri sürülmüştür. Daha sonra ileri sürülen tez bir adım daha ileri götürülerek bariyerleri doğru belirleyebilmek için aynı bölgenin düşük çözünürlüklü radargrametrik Sayısal Yükseklik Modeli kullanılabilir denilmiştir. Çözünürlüğü arttırılan ve yönelimi ortaklanan radargrametrik SYM kullanılarak doğru bir bariyer haritası üretebilmek için iki ön adım uygulamak gerekmektedir. Bunlardan ilki ve opsiyonel olanı Radargrametrik SYM'nin belirginleştirilmesidir. Bu adımda belirginleştirme işlemi için *2.3.6 Harita Belirginleştirme* bölümünde anlatılan yöntemler kullanılabilir. Böylelikle SYM üzerindeki özellikli bölgeler daha belirgin hale getirilebilir. Daha sonraki aşamada ise radargrametrik SYM kenar köşe bulma algoritmalarına beslenecek ve ve katlı fazı açarken izledikleSYM üzerindeki ani yükselme ve alçalmaların olduğu pikseller çıkarılacaktır. Çıkarılan bu pikseller aslında Yol İzleme tabanlı katlı faz açma yöntemleri açısından bir çeşit bariyer haritası olacaktır. Önerilen dinamik füzyon algoritmasının sonuçları açısından değerlendirmek için örnek uygulama olarak Goldstein Branch-cut algoritması seçilmiştir. Şekil 5-123'teki sanal bölgenin Goldstein Branch-cut algoritması kullanılarak oluşturulan Sayısal Yükseklik Modeli Şekil 5-126'da verilmiştir. Ayrıca Çizelge 5-15'te iki numaralı sonuçtan hata oranının 0.0532 olduğu görülmektedir. Böylelikle tek başına SAR interferometri algoritması çalıştığı durumda alınacak sonuçlar ve oluşturulacak SYM bilinmektedir.



Şekil 5-160: Goldstein Branch Cut KFA Algoritması Kalıntı ve Bariyer Haritası

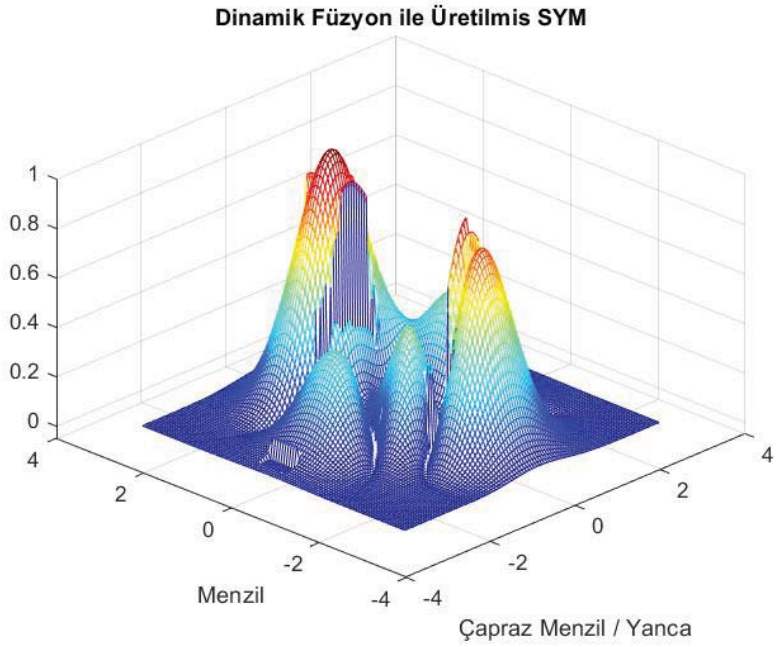
Tekniğin etkisini gözlemlemek adına Şekil 5-126'daki SYM üretilirken oluşturulan Şekil 5-160'daki kalıntı ve bariyer haritasını incelemek önerilen dinamik füzyon algoritmasını kavramak açısından anlamlı olacaktır. Goldstein algoritmasının bilinen en büyük sıkıntısı kalıntıların birleştirilip bariyer (Branch-cut) oluşturulması aşamasında bariyerlerın hatalı oluşturulmasıdır. Şekil 5-160'daki bariyer haritasında da pozitif ve negatif kalıntılar Goldstein algoritmasında kalıntılar, kendine en yakın ters yüklü başka bir kalıntı ile birleşerek nötrlenmek suretiyle bariyerler oluştururlar. Fakat yakında olması her zaman doğru birleşim olduğu anlamına gelmemektedir. Bu durum, Şekil 2-47 üzerinden ilgili bölümde anlatılmıştır. Hatalı oluşturulan bariyerler katlı fazın hatalı açılmasına sebep olmaktadırlar. Bu sebeple SAR interferometri tekniği kullanılarak üretilen SYM'de bölgesel büyük hatalar görülmektedir. Dinamik füzyon algoritmasında Radargrametrik SYM kullanılarak doğru bariyerler oluşturmak amaçlanmaktadır. Dinamik füzyon algoritmasına girdi olan radargrametrik SYM iki boyutlu bir model olarak düşünülerek kenar bulma algoritmalarına beslenmiştir. Kenar bulma algoritması için farklı alternatifler mevcuttur. Tez kapsamında alternatiflerin tamamı denenerek, eldeki verilerde en iyi sonuç vermesi sebebiyle Sobel kenar bulma algoritması seçilmiştir. Kenar bulma algoritmasının çıktısı Şekil 5-161'de verilmiştir.



Şekil 5-161: Radargrametrik SYM'nin Sobel Kenar Bulma Filtesi Çıktısı

Kalın kenarlar olmadığı için morfolojik işlemlere bu örnekte gerek bulunmamaktadır. Bu haliyle bariyer haritası olarak Goldstein Branch-cut algoritmasına beslenmiş ve Şekil 5-162'deki SYM elde edilmiştir. Bariyerler doğru yerlere konulmuş olsa bile halen hatalı bölgeler mevcuttur. Zira bina bölgesi kapalı alan olarak kalmıştır. Bu katlı fazı açma algoritmalarında istenmeyen bir durumdur. Binanın denk geldiği piksellerin dört tarafı da bariyerlerle kapalı olduğu için o bölgede katlı faz açılamamış ve hata yapılmıştır. Ancak yine de ortalama hata kareleri karekök değerinde azalma görülmektedir. Tek başına SAR

interferometri algoritmasında Goldstein Branch cut algoritması kullanılarak oluşturulan Şekil 5-126'daki SYM'nin hata değeri 0.0532 iken, dinamik füzyon ile bariyuer haritası dışarıdan verilerek yine Goldstein algoritması çalıştırılarak üretilen Şekil 5-162'deki SYM'nin hata değeri 0.0454'e inmiştir.

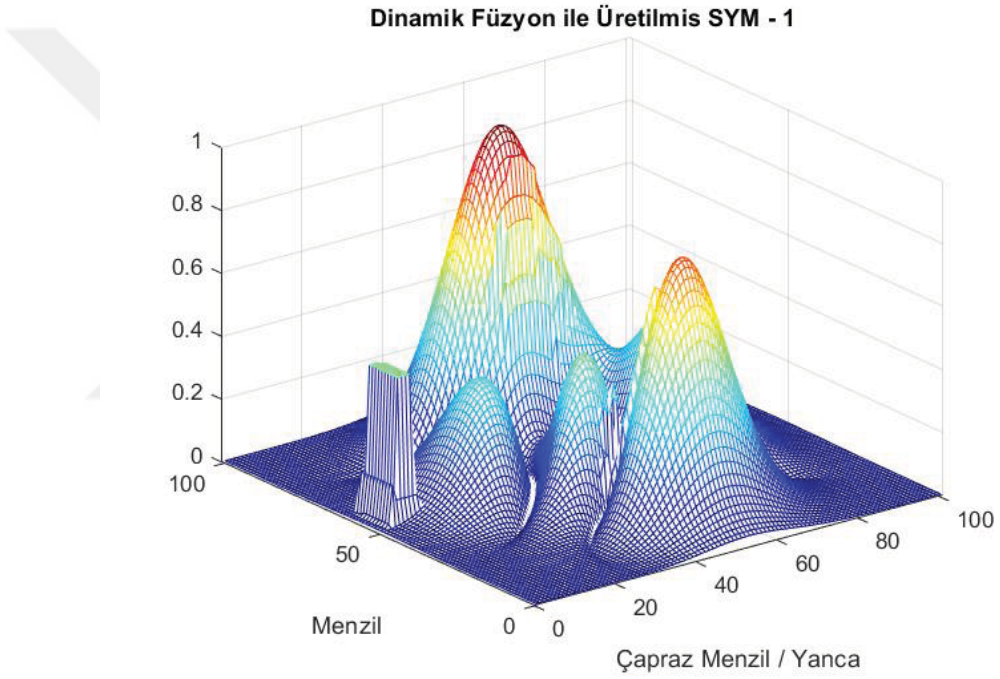


Şekil 5-162: Radargrametrik SYM'nin Bariyer Haritası Olarak Kullanıldığı Dinamik Füzyon

Yol izleme tabanlı katlı faz açma yöntemleri hata yapmaya müsait yöntemler oldukları için düzgün bariyer haritası oluşturulmuş olsa bile rehber haritanın kalitesinden veya kapalı kalan bölgelerden dolayı katlı faz hatalı açılabilmektedir. Bu durumda da Sayısal Yükseklik Modelinde bölgesel hatalar olmaktadır. Tüm bu sebeplerle ikinci bir dinamik füzyon yaklaşımı önerilmiştir.

