

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GPS VE INSAR ÖLÇÜLERİNİ BİRLİKTE KULLANARAK İZMİT
DEPREMİNDE OLUŞAN DEFORMASYONLARIN BELİRLENMESİ:
NOKTA SEYREKLEŞTİRMEDE YENİ BİR ALGORİTMA**

**DOKTORA TEZİ
Yavuz Selim ŞENGÜN**

Anabilim Dalı : Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği

Programı : Geomatik Mühendisliği

ŞUBAT 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GPS VE INSAR ÖLÇÜLERİNİ BİRLİKTE KULLANARAK İZMİT
DEPREMİNDE OLUŞAN DEFORMASYONLARIN BELİRLENMESİ:
NOKTA SEYREKLEŞTİRMEDE YENİ BİR ALGORİTMA**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Yavuz Selim ŞENGÜN
(501022303)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 Eylül 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 2 Şubat 2009**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Rasim DENİZ
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Tefvik AYAN (İTÜ)
Yrd. Doç.Dr. Uğur ŞANLI (BÜ)
Doç. Dr. Rahmi Nurhan ÇELİK (İTÜ)
Doç. Dr. Semih ERGİNTAV (TÜBİTAK-MAM)**

ŞUBAT 2009

ÖNSÖZ

Yapay Açıklıklı Radar İnterferometrisi (InSAR), yeryüzü topoğrafyasının ve deformasyonun belirlenmesi için yeni bir jeodezik tekniktir ve yersel ölçümlere ihtiyaç duymaz. Bu ölçü grubu çok yoğun olmasına rağmen sadece uydu bakış doğrultusunda bilgi verir. Bu veri setinin, GPS ve nivelman gibi diğer jeodezik ölçülerle birlikte kullanılması durumunda veri setlerinin dengeli katkılarına ihtiyaç vardır. Doktora çalışmasında InSAR tekniğinin temelleri, bu tekniğin doğruluğu İzmit Depremi örnek verisi üzerinde test edilmiş, bu veri kümesinin seyrekleştirilmesi üzerine yeni bir algoritma geliştirilmiş, GPS gibi diğer veri setleriyle birlikte kullanılabilmesi konusunda ağırlıklandırma yapılmış, İzmit Depremi fay parametreleri; GPS ve InSAR ölçüleriyle bu nokta seyreltme ve ağırlıklandırma ile çok katmanlı yarı uzay için tekrar belirlenmiştir.

Çalışma süresince bana yol gösteren ve desteklerini esirgemeyen danışman hocam Prof.Dr. Rasim DENİZ ve tez izleme komitesindeki hocalarım Prof.Dr.Tevfik AYAN ve Yrd.Doç.Dr. Uğur ŞANLI 'ya, tez çalışması boyunca desteğini sürdüren Doç.Dr. Rahmi Nurhan ÇELİK'e şükranlarımı sunarım. Çalışmamın her aşamasında bana destek olan Harita Genel Komutanlığı (HGK) ve personeline ayrıca TÜBİTAK-MAM'dan Doç.Dr.Semih ERGİNTAV'a teşekkürü borç bilirim. Ayrıca, çalışmam süresince özveriyle sabreden ve manevi destek veren eşim Evrim ŞENGÜN'e ve aileme teşekkür ederim.

Şubat 2009

Y. Müh. Yavuz Selim ŞENGÜN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KISALTMALAR.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
SEMBOL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvii
1. GİRİŞ	1
2. YAPAY AÇIKLIKLI RADAR	5
2.1. SAR Uydu Görevleri	8
2.2. SAR Teorisi.....	9
2.3. SAR Tek Bakışlı Karmaşık Görüntüsü ve Formatı.....	12
2.3. Radar Görüntü Hataları	14
3. İNTERFEROMETRİK YAPAY AÇIKLIKLI RADAR.....	17
3.1. Radar İnterferometrisinin Tarihi	17
3.2. İnterferometrik SAR Tekniği	20
3.2.1. Görüntüleme geometrisinin faz farkına olan katkısı.....	22
3.2.2. Küreselliğin etkisi	23
3.2.3. Yüzey topoğrafyası kaynaklı faz.....	24
3.2.4. Yüzey deformasyonu	25
3.2.5. Atmosferik düzensizlikler ve atmosferik gecikme.....	26
3.3. İnterferogramların Kalitesi	26
3.3.1. Uyumluluk	26
3.3.2. Uyumsuzluk nedenleri	27
3.3.2.1. Termal korelasyonsuzluk	27
3.3.2.2. Zamansal korelasyonsuzluk	28
3.3.2.3. Geometrik korelasyonsuzluk.....	28
3.3.2.4. Doppler merkezi korelasyonsuzluğu.....	29
3.3.2.5. Proses kaynaklı korelasyonsuzluk	29
3.3.3. Yörünge hataları.....	29
3.4. İnterferometrik Veri İşleme Adımları	31
3.4.1. Görüntü seçimi	31
3.4.2. Ön işlemler	32
3.4.3. Görüntülerin eşleştirilmesi ve interferogramın oluşturulması	33
3.4.4. Baz hesaplaması ve elipsoitten kaynaklanan fazın giderilmesi	35
3.4.5. Filtreleme	36
3.4.6. Faz açılması ve mutlak faz belirlenmesi	36
3.4.7. Deformasyon belirlenmesi	37
3.4.8. Topoğrafyanın belirlenmesi	38
3.4.9. Verilerin konumla ilişkilendirilmesi	38
3.5. İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar'ın Uygulama Alanları.....	38
3.5.1. Heyelan belirlenme	38