Dinamik füzyon algoritması için önerilen ikinci seçenek *ise 4.2.3.2 Tüm KFA Yöntemleri için Referans Özelliği* bölümünde anlatılmıştır. Radargrametri tekniğine ait SYM'de hata haritanın tamamına homojen olarak dağılmıştır. SAR interferometri tekniğinin çıktısı olan SYM'de ise hatalar bölgesel ve büyük hatalardır. Ancak SAR İnterferometri tekniği ile üretilen SYM, hataların olmadığı kısımlarda radargrametri çıktısı olan SYM'ye göre Şekil 5-123'teki sanal bölgeye daha fazla benzemektedir. Statik füzyon işleminde her iki bölgenin oransal birleşimi şeklinde yeni bir SYM oluşturulduğu için bütünde hata miktarı azalsa bile piksel piksel bakıldığında hatanın arttığı kısımlar olduğu da görülmektedir. *4.2.3.2. Tüm KFA Yöntemleri için Referans* bölümünde anlatıldığı üzere, Radargrametrik

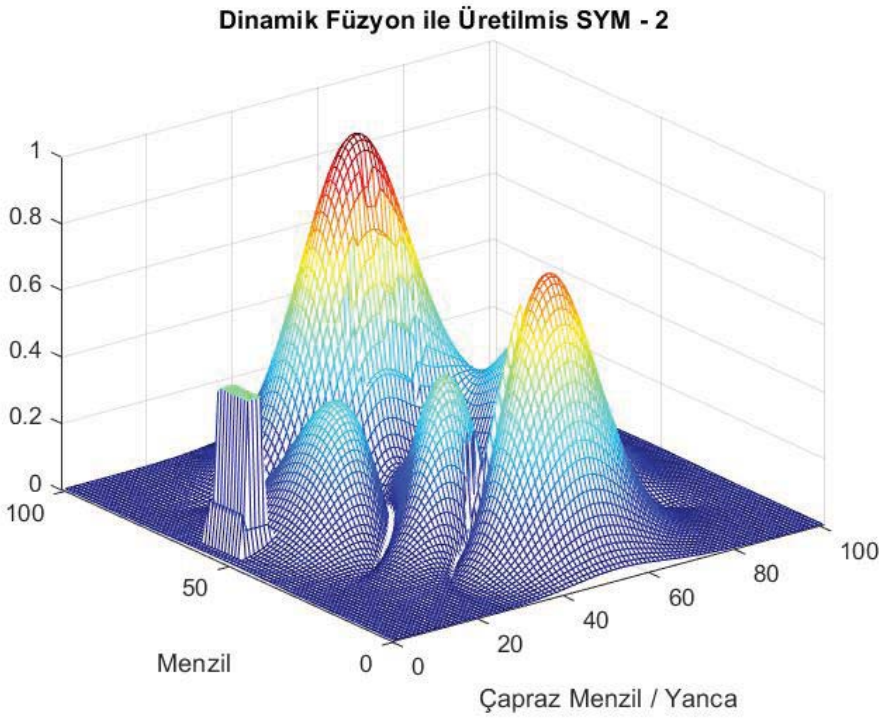
SYM'nin referans olarak kullanılıp SAR interferometrinin bu referansı dikkate alarak SYM üretmesi sağlanmıştır. Bu işlem yapılırken SAR İnterferometri algoritmasında herhangi bir kalıntı haritası çıkarılmamış ve bariyerler üretilmemiştir. Doğrudan bir pikselden başlanarak faz açılmıştır. Faz açıldığında eğer açılan faz değeri Eşitsizlik 4.28'deki aralıkta kalmıyorsa iki seçenek mevcuttur. Bunlardan ilki, ilgili pikselin açılan faz değeri için, Radargrametrik SYM'ye bakarak ilgili piksel merkezde olacak şekilde [3x3]'lük pencere içerisindeki yükseklik değerlerinden en büyük değere denk gelen faz bilgisini atamaktır. Şekil 5-163'teki SYM bu şekilde elde edilmiş dinamik füzyon Sayısal Yükseklik Modelidir. Şekil 5-163'teki SYM için ortalama hata kareleri karekökü değeri 0.0269'dur.



Şekil 5-163: Radargrametrik SYM'nin Referans Olarak Kullanıldığı Dinamik Füzyon 1

Katlı fazı açarken eğer açılan faz değeri Eşitsizlik 4.28'deki aralıkta kalmıyorsa diğer bir seçenek de ilgili aralığa girene kadar açılmış ilk faz değerine iteratif bir şekilde 2π eklemektir. Şekil 5-164'teki SYM bu şekilde elde edilmiş dinamik füzyon Sayısal Yükseklik Modelidir. Şekil 5-164'teki SYM için ortalama hata kareleri karekökü değeri 0.0254'dür.

Şekil 5-163 ve Şekil 5-164 dinamik füzyon işlemi sonucunda elde edilen SYM'lerdir. Bahsedildiği üzere açılmış faz değeri atama işlemi için iki farklı seçenek mevcuttur. Her ikisinde de nihai faz değeri Eşitsizlik 4.28'deki aralık içerisinde kaldığı için çok büyük farkları bulunmamaktadır.



Şekil 5-164: Radargrametrik SYM'nin Referans Olarak Kullanıldığı Dinamik Füzyon 2

Şekil 5-131'de yer alan SAR interferometri tekniği ile üretilmiş normalize SYM'nin ortalama karekök hatası 0.0731, Şekil 5-132'de yer alan radargrametri tekniğine ait normalize SYM'nin ise 0.0368'dir. Dinamik füzyon işlemi sonucunda üretilen Şekil 5-163 ve Şekil 5-164'teki SYM'lerin ortalama hata kareleri karekök değerleri Çizelge 5-18'den görüldüğü üzere 0.0269 ve 0.0254'dür. Dinamik füzyona ait bu hata değerleri, Çizelge 5-15'te tüm katlı faz açma algoritmalarınının kullanıldığı SAR interferometrik SYM'lerin hata değerlerinden ve radargrametrik SYM'nin hata değerinden düşüktür. Ayrıca Çizelge 5-16'da verilen farklı rehber haritaların kullanıldığı, eşik değer atamasıyla ve Holder ortalamaları yöntemiyle yapılan statik füzyon sonucu oluşan çıktı SYM'lerin hata değerlerinin tamamından da düşüktür. Daha başarılı bir füzyon çıktısı elde edildiği görsel olarak da görülmektedir.

Çizelge 5-18: Dinamik Füzyon Sonucu Üretilen SYM'lerin Hataları

No	SYM	Algoritma	Atanan Faz Değeri için Seçilen Yaklaşım	RMSE
1	Şekil 5-162	Yol İzleme Tabanlı KFA Yöntemleri için Bariyer	-	0.0454
2	Şekil 5-163	Tüm KFA Yöntemleri için Referans	Radargrametrideki En Yüksek Değer	0.0269
3	Şekil 5-164	Tüm KFA Yöntemleri için Referans	İteratif	0.0254

5.4.3. Statik Füzyon - Dinamik Füzyon Karşılaştırması

Dinamik füzyon işleminin verdiği katkıyı daha net gözlemlemek adına *5.4 SAR İnterferometri ve Radargrametri Füzyonu* bölümünde önceki bölümlerden farklı olarak aynı sanal bölge için farklı bir senaryoda sentetik veriler üretilmiştir. Şekil 5-123'teki sanal bölge, *5.1.1.4. RADARSAT Uydusu SAR Görüntüleri* bölümünde verilen gerçek görüntülerin parametreleri kullanılarak sentetik olarak görüntülenmiştir. Önceki bölümlerden daha farklı yükseklik ve açılardan görüntülenmiş ve SAR interferometrinin gölge etkisinden bağımsız daha fazla katlı faz açma hatası yapması sağlanmıştır. SAR sensörlerinin üçü de 128 km yüksekliğe çıkarılmış ve baz uzaklık interferometri için 500 metre seçilmiştir. Radargrametri için kullanılan 1 ve 3. Sensörlerin bakış açıları da 45.3º ve 36.8º olarak seçilmiştir. Aslında böylelikle görüntülenen bölge değiştirilmemiş ama teknikler ve füzyon işlemleri sonucu üretilen çıktı SYM'ler ve SYM'lerin ortalama hata kareleri karekök değerleri hesaplanmıştır. Bu işlemler yapılarak radargrametri tekniği ile SAR interferometri tekniğinin farklı katlı faz açma yöntemleri ve farklı rehber haritaları için hesaplanan hata değerleri Çizelge 5-15'te paylaşılmıştır. Statik füzyon algoritmalarının hata değerleri Çizelge 5-16 ve Çizelge 5-17'de verilmiştir. Dinamik füzyon algoritmasının çıktısı olan SYM'lerin hata değerleri de Çizelge 5-18'de bulunmaktadır.

Statik füzyon algoritmasına girdi olarak SAR İnterferometri tekniğinde sözde korelasyon haritasının rehber harita olarak kullanıldığı Flynn katlı faz açma algoritması kullanılarak üretilen SYM (Çizelge 5-15– No:14) ve Radargrametri çıktısı SYM (Çizelge 5-15– No:19) verilmiştir. SAR İnterferometri algoritmasının çıktısı olarak seçilen SYM'nin seçilme kriteri bölgesel olarak büyük hatalar yapılmış olmasıdır ve füzyon algoritmaları ile bu hataların ne oranda giderileceğini görebilmektir. En büyük hatalar, Kalite Rehberi algoritmasında ve Mask-Cut algoritmasında yapılmıştır. Çünkü çok fazla hatalı bariyer oluşturulmuştur. Sebebi ise kullanılan haritanın korelasyon haritası olması ve genlik bilgisinin korelasyon haritasının doğruluğunu bozmasıdır. Statik füzyon algoritmalarından eşik değer seçerek ve ağırlıklandırılmış Holder ortalamalarından p parametresinin 2'ye eşit olduğu durumda yapılan füzyon işleminin sonucu olan SYM başarılı sonuçlar vermektedir. Ancak yine de bölgesel hatalar görülmektedir. Dinamik füzyon işlemi ile elde edilen SYM'ler ise hem Şekil 5-162, Şekil 5-163 ve Şekil 5-164 incelendiğinde hem de Çizelge 5-18'den de görüleceği üzere en yüksek doğrulukta SYM'lerdir. Aslında bu beklenen bir durumdur. Zira dinamik füzyon işlemi ile SAR

interferometri tekniğinin yaptığı hata Radargrametrik SYM kullanılarak hep belli bir seviyede tutulmuştur. Böylelikle katlı faz açılırken yapılacak hatanın büyümesine engel olunmuştur. Ayrıca son dinamik füzyon algoritması ile SAR interferometri tekniğinin en büyük dezavantajı olan insan yapısı bina gibi ani yükseklik artışlarının veya düşüşlerin olduğu bölgelerde hata yapılmasına engel olunmuştur. Böylelikle dinamik füzyon çıktısı SYM'nin ortalama hata kareleri karekök değerinde ciddi azalma sağlamıştır.

6. YORUM ve GELECEK ÇALIŞMALAR

Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) ham verilerinden SAR görüntüsünün oluşturulması ve oluşturulan SAR görüntülerinin farklı teknikler kullanılarak kıymetlendirilmesine dair detaylar anlatılmıştır. Kıymetlendirme tekniklerinden ilki olan SAR interferometri tekniğinin kullanım alanlarından ve farklı uygulamalarından bahsedilmiştir. Tezde genel olarak aynı bölgenin farklı zamanlarda belli baz uzaklıkta alınmış iki farklı Sentetik Açıklıklı Radar görüntüsü kullanılarak SAR interferometri ve radargrametri teknikleri ile ilgili bölgeye ait Sayısal Yükseklik Modellerinin oluşturulması anlatılmıştır. Her iki tekniğin de algoritma adımları ve her adımın teorik arka planı tüm detayları ile açıklanmış ve benzetim ortamında modellenmiştir. Tekniklere ve teknik içerisindeki algoritma adımlarına özgü zorluklar, uygulamaların kullanım alanları ve tekniklerin beraber kullanımına dair detaylar açıklanmıştır.

SAR interferometri tekniği kullanılarak Sayısal Yükseklik Modeli oluşturulması ve Faz Uyumlu Değişiklik Tespiti uygulamaları konusunda literatürde yer alan birçok çalışma incelenmiştir. Her iki teknikte ortak adım olmasından dolayı çakıştırma / hizalama adımı literatürde özellikle detaylı olarak incelenmiştir. Zira bu adımda yapılacak yanlış işlem sonucunda her iki kıymetlendirme uygulamasının çıktısında doğru sonuç almak imkansızdır. Bu sebeple çakıştırma adımının yüksek doğruluk ile tamamlanması gerekmektedir.

SAR interferometri uygulamalarından Faz Uyumlu Değişiklik Tespiti'nin nihai çıktısı olan Korelasyon Haritası üretilmiştir. Ayrıca tez kapsamında hem katlı faz açma adımında rehber olarak kullanmak hem de statik füzyon algoritmalarında kalite metriği olması için Sözde Korelasyon Haritası, Faz Türev Varyansı Haritası, En Yüksek Faz Türevi Haritası ve Genlik Değişiklik Tespiti Haritası da oluşturulmuştur.

SAR interferometri ile SYM oluşturma algoritmasının kalbi niteliğinde olan katlı faz açma adımı da literatürde yoğun olarak incelenmiş ve tez kapsamında yoğun olarak çalışılmıştır. Farklı katlı faz açma algoritmalarının benzetimleri yapılarak süre ve hata kıyaslamaları yapılmıştır. Algoritmaları hızlandırmak için farklı optimizasyon ve paralleştirme işlemleri yapılmış ve bu sayede algoritmalarda ciddi manada hızlanma sağlanmıştır. Katlı faz açma adımında oluşan bölgesel hataları önlemek için aynı bölgeye ait uygun geometride alınmış SAR görüntülerini kullanarak daha düşük çözünürlükte ancak bölgesel hata yapmayan Radargrametri tekniği incelenmiştir.

Radargrametri tekniği için de tüm algoritma akış şeması çıkarılarak, algoritma adımlarının teorik analizleri yapılmış ve benzetim ortamında modellenmiştir. Radargrametri tekniği ile Sayısal Yükseklik Modeli oluşturmanın en kritik adımı olan eşleştirme adımı için farklı algoritmalar incelenmiştir.

Tekniklerin çıktılarını kıyaslayabilmek, katlı faz açma algoritmalarının karşılaştırmalarını kontrollü olarak yapabilmek için sentetik olarak sanal bir bölge oluşturulmuş ve oluşturulan bu veri seti her iki tekniğe de beslenerek Sayısal Yükseklik Modelleri üretilmiştir. SAR interferometri tekniğinde farklı rehber haritalar kullanılarak ve farklı katlı faz açma algoritmaları denenerek alternatif SYM'ler üretilmiştir.

Bu aşamadan sonra her iki tekniğin çıktısı olan SYM'lerin füzyon işlemiyle birleştirilmesi çalışmaları yapılmış ve anlamlı sonuçlar alınmıştır. Üst seviye olarak da düşünülebilecek olan ve çıktıların birleştirilmesi şeklinde tasarlanan Statik Füzyon olarak isimlendirdiğimiz bu işlem neticesinde, üretilen SYM'lerin ortalama hata kareleri karekökü değerlerinde azalma olsa da görüntülenmek istenen bölgenin bazı bölgelerinde hatanın azalmadığı gözlemlenmiştir. Bu durumun tekniklerin çıktısı olan SYM'lerin her ikisinde de aynı bölgelerinde hata olduğu durumda ortaya çıktığı anlaşılmıştır. Bu beklenen bir sonuçtur. Zira ne tür bir algoritma kullanılırsa kullanılsın, nasıl bir ağırlıklandırma yapılırsa yapılsın yüksek hatalı iki bölgeden alınan bilgilerle düşük hatalı bir değer elde etmek mümkün değildir. Bu sebeple füzyon işlemi daha farklı bir şekilde planlanmıştır. Hatanın asıl kaynağı olan katlı faz açma adımında, henüz hata oluşmadan hatanın önlenmesi amacıyla radargrametri tekniğinin çıktısı olan SYM'nin referans olarak kullanılması ve bu sayede katlı fazı açma işlemi sırasında büyük hataların önüne geçilmesi tezi ortaya atılmıştır. Böylelikle Radargrametri çıktısı olan SYM, SAR interferometri algoritmasına girdi olarak beslenmiş ve SAR interferometrinin bölgesel büyük hatalar yapması engellenmiştir. Dinamik füzyonda, füzyon işlemi tekniklerin çıktıları üzerinden yapılmamış, tekniklere ait algoritmalar iç içe geçirilerek çalıştırılmıştır. Daha alt seviye bir füzyon mimarisi tasarlanmıştır.

Katlı faz açma adımında her algoritma dinamik füzyon ile çalıştırılamamaktadır. Bazı katlı faz açma algoritmaları oldukça yavaş çalışmaktadır. Her ne kadar hızlandırılmış olsalar bile bazı paralelleştirilme ihtiyaçları bulunmaktadır. Ayrıca radargrametrideki eşleştirme adımı da benzer şekilde hızlandırılması gereken bir adımdır. Bunun için tez kapsamında bazı katlı faz açma algoritmaları C/C++ dilinde kodlanmış, yavaş çalışan

algoritmalar paralelleştirilmiş ve derleyici optimizasyon ayarları değiştirilerek algoritmalar hızlandırılmıştır.

Çakıştırma / hizalama adımının doğruluğu için korelasyon haritasının yanı sıra sözde korelasyon ve diğer haritalarında ağırlıklandırmalı olarak geri besleme mekanizmasına alınması daha yüksek doğrulukta çakıştırma imkânı sağlayacaktır. Ayrıca sadece öteleme veya kaydırma şeklinde yapılan kaba çakıştırma adımının piksel altı seviyede yapılması da doğruluk yüzdesini arttıracaktır. Bu amaçla çakıştırma algoritmasının doğruluğu hem korelasyon haritası üzerinden hem de diğer rehber haritalar kullanılarak yapılabilecektir.

Hassas çakıştırma adımının teorik altyapısı incelenmiş ancak tez kapsamında kullanılan SAR görüntülerinin özelliklerinden dolayı benzetiminin yapılmasına ihtiyaç duyulmamıştır. Modellemenin yapılıp kullanıcı arayüzüne eklenmesi farklı verilerle de çalışabilme imkânı sağlayacaktır. Gelecek çalışmalar kapsamında planlanmıştır.

Yol izleme metoduna dayalı katlı faz açma algoritmalarının yanında ağ akışı metotları da gelecek çalışmalarda incelenecek ve benzetimleri yapıldıktan sonra karşılaştırmalı analizleri çıkarılacaktır. Ayrıca Entegre Gürültü Filtreleme ve Faz Açma metotları da gelecek çalışmalarda kendine yer bulacaktır. Katlı faz açma yöntemlerinin SAR interferometri tekniği dışında farklı alanlarda kullanılması da gelecek çalışmalar için umut vadetmektedir. Farklı özellikte ve nitelikte sentetik bölgeler oluşturularak algoritmaların bölge tiplerine göre kullanım kıyaslanmalarının yapılması da gelecek çalışmalar kapsamında değerlendirilmektedir.

Çıkarılan Sayısal Yükseklik Modelinin coğrafi konumlandırması tez kapsamında incelenmemiştir. Bu işlemi kolaylıkla yapabilen hazır araçlar bulunmaktadır. Ancak ilerleyen çalışmalarda kullanıcı arayüzünden otomatik yapılması planlanmaktadır.

Görüntülerde yer alan gölge alanların anlamlı öznitelikler olarak kullanılabileceği ve bu bölgelerdeki bilginin referans olarak katma değer yaratabileceği de düşünülmektedir. Gelecek çalışmalarda zaman ayrılması gereken bir konu olarak değerlendirilmektedir.

Statik füzyon ile birleştirilen ve dinamik füzyon ile algoritmik olarak birleştirilip yüksek kalitede üretilen yeni SYM'ler gibi farklı füzyon alternatifleri ilerleyen çalışmalarda denenecektir. Bu anlamda hem SAR interferometrinin diğer uygulamaları hem de radargrametri gibi farklı teknikler ile füzyon işleminin uygulanabilmesinin önü de açılmış olacaktır.

Dinamik füzyon algoritmasının SAR interferometri çıktısının radargrametri yöntemine beslenmesini sağlayacak şekilde testen çalıştırılması da gelecek çalışmalar kapsamında değerlendirilmektedir. SAR interferometri çıktısı olan SYM kullanılıp radargrametri tekniğinindeki eşleştirme adımının hassasiyeti arttırılarak radargrametri tekniği ile daha yüksek çözünürlükte SYM üretilmesinin sağlanabileceği düşünülmektedir. Bu sayede iki farklı dinamik füzyon yaklaşımı oluşacak ve kendi aralarında kıyaslamaları yapılabilecektir.