3.5.2. Yer çökmesi belirleme	39
3.5.3. Depremle ilgili yer değiştirmelerin belirlenmesi	40
3.5.3.1. Deprem anı yer değiştirmeleri.....	40
3.5.3.2. Deprem sonrası yer değiştirmeleri	41
3.5.3.3. Depremler arası yer değiştirmeleri.....	41
3.5.4. Volkanik hareket izleme.....	42
3.5.5. Buzul hareketleri	43
3.5.6. Diğer uygulamalar.....	43
4. TEST BÖLGESİ İZMİT’TE INSAR UYGULAMASI.....	45
4.1. İzmit Depremi.....	45
4.2. Test Bölgesindeki GPS Ölçüleri.....	46
4.3. Test Bölgesindeki InSAR Ölçüleri.....	47
4.3.1. ROI_PAC yazılımı	47
4.3.2. SAR görüntüleri	47
4.3.3. Sayısal yükseklik verisi.....	48
4.3.4. Uydu yörünge bilgisi.....	49
4.4. İnterferogram Oluşturulması	49
4.5. Oluşturulan İnterferogramın Doğruluk Araştırması.....	52
4.6. Modelleme İçin Nokta Seyrekleştirmesi	56
4.6.1. Veri indirgemesi ve quadtree algoritması	56
4.6.2. Quadtree algoritmasının İzmit depremi için uygulaması.....	58
4.6.3. Nokta seyrekleştirmesi için yeni bir yöntem.....	60
4.6.3.1. Yöntemin temelleri.....	60
4.6.3.2. İzmit depremi için yöntemin uygulaması.....	62
4.6.3.3. Quadtree algoritması ile yeni algoritmanın karşılaştırılması	63
4.7. Ağırlıklandırma	65
4.7.1. Ters modellemede farklı veri gruplarının birlikte kullanılması	65
4.7.2. İzmit alışması için ağırlıklandırma.....	67
4.8. Çok Katmanlı Yarı Uzay İçin Ters Modelleme	70
4.8.1. Fay parametreleri.....	70
4.8.2. Ters modelleme	71
4.8.3. Levenberg-Marquardt algoritması.....	73
4.8.4. İzmit depremi için çok katmanlı modelle ağırlıkladırma yapılarak ters modelleme	74
4.8.5. Yeni parametrelerin eski parametrelerle karşılaştırılması.....	78
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	83
KAYNAKLAR	87
ÖZGEÇMİŞ	95

KISALTMALAR

A.B.D.	: Amerika Birleşik Devletleri
DEOS	: Delft Institute for Space-Oriented Space Research
EKK	: En Küçük Kareler
ERS	: European Remote Sensing Satellite
ESA	: European Space Agency
GPS	: Global Positioning System
HGK	: Harita Genel Komutanlığı
InSAR	: Interferometric Synthetic Aperture Radar
JERS	: Japanese Earth Resources Satellite
KAF	: Kuzey Anadolu Fayı
MIT	: Massachusetts Institute of Technology
NIMA	: National Geospatial Intelligence Agency
RMS	: Root Mean Square
ROI_PAC	: Repeat Orbit Interferometry Package
SAR	: Synthetic Aperture Radar
SLAR	: Side Looking Airborne Radar
SLC	: Single Look Complex
SNR	: Signal to Noise Ratio
SRTM	: Shuttle Radar Topography Mission
SWST	: Sampling Window Start Time
SYM	: Sayısal Yükseklik Modeli
TBKG	: Tek Bakışlı Karmaşık Görüntü
USGS	: United States Geological Survey
VLBI	: Very Long Baseline Interferometry

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. SAR uydu görevleri.....	9
Çizelge 4.1. Kullanılan uydu görüntülerine ait bilgiler.....	48
Çizelge 4.2. İnterferogramın altında kalan GPS noktaları.....	53
Çizelge 4.3. İnterferometri ve GPS sonuçlarının karşılaştırılması.....	55
Çizelge 4.4. Nokta deformasyonlarının görelî karşılaştırması.....	55
Çizelge 4.5. Nokta Seyrekleştirme öncesi ve sonrası nokta sayıları.....	60
Çizelge 4.6. Nokta seyreltme yöntemlerinin örneklenen nokta bakımından karşılaştırılması.....	63
Çizelge 4.7. Nokta seyreltme yöntemlerinin asıl veri kümesiyle karşılaştırılması