7. KAYNAKLAR

[1] Li, Z., Coregistration of Image Pairs, DEM Refinement and Evaluation for SAR Interferometry, Ph.D. Dissertation, Purdue University, **2007.**

[2] Onat, E., Özkazanç, Y., Topographic Map Generation Using Synthetic Aperture Radar Images Via Interferometry (InSAR) Technique, IEEE SIU **2020.**

[3] Curlander, J. C., McDonough, R.N., Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing, John Wiley & Sons, **1991.**

[4] Onat, E., Muharip Uçaklarda Kullanılan Radar Görüntüleme Yöntemlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2014.**

[5] Richards, M. A., A Beginner's Guide to Interferometric SAR Concepts and Signal Processing, IEEE A&E Systems Magazine Vol. 22, No. 9, September **2007.**

[6] Hanssen, R. F., Radar Interferometry Data Interpretation and Error Analysis, Kluwer Academic Publishers, Volume 2, Remote Sensing And Digital Image Processing, **2001.**

[7] Leberl, F., Radargrammetric Image Processing, Artech House, **1990.**

[8] Crosetto, M., Aragues, F.P., Radargrammetry and SAR Interferometry for DEM Generation: Validation and Data Fusion, Proceedings of the CEOS SAR Workshop, Toulouse, 26-29 October 1999, ESA SP-450, March **2000.**

[9] Rogers, A. E. E., Ingalls, R. P., Venus: Maping the Surface Reflectivity by Radar Interferometry, Science, 165(3895), 797-799, **1969.**

[10] Graham, L. C., Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping, Proceedings of the IEEE, 62(6), 763-768, **1974.**

[11] Zebker, H. A., Goldstein, R. M., Topographic Mapping from Interferometry Synthetic Aperture Radar Observation, Journal of Geophysical Research, vol 91, pp. 4993-4999, **1986.**

[12] Goldstein, R. M., Zebker, H. A., Werner, C. L., Satellite Radar Interferometry: Two-Dimensional Phase Unwrapping, Radio Science, Volume 23, Number 4 Pages 713-720, July- August **1988.**

[13] Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., Zebker, H. A., Werner, C. L., Mapping small evaluation changes over large areas Differential Radar Interferometry, Journal of Geophysical Research, 94(B7), 9183-9191, **1989.**

[14] Duchossois, G., Martin, P., ERS-1 and ERS-2 Tandem Operations, ESA Bulletin, vol 83, pp. 54-60, **1995.**

[15] Rabus, B., Eineder, M., Roth, A., Bamler, R., The Shuttler Radar Topography Mission: A New Class of Digital Elevation Models Acquired by Spaceborne Radar, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 57(4), 241262, **2003.**

[16] Zhou, C., Liao, M., Application of SAR Interferometry on DEM Generation of the Grove Mountains, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 70(10), **2004.**

[17] Rufino, G., Moccia, A., Esposito, S., DEM generation by means of ERS tandem data, Proceedings of the Fringe '96 Workshop ERS SAR, Zurich, Switzerland, **1996.**

[18] Wang, C., Zahng, H., Shan, X., Ma, J., Liu, Z., Chen, S., Applying SAR Interferometry for Ground Deformation Detection in China, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 70(10), **2004.**

[19] Ye, X., Kaufmann, H., Guo, X. F., Landslide Monitoring in the Three Gorges Area Using DINSAR and Corner Reflectors, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 70(10), 1167–1172, **2004.**

[20] Ding, X. L., Liu, G. X., Li, Z. W., Li, Z. L., Chen, Y. Q., Ground Subsidence Monitoring in Hong Kong with Satellite SAR Interferometry, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 70(10), 1151–1156, **2004.**

[21] Eldhuset, K., Andersen, P. H., Hauge, S., Isaksson, E., Weydahl, D. J., ERS tandem InSAR processing for DEM generation, glacier motion estimation and coherence analysis on Svalbard, International Journal of Remote Sensing, 24(7), 1415, **2003.**

[22] Weydahl, D. J., Analysis of ERS Tandem SAR coherence from glaciers, valleys, and fjord ice on Svalbard, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 39(9), 20292039, **2001.**

[23] Lu, Z., Kwoun, O., Rykhus, R., Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR): Its Past, Present and Future, Photogrammetric Engineering And Remote Sensing, 73(3), **2007.**

[24] Lu, Z., Fielding, E., Patrick, M. R., Trautwein, C. M., Estimating lava volume by precision combination of multiple baseline spaceborne and airborne interferometric synthetic aperture radar: the 1997 eruption of Okmok volcano, Alaska, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 41(6), 14281436, **2003.**

[25] Siegmund, R., Mingquan, B., Lehner, S., Mayerle, R., First demonstration of surface currents imaged by hybrid alongand crosstrack interferometric SAR, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 42(3), 511519, **2004.**

[26] Askne, J., Hagberg, J. O., Potential of interferometric SAR for classification of land surfaces, Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '93. Better Understanding of Earth Environment., International, **1993.**

[27] Crandall, C. J., Radar Mapping in Panama, Photogrammetry Engineering, Vol 35, **1969.**

[28] Philips, R. J., *et al*. Apollo Lunar Sounder Experiment, Apollo 17 Preliminary Science Report, NASA Special Publ. SP-330, Washington DC, **1973.**

[29] Teleki, P., Ramsier , R., The Seasat – A Synthetic Aperture Radar Experiment, Proc. Int. Symp. Comm. VII, Int. Soc. Photogramm., Univ. of Freiburg, pp.91-114. **1978.**

[30] Mercer, B., Button, P., Millot, H., Karspeck, M., Leberl, F., Topographic Mapping from GPS-Supplemented Airborne Radar, pres. Paper, IGARSS, Vancouver **1989.**

[31] Lazarov, A. D., InSAR Geometry and Basic Operations, International Conference, **2010.**

[32] Sefercik, U. G., Dana, I., Crucial Points of Interferometric Processing for DEM Generation using High Resolution, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-4/W19, **2011.**

[33] Li, Z., Bethel, J., Image Coregistration in SAR Interferometry, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII, **2008.**

[34] Hanssen, R. F., Radar Interferometry Data Interpretation and Error Analysis, Kluwer Academic Publishers, Volume 2, Remote Sensing And Digital Image Processing, **2001.**

[35] Hein, A., Processing of SAR Data Fundamentals, Signal Processing, Interferometry, Springer, Signals and Communication Technology, **2004.**

[36] Madsen, D. D., Multi-Aperture Coherent Change Detection and Interferometry for Synthetic Aperture Radar, Master Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Brigham Young University, **2010.**

[37] Jakowatz, C. V. Jr., Wahl, D. E., Eichel, P. H., Ghiglia, D. C., Thompson, P. A., Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach, Kluwer Academic Publishers, **1996.**

[38] Singh, L. P., Application of SAR Interferometry in Landslide studies with Special Reference to Generation of Input Data for Statistical Susceptibility Assessment, Master Thesis, International Institute for Geo-Inforrmation Science and Earth Observation, **2003.**

[39] Preiss, M., Detecting Scene Changes Using Synthetic Aperture Radar Interferometry, Ph.D. Dissertation, The University of Adelaide, Australia, **2004.**

[40] Preiss, M., Stacy, N. J. S., Coherent Change Detection: Theorotical Description and Experimental Results, Australian Government Department of Defence, Defence Science and Technology Organizastion, DSTO-TR-1851, **2006.**

[41] Lee, H., Interferometric SAR Coherence Imagery for Land Surface Change Detection, Ph.D. Dissertation, University of London, **2001.**

[42] Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F., Massonnet, D., InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation, European Space Agency, **2007.**

[43] Yu, H., Lan, Y., Yuan, Z., Xu, J., Lee, H., Phase Unwrapping in InSAR, IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, March **2019.**

[44] Ghiglia, D. C., Pritt, M. D., Two Dimensional Phase Unwrapping Theory, Algorithms and Software, John Wiley, **1998.**

[45] Pritt, M. D., Comparison of Path-Following and Least-Squares Phase Unwrapping Algorithms, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, IGAARSS Singapore, **1997.**

[46] Ghiglia, D. C., Romero, L. A., Robust Two Dimensional Weighted and Unweighted Phase Unwrapping that Uses Fast Transforms and Iterative Methods, Optical Society of America, Vol. 11, No. 1, **1994.**

[47] Goldstein, R. M., Lu, Y., Phase Unwrapping Algorithms for Radar Interferometry: Residue-Cut, Least-Squares and Synthesis Algorithms, Journal of Optical Society of America, Volume 15, No 3 Pages 586-598, March **1998.**

[48] Goldstein, R. M., Werner, C. L., Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications, Geophysical Research Letters, Volume 25, Issue 21, **1998.**

[49] Qing, X., Guowang, J., Caiying, Z., Zhengde, W., Yu, H., Peizhang, Y., The Filtering and Phase Unwrapping of İnterferogram, XXth ISPRS Congress Technical Commission II, **2004.**

[50] Zebker, H. A., Lu, Y., Phase Unwrapping Algorithms for radar interferometry: Residue-Cut, Least-Squares, and Synthesis Algorithms, Journal of Optical Society of America, Vol. 15, No.3, March **1998.**

[51] Constantinini, M., A Novel Phase Unwrapping Methos Based on Network Programming, IEEE Transactions on Geosicence and Remote Sensing, Vol. 36, No. 3, May **1998.**

[52] Chen, C. W., Zebker, H. A., Network Approaches to Two-Dimensional Phase Unwrapping: Intractability and Two New Algorithms, Journal of Optical Society of America, Vol. 17, No.3, March **2000.**

[53] Chen, C. W., Statistical-Cost Network-Flow Approaches to Two-Dimensional Phase Unwrapping for Radar Interferometry, Ph.D. Dissertation, Stanford University, **2001.**

[54] Soni, N., Phase Unwrapping Algorithm Using Edge Detection and Statistical Cost Functions, M.Sc. Geomatic Thesis, TU Delft University of Technology, August **2012.**

[55] Fullerton, J. K., Leberl, F., Marque, R. E., Opposite-Side SAR Image Processing for Stereo Viewing, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 52, No. 9, pp. 1487-1498, September **1986**.

[56] Fayard, F., Meric, S., Pottier, E., Generation of DEM by Radargrammetric Techniques, IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), August **2010.**

[57] Fayard, F., Meric, S., Pottier, E., Matching Stereoscopic SAR Images for Radargrammetric Applications, IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), August **2007.**

[58] Fayard, F., Meric, S., Pottier, E., Geoscience and Remote Sensing, Chapter 20: Radargrammetric SAR Image Processing, pp.421-454, In-Tech, **2009.**

[59] Lu, K. Y., Kiang, J. F., Terrain Height Estimation Using a Stereo-SAR Techniqu Aided by a Reference Point, Progress in Electromagnetic Research M, Vol. 31, 1-11, May **2013.**

[60] Chen, P. H., Dowman, I. J., A Rigorous Stereo Method for DEM Generation from RADARSAT Data, RADARSAT ADRO Final Symposium, Montreal, **1998.**

[61] Chen, P. H., Dowman, I. J., SAR Image Geocoding Using Stereo-SAR DEM and Automatically Generated GCPs, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, Part B1, Amsterdam **2000.**

[62] Chen, P. H., Extraction of Spatial Information from Stereoscopic SAR Images, Ph.D. Dissertation, University of London, **2000.**

[63] Maitre, H., Processing of Synthetic Aperture Radar Images - Chapter 10: Radargrammmetry, Digital Signal and Image Processing Series, John Wiley, **2001.**

[64] Capaldo, P., Fratarcangeli, F., Nascetti, A., Pieralice, F., Porfiri, M., Crespi, M., Land Applications of Radar Remote Sensing – Chapter 6 : High Resolution Radargrammetry – 3D Terrain Modeling, Intech, **2014.**

[65] Gelautz, M., Paillou, P., Chen, C. W., and Zebker, H. A., Radar Stereo and Interferometry Derived Digital Elevation Models: Comparison and Combination Using Radarsat and ERS-2 Imagery, International Journal of Remote Sensing, Vol.24, No. 24, 5243-5264, 20 December **2003.**

[66] Yu J. H., Li, X., Ge, L.i Chang, H. C., Radargrammetry and Interferometry SAR for DEM Generation, **2010**

[67] Copa, L., Poli, D., Remondino, F., Land Applications of Radar Remote Sensing – Chapter 7 : Fusion of Interferometric SAR and Photogrammetric Elevation Data, Intech, **2014.**

[68] Abdikan, S., Balık Şanlı, F., Alkış, Z., Alkış, A., SAR Görüntülerinden Üretilen İnterferometrik ve Stereo Sayısal Yükseklik Modellerinin Kalitesinin İncelenmesi, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 11. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara, Nisan **2007.**

[69] Abdikan, S., SAR Görüntülerinden Üretilen İnterferometrik ve Stereo Sayısal Yükseklik Modellerinin Kalitesinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, **2007.**

[70] Abdikan, S., Monitoring of Land Surface Subsidence in Zonguldak Coal Mining Field in the Northern Turkey Using Multi Temporal SAR Interferometry, Ph.D. Dissertation, Yıldız Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences, **2012.**

[71] Eren, Ö., Uydu Görüntülerinden 3. Boyut Bilgisinin Çıkarılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Bilişim Enstitüsü, **2009.**

[72] Günçe, H. B., Batı Antalya Heyelanlarının SAR İnterferometri ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, **2019.**

[73] Uslu, K., İnterferometrik SAR Verisi İşlenmesi ve Bir Simülasyon Örneği, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, **2002.**

[74] Akabalı, O. A., Stereo Yapay Açıklıklı Raar Görüntülerinden Otomatik Sayısal Yükseklik Modeli Üretilmesi ve Doğruluğunun Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, **2002.**

[75] Skolnik, M. I., Introduction to Radar Systems, McGraw-Hill, **2001.**

[76] Konuslu, A. Y., Onat, E., Kurtoglu, A., Sezer, B., Uydu SAR İnterferometri ve Görüntü İstihbaratı Uygulamaları, SAVTEK **2016.**

[77] Konuşlu, A. Y., SAR Noktasal Işık Modu Benzetimi ve Kalman Filtre Kullanarak Görüntü Geriçatımı, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, **2007.**

[78] Brooker, G., Introduction to Sensors for Ranging And Imaging – Chapter 12: High Angular-Resolution Techniques, SciTech **2009.**

[79] Onat, E., Özkazanç, Y., An Analysis of Doppler Beam Sharpening Technique Used in Fighter Aircraft, IEEE SIU **2018**

[80] Wehner, D. R., High Resolution Radar, Artech House Inc., **1995.**

[81] [Çevrimiçi]. Available: https://www.sdms.afrl.af.mil/main.php.

[82] Scarborough, S. M., Gorham, L., Minardi, M. J., Majumder, U. K., Judge, M. G., Moore, L., Novak, L., Jaroszewksi, S., Spoldi, L., Pieramico, A., A Challenge Problem for SAR Change Detection and Data Compression, in SPIE, Orlando, Florida, **2010.**

[83] Leica1, Introduction to Radar Data, Leica ERDAS IMAGINE Online Documentation, 9.1., **2007.**

[84] Lu, Z., Kwoun, O., Rykhus, R., Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR): Its Past, Present and Future, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 73(3)., **2007.**

[85] Yumuş, D., SAR İmgelerinde Gözetimsiz Sınıflandırma Yöntemleri ile Arazi Örtüsü Sınıflandırması, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, **2019.**

[86] Mercer, J. B., SAR technologies for Topographic Mapping, In D. Fritsch and D. Hobbie, (Eds.), 117-126, Photogrammetric Week, Stutgart, Germany, **1995.**

[87] Franceschetti, G., Lanari, R., Synthetic Aperture Radar Processing, CRC Press, **1999.**

[88] Werner, C. L., Hensley, S., Goldstein, R. M., Rosen, P. A., Zebker, H. A., Techniques and applications of SWAR interferometry for ERS-1: Topographic mapping, change detection and slope measurement, Space at the Service of our Environment , Cannes, France, ESA SP-359, 205210, **1993.**

[89] Gens, R. and Genderen, J. L., SAR interferometry - issues, techniques, applications, International Journal of Remote Sensing, vol. 17, no. 10, pp. 1803-1835, **1996**

[90] Doery, A. W., Collecting and Processing Data for High Quality CCD Images, Sandia Report, SAND2007-1545, Sandia National Laboratories, **2007.**

[91] Doery, A. W., SAR Data Collection and Processing Requirements for High Quality Coherent Change Detection, Proc. Of SPIE Vol. 6947, 694706, **2008.**

[92] Doery, A. W., SAR Image Complex Pixel Representations, Sandia Report, SAND2015-2309, Sandia National Laboratories, **2015.**

[93] Kalender, E., Gürer, G., Anadol, E., Security Applications with Synthetic Aperture Radar (SAR) Systems, EUSAR 286-290, Berlin, **2018.**

[94] Turner, B. L., Skole, D., Sanderson, S., Fischer, G., Fresco, L., Leemans, R., Land-Use and Land-Cover Change, Science/Research Plan. IGBP Report, Stockholm, Sweden, and Geneva, Switzerland, **1995.**

[95] Esch, T., Schenk, A., Ullmann, T., Thiel, M., Roth, A., Dech S., Characterization of Land Cover Types in TerraSAR-X Images by Combined Analysis of Speckle Statistics and Intensity Information, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 49, No 6, **2011.**

[96] Askne, J., Hagberg, J. O., Potential of interferometric SAR for classification of land surfaces, Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '93. Better Understanding of Earth Environment., International, **1993.**

[97] Goldstein, R. M., Engelhardt, H., Kamb, B., and Frolich, R. M., Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: Application to an Antarctic ice stream, Science, vol. 262, pp. 1525-1534, **1993.**

[98] Hartl, P., Thiel, K. H., Wu, X., Duake, C., Sievers, J., Application of SAR interferometry with ERS-1 in the Antarctic, Earth Observation Quarterly, 43, 1-4, **1994.**

[99] Massonnet, D., Feigl, K., Rossi, M., Adragna, F., Radar interferometric mapping of deformation in the year after the Landers earhquake, Nature, 369, 227-230, **1994.**

[100] Zebker, H. A., Farr, T. G., Salazar, R. P., Dixon, T. H., Mapping the world's topography using radar interferometry: The TOPSAT Mission, Proceedings of the IEEE, 82 (12), 1774-1786, **1994.**

[101] Evans, D. L., Farr, T. G., Zebker, H. A., Monginis-mark, P. J., Radar interferometry studies of the earth's topography, EOS, Transactions, American Geophsyical Union, 73, 553, 557-558, **1992.**

[102] Scheiber, R., Moreira, A., Coregistration of Interferometric SAR Images Using Spectral Diversity, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38, No. 5, Septermber **2000.**

[103] Balcı, M., Foroosh, H., Subpixel Estimation of Shifts Directly in the Fourier Domain, IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 15, No. 7, July **2006**.

[104] Balcı, M., Foroosh, H., Subpixel Registration Directly from the Phase Difference, EURASIP Journal on Applied Signal Processing, pp. 1-11, **2006**.

[105] Balcı, M., Foroosh, H., Subpixel Alignment of MRI Data under Cartesian and Log Polar Sampling, IEEE 18th International Conference on Pattern Recognition – ICPR, **2006**.

[106] Reddy, B. S., Chatterji, B. N., An FFT Based Technique for Translation Rotation and Scale Invariant Image Registration, IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 5, No. 8, August **1996**.

[107] Li, X., Song, H., InSAR Image Coregistration Based on Phase Correlation and Log Polar Transforms, IEEE Radar Conference – RadarCon, **2013**.

[108] Sansosti, E., Berardino, P., Manunta, M., Serafino, F., Fornaro, G., Geometrical SAR Image Registration, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 44, No. 10, October **2006**.

[109] Li, F.K., Goldstein, R.M., Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 28(1): 88-97, **1990.**

[110] Rufino, G., Moccia, A., Esposito, S., DEM generation by means of ERS tandem data Proceedings of the Fringe '96 Workshop ERS SAR, Zurich, Switzerland, **1996.**

[111] Rufino, G., Moccia, A., Esposito, S., DEM generation by means of ERS tandem data. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 36(6): 1905-1912, **1998.**

[112] Kwoh, L.K., Chang, E.C., Heng, W.C.A., Hock, L., DTM generation from 35-day repeat pass ERS-1 interferometry, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994. IGARSS '94. Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis and Interpretation., International, pp. 2288-2290 vol.4, **1994.**

[113] Hanssen, R., Bamler, R., 1999. Evaluation of interpolation kernels for SAR interferometry. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 37(1): 318-321, **1999.**

[114] Prati, C., Rocca, F., Limits to the resolution of elevation maps from stereo SAR images. International Journal of Remote Sensing, 11(12): 2215-2235, **1990.**

[115] Lopez-Martinez, C., Fabregas, X., Pottier, E., A New Alternative for SAR Imagery Coherence Estimation, EUSAR **2004.**

[116] Bouraba, A., Younsi, A., Belhadj-Aissa, A., Acheroy, M., Milisajljevic, N., Closson, D., Robust Techniques for Coherent Change Detection Using COSMO-SKYMed SAR Images, Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 22, 219-232, **2012.**

[117] Bouraba, A., Acheroy, M., Closson, D., Coherent Detection Performance Using High Resolution SAR Images, International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT), Vol. 2, Issue 11, November **2013.**

[118] Bouraba, A., Milisajljevic, N., Acheroy, M., Closson, D., Land Applications of Radar Remote Sensing – Chapter 5 : Change Detection and Classification Using High Resolution SAR Interferometry, Intech, **2014.**

[119] Touzi, R., Lopes, A., Bruniquel, J., Vachon, P. W., Coherence Estimation for SAR Imagery, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 37, No. 1, 135–149, **1999.**

[120] Rickard, J. T., Dillard, G. M., Adaptive detection algorithms for multiple target situations, IEEE Transactions on Aerospace and Electtronic Systems, Vol. 13, No. 10, 338–343, **1977.**

[121] Rohling, H., "Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations, IEEE Transactions on Aerospace and Electtronic Systems, Vol. 19, No. 4, 608–621, **1983.**

[122] El-Darymli, K., McGuire, P., Power, D., Moloney, C., Target Detection in Synthetic Aperture Radar Imagery: A State-of-the-art Survey, Journal of Applied Remote Sensing, SPIE, Vol. 7, **2013.**

[123] Onat, E., Özkazanç, Y., An Analysis on Path Following Phase Unwrapping Algorithms, IEEE SIU **2020**

[124] Valadao-Matias, G. R., Radar Interferometry: 2D Phase Unwrapping ViaGraph Cuts, MSc. Thesis, Universidade Technica De Lisboa, **2006.**

[125] Roth, M. W., Phase Unwrapping for Interferometric SAR by the Least-Error Path, John Hopkins University Applied Physics Lab Technical Report, Laurel, MD, **1995.**

[126] Flynn, T. J., Consistent 2-D Phase Unwrapping Guided by a Quality Map, Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, **1996.**

[127] Flynn, T. J. Two Dimensional Phase Unwrapping with Minimum Weighted Discontinuity, Journal of the Optical Society of America, Vol. 14. No. 10. Pp 2692-2701, **1997.**

[128] Massonnet, D., and Souyris, J. C., Image with Synthetic Aperture Radar, EPFL Press, 189-191, **2008.**

[129] Zhang, Z., Deriche, R., Faugeras, O. and Luong, Q.T., A robust technique for matching two uncalibrated images through the recovery of the unknown epipolar geometry, Artificial intelligence, Vol. 78, pages 87–119, **1995.**

[130] Denos, M., A pyramidal scheme for stereo matching SIR-B imagery, International Journal of Remote Sensing, Vol. 13, No. 2, pages 387 - 392, **1992.**

[131] Kyaruzi, J. K., Quality Assessment of DEM from Radargrammetry Data, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation Enschede, The Netherlands, master of science, **2005.**

[132] Sansosti, E., A Simple and Exact Solution for the Interferometric and Stereo SAR Geolocation Problem, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 42(8): 1625-1634, **2004.**

[133] "Wikipedia," [Online]. Available:

https://en.wikipedia.org/wiki/Air_Force_Research_Laboratory,

[Accessed 15 Mayıs **2020**].

[134] “eo-college” [Online]. Available: https://eo-college.org/,

[Accessed 15 Mayıs **2020**].

[135] “airbusds” [Online]. Available:

https://www.intelligence-airbusds.com/en/9317-sample-imagery-detail?product=37995&keyword=&type=364,

[Accessed 15 Mayıs **2020**].

[136] "Wikipedia," [Online]. Available:

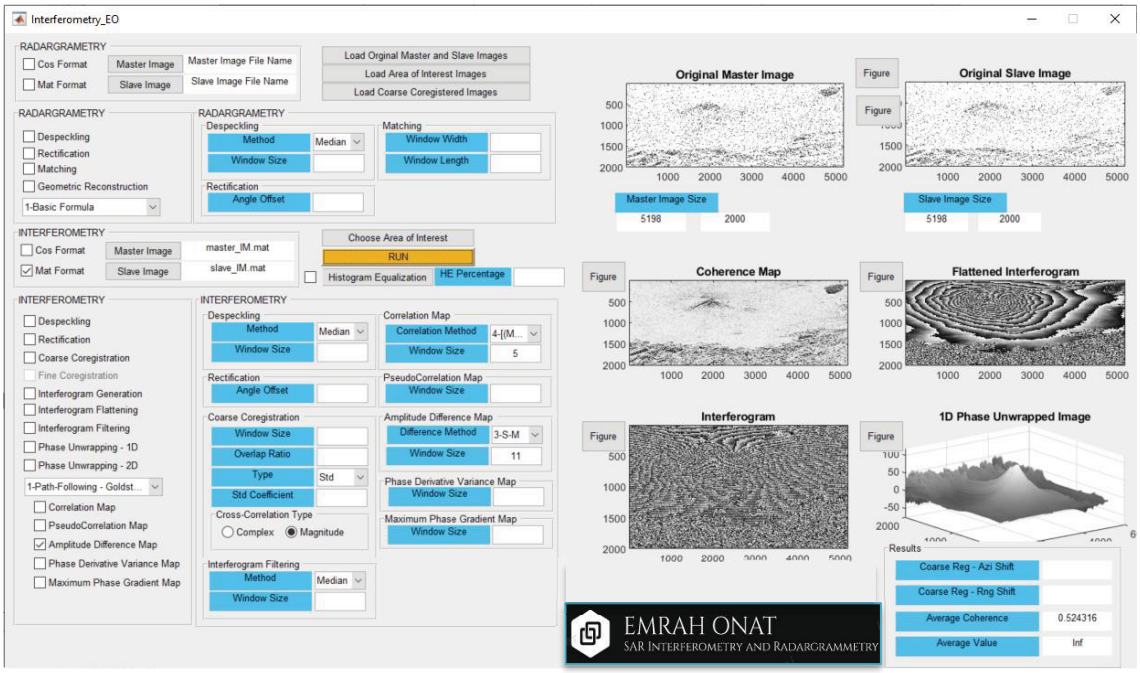
https://tr.wikipedia.org/wiki/Genelleştirilmiş_ortalama,

[Accessed 15 Ağustos **2020**].

EKLER

EK 1 – Kullanıcı Arayüzü

SAR İnterferometri ve Radargrametri teknikleri için benzetimler MATLAB ortamında yazılan kodlar ile gerçekleştirilmiştir. Bazı katlı faz açma algoritmaları C/C++ dilinde yazılmış MATLAB üzerinden çağrılarak çalıştırılmaktadır. Ayrıca benzetim çalışmaları kapsamında Şekil 7-1'de verilen bir kullanıcı arayüzü tasarlanmıştır.



Şekil 7-1: Benzetim Programı Kullanıcı Arayüzü

Benzetimi yapılan teknikler:

1. SAR İnterferometri Tekniği ile Sayısal Yükseklik Modeli Oluşturma
2. Radargrametri Tekniği ile Sayısal Yükseklik Modeli Oluşturma

Her iki teknik için de algoritma blokları ayrı ayrı seçilebilir olarak arayüze eklenmiştir. Kullanıcı arayüzü ile uygulanabilecek yetenekler maddeler halinde verilmiştir.

- SAR Verisi Okuma ve Yükleme Özelliği (*Read and Load*)
    - .cos formatında SAR görüntülerinin "görüntü" ve "metadata" olarak ayrıştırılıp .mat formatına dönüştürülmesi

- .mat formatında SAR görüntülerin yüklenmesi (*Load*)

- SAR Görüntüsünden İlgi Alanı Seçimi (*Range of Interest*)
- SAR görüntülerini ekranda görüntülemek için histogram eşitlemesinin yapılması (*Histogram Equalization*)
- SAR İnterferometri Tekniği İşlem Adımları (*SAR Interferometry*)
  - Benek Gürültüsü Temizleme (*Despeckling*)
  - Açısal Düzeltme (*Rectification*)
  - SAR Görüntü Çiftinin Kaba Çakıştırılması (*Coregistration*)
  - Harita Oluşturma
    - Korelasyon Haritası (*Correlation Map / CCD Map*)
    - Genlik Değişiklik Tespiti Haritası (*ACD Map*)
    - Sözde Korelasyon Haritası (*Pseudo Correlation Map*)
    - Faz Türev Varyansı Haritası (*Phase Derivative Variance Map*)
    - En Yüksek Faz Türevi Haritası (*Max Phase Gradient Map*)
  - Harita Belirginleştirme
  - İnterferogram
    - İnterferogramın Oluşturulması (*Interfereogram Generation*)
    - Interferogramın Düzleştirilmesi (*Interferogram Flattening / Earth Phase Removal*)
    - Interferogramın Filtrelenmesi (*Interferogmram Filtering*)
  - Katlı Faz Açılması
    - Tek Boyutta Katlı Fazın Açılması (*1D Phase Unwrapping*)
    - İki Boyutta Katlı Fazın Açılması (*2D Phase Unwrapping*)
      - Goldstein Branch Cut Yöntemi
      - Rehber Harita Yöntemi (*Quality Guided*)

        - Mask Cut Yöntemi
        - Flynn En Küçük Süreksizlik Yaklaşımı (*Minimum Discontinuity Approach*)

- Radargrametri Tekniği İşlem Adımları (*Radargrammetry*)
    - Benek Gürültüsü Temizleme (*Despeckling*)
    - Açısal Düzeltme (*Rectification*)
    - Çapraz Menzilde Çakıştırma (*Coregistration for Azimuth Direction*)
    - Radargrametrik Görüntü Çiftinin Eşleştirilmesi (*Matching*)
    - Yükseklik Hesaplama
        - Geometrik Geriçatım (*Geometric Reconstruction*)

Füzyon algoritmaları da kullanıcı arayüzüne eklenecektir.

- Füzyon (*Fusion*)
    - Statik Füzyon (*Statik Fusion*)
        - Eşik Değer
            - Tek Eşik Değer
            - Çift Eşik Değer
        - Ağırlıklandırılmış Holder Ortalamaları
            - En Küçük Değer Seçimi ($p \to -\infty$)
            - Harmonik Ortalama ($p = -1$)
            - Geometrik Ortalama ($p = 0$)
            - Aritmetik Ortalama ($p = 1$)
            - Kuadratik Ortalama ($p = 2$)
            - En Büyük Değer Seçimi ($p \to +\infty$)
    - Dinamik Füzyon (*Dynamic Fusion*)
        - Yol İzleme Tabanlı Yöntemler için Bariyer Haritası Olarak Kullanım
        - Tüm KFA Yöntemleri için Referans

Kullanıcı Arayüz Özellikleri

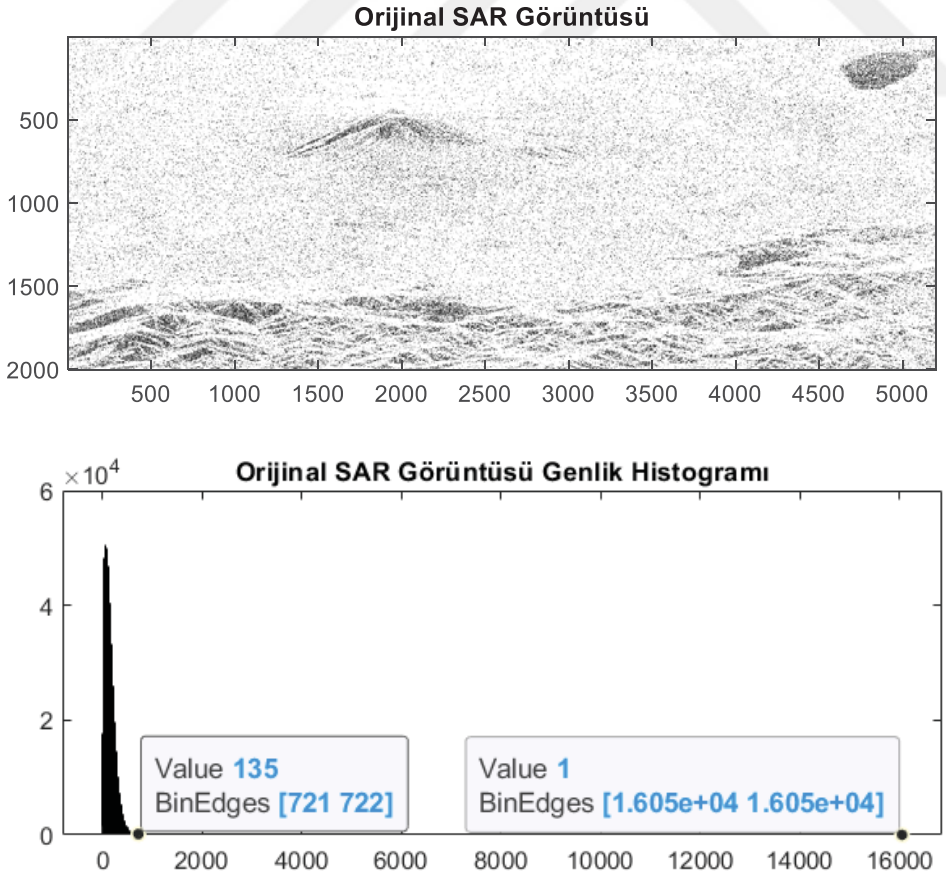
Tez kapsamında yapılan benzetim çalışmaları için Matlab ortamında çalışan Şekil 7-1'deki kullanıcı arayüzü yapılmıştır.

Kullanıcı arayüzü üzerinde SAR interferometri ve radargrametri tekniklerinin algoritma adımları ve her adım için kullanılacak parametre seçimleri giriş ekranı bulunmaktadır. Bunun yanında yapılan çalışmalarda kullanımı kolaylaştırmak için ek özellikler eklenmiştir.

Histogram Eşitleme

SAR görüntülerinin genlik değerinin histogramı Rayleigh dağılımında olmaktadır. Bunun sebebi genlik bilgisini oluşturan gerçel ve sanal bileşenlerin ikisinin de normal dağılımda olmasıdır. Bilindiği üzere iki normal dağılımın toplamından Rayleigh dağılım elde edilmektedir.

Örnek olarak ERS uydusuna ait SAR görüntüsünün orijinal hali ve çıkarılan histogramı Şekil 7-2'de verilmiştir.



Şekil 7-2: ERS Uydusuna ait Orijinal SAR Görüntüsü ve Histogramı

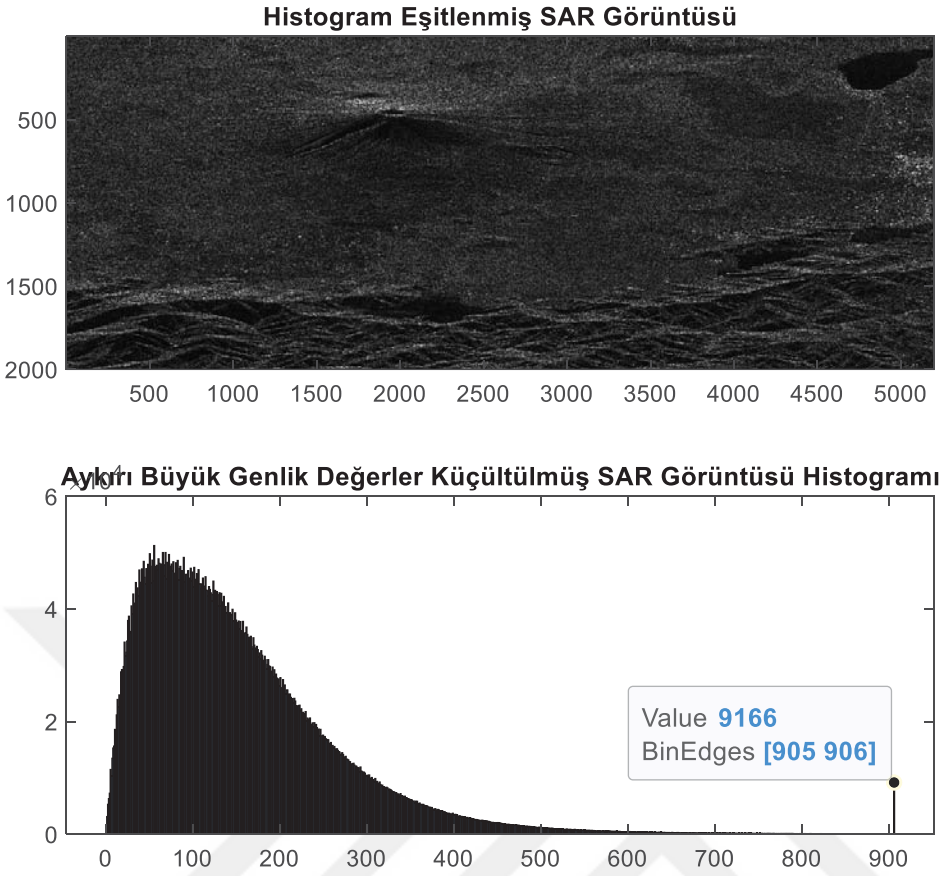
SAR interferometri ve radargrametride kullanılan SAR görüntülerinin ekrana basılması aşamasında görüntünün kendi karakteristiğinden kaynaklı bazı görsel sıkıntılar olmaktadır. Bunların başında da görüntü içerisindeki çok parlak piksellerin olması sebebiyle SAR görüntülerinin düzgün görüntülenememesidir. Buna sebep olan ise görüntülenen bölgeye kontrol noktası olarak yerleştirilen ve görüntü içerisinde denk geldiği pikselin genlik değerini çok arttıran kuvvetli yansıtıcılardır. Böyle bir durumda görüntü ekrana basılmaya çalışılınca görüntü içerisindeki tüm bilgiler 0-255 arasına doğrusal olarak atandığı için bilgi kaybı yaşanmakta ve simsiyah görseller elde edilmektedir. Bu sebeple; düzgün görüntüleme için ilk seçenek SAR görüntülerinin doğrusal olmayan bir şekilde histogram eşitlemesi yapılması gerekmektedir. İkinci yol olarak da görüntü içerisindeki genlik değeri dağılım ortalamasının çok üstünde olan aykırı değerlerden kurtulmak gerekmektedir.

Şekil 7-2'deki histogramdan görüleceği üzere en büyük genlik değeri 16.052'dir. Ancak genlik değerlerinin çok büyük bir kısmı 135'in altındadır. Eğer herhangi bir ön işlem yapılmadan doğrusal bir şekilde histogram eşitlenirse; en büyük değer 255'e çekilecek ve 135'in altındaki tüm değerler de otomatik olarak 1'e atanacaktır. Böylece görüntü içerisindeki tüm bilgi kaybedilecektir. Bu sebeple, histogram eşitlemeden evvel bir ön işlem yapılmalı ve dağılımdaki aykırı değerlerden (outlier) kurtulmak gerekmektedir. Bunun için dağılımdaki değerlerin en küçükten başlayarak örneğin %99'luk kısmı alınıp geri kalan aykırı değerler tam %99'a denk gelen değere çekilecektir. Böylelikle çok büyük aykırı değerler kalmayacaktır.

- Kullanıcı arayüzünden histogram eşitlemede kullanılacak yüzde değeri girilebilmektedir.

ERS uydu görüntüsü için %99,9 seçilmiş ve görüntü içerisinde genliği çok büyük olan aykırı değerler, yüzde 99,9'a denk gelen değere (905'e) çekilerek sabitlenmiştir. Böylelikle Şekil 7-3'teki SAR görüntüsü elde edilmiştir. Histogram da daha düzgün bir hale gelebilmiştir.

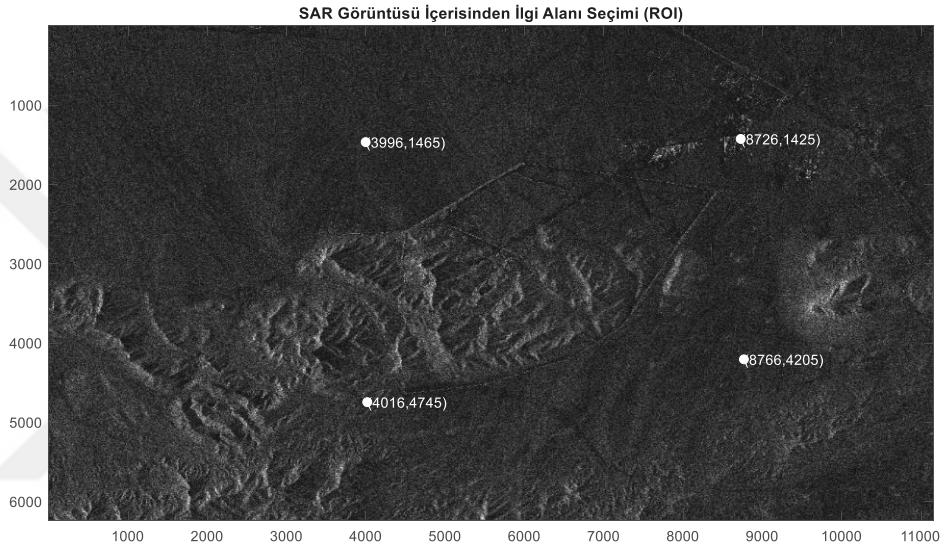
Bu yapılan işlemler, SAR interferometri ya da radargrametri teknikleri için değildir. Sadece görüntülerin ekranda düzgün görüntülenebilmesi için gerekli bir işlemdir. Algoritmalara beslenen görüntü içerikleri değiştirilmemektedir.



Şekil 7-3: Histogram Eşitlenmiş SAR Görüntüsü ve Aykırı Büyük Değerler Küçük Değere Sabitlenmiş Histogram

İlgi Alanı Seçimi

SAR görüntülerinin çok büyük olması sebebiyle SAR interferometride özellikle çakıştırma ve katlı faz açma adımlarında; radargrametride ise eşleştirme adımında işlemler çok uzun sürmektedir. Bu sebeple görüntülerin kırpılarak daha küçük bir bölge içerisinde çalışılabilmesi için kullanıcı arayüzüne ilgi alanı seçimi özelliği eklenmiştir. Bu özellik sayesinde görüntü içerisinden seçilen 4 nokta vasıtasıyla bir alan seçimi yapılmaktadır. Örneğin Şekil 5-22'deki ilgi alanı seçimi Şekil 7-4'teki gibi 4 nokta seçilerek yapılmıştır.



Şekil 7-4: İlgi Alanı Seçimi

EK 2 - Tezden Türetilmiş Bildiriler

[1] Onat, E., Özkazanç, Y., Topographic Map Generation Using Synthetic Aperture Radar Images Via Interferometry (InSAR) Technique, IEEE SIU **2020**

[2] Onat, E., Özkazanç, Y., An Analysis on Path Following Phase Unwrapping Algorithms, IEEE SIU **2020**

[3] Onat, E., Nurbas, E., Özkazanç, Y., Yol İzleme Tabanlı Katlı Faz Açma Algoritmalarından Goldstein Branch-Cut ve Flynn En Küçük Süreksizlik Yaklaşımının Performans Analizleri, 6. Ulusal Yüksek Başarımlı Hesaplama Konferansı'na Ağustos 2020 tarihinde gönderilmiştir.

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 04/09/2020

Tez Başlığı / Konusu: Sentetik Açıklıklı Radar Görüntülerinde İnterferometri ve Radargrametri Tekniklerinin Füzyonu

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 325 sayfalık kısmına ilişkin, 04/09/2020 tarihinde ~~şahsım/~~tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 3'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

1- Kaynakça hariç
2- Alıntılar hariç/~~dâhil~~
3- 5 kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza
04.09.2020

Adı Soyadı:	Emrah ONAT
Öğrenci No:	N15245150
Anabilim Dalı:	Elektrik ve Elektronik Mühendisliği ABD
Programı:	Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
Statüsü:	☐ Y.Lisans ☒ Doktora ☐ Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Dr. Öğr. Üyesi Yakup ÖZKAZANÇ
(Unvan, Ad Soyad, İmza)

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	: Emrah ONAT
Telefon	: +90 (532) 515 4940
Elektronik posta adresi	: eonat87@yahoo.com
Yabancı dili	: İngilizce

EĞİTİM DURUMU

Lise	: Kayseri Fen Lisesi, 2004
Lisans	: Boğaziçi Üniversitesi, 2009 Elektrik - Elektronik Mühendisliği Böl., İSTANBUL
Lisans	: Oklahoma Üniversitesi (Değişim Öğrencisi), 2007 Elektrik - Bilgisayar Mühendisliği Böl., Oklahoma/ABD
Yüksek Lisans	: Hacettepe Üniversitesi, 2014 Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Böl., ANKARA
Doktora	: Hacettepe Üniversitesi, 2020 Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Böl., ANKARA

İŞ TECRÜBESİ

2009 - 2012	: Araştırmacı TÜBİTAK - BİLGEM / İLTAREN, ANKARA
2013 - 2017	: Kıdemli Uzman Sistem Mühendisi SDT - Uzay ve Savunma Teknolojileri, ANKARA
2017 - …	: Takım Lideri ESEN Sistem Entegrasyon, ANKARA

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

[1] Onat, E., Özkazanç, Y., Topographic Map Generation Using Synthetic Aperture Radar Images Via Interferometry (InSAR) Technique, IEEE SIU **2020**

[2] Onat, E., Özkazanç, Y., An Analysis on Path Following Phase Unwrapping Algorithms, IEEE SIU **2020**

TEZ DIŞI YAYINLAR

[3] Onat, E., Serin, M., Implementation of Digital Pulse Doppler Radar Signal Generator and Receiver, IEEE SIU **2011**

[4] Özdil, Ö., İspir, M., Onat, E., Yıldırım, A., Implementation of a FPGA-based FFT Convolution, IET International Conference on Radar Systems (IET Radar **2012**)

[5] Onat, E., Özdil, Ö., İspir, M., Serin, M., Implementation of Doppler Noise Jamming Techniques Using DRFM, IEEE SIU **2012**

[6] Özdil, Ö., İspir, M., Onat, E., Yıldırım, A., Automated Fixed-Point Precision Optimization, IEEE SIU **2012**

[7] Özdil, Ö., İspir, M., Onat, E., Yıldırım, A., Implementation of a FPGA-based Overlap-Add Filter, IEEE SIU **2012**

[8] İspir, M., Özdil, Ö., Onat, E., Yıldırım, A., K-Distributed Radar Clutter Sequence Generator on FPGA, IEEE SIU **2012**

[9] Serin, M., Onat, E., Orduyılmaz, A., Yıldırım, A., Şahin, M.A., Amplitude and Phase Difference Tolerance Analysis of Cross-Eye Jamming Technique, IEEE SIU **2013**

[10] Onat, E., Özdil, Ö., Traffic Sign Classification Using Hough Transform and SVM, IEEE SIU **2015**

[11] Ergül, M., Nar, F., Onat, E., Bak, Ç., Şen, N., Hiperspektral Görüntülerde Gürültülü Bantların Bilişim Kuramsal Yaklaşımla Otomatik Tespiti, SAVTEK **2016**

[12] Onat, E., Ergül, M., Basaklar, B., Tokatlı, A., Sobel Filtre Kullanarak Gerçek Zamanlı Video Sinyallerinin İşlenmesinin FPGA'da Gerçeklenmesi, SAVTEK **2016**

[13] Onat, E., Çalılı O., Bozkurt, M., Basaklar, B., Tokatlı, A., Gerçek Zamanlı Semboloji Üreteç Bilgisayarı Geliştirilmesi, SAVTEK **2016**

[14] Konuslu, A. Y., Onat, E., Kurtoğlu, A., Sezer, B., Uydu SAR İnterferometri ve Görüntü İstihbaratı Uygulamaları, SAVTEK **2016**

[15] Onat, E., FPGA Implementation of Real Time Video Signal Processing Using Sobel, Robert, Prewitt and Laplacian Filters, IEEE SIU **2017**

[16] Onat, E., FPGA Implementation of Target Detection Algorithm at Real Time Video Signal Processing Using Harris Corner Detector Filter, IEEE SIU **2018**

[17] Onat, E., Özkazanç, Y., An Analysis of Doppler Beam Sharpening Technique Used in Fighter Aircraft, IEEE SIU **2018**

[18] Nurbaş, E., Onat, E., Tuncer, T. E., Comparative Analysis of MUSIC and ESPRIT Direction Finding Algorithms with Linear and Planar Antenna Geometry, IEEE SIU **2019**

[19] Nurbaş, E., Onat, E., Tuncer, T. E., Performance Analysis of MUSIC and ESPRIT Direction Finding Algorithms in Interference Environment, IEEE SIU **2019**

[20] Nurbaş, E., Onat, E., Angle of Arrival Estimation by Using Deep Autoencoder Networks, IEEE SIU **2020**

[21] Uçkun, F. A., Özer, H., Nurbaş, E., Onat, E., Direction Finding Using Convolutional Neural Networks and Convolutional Recurrent Neural Networks, IEEE SIU **2020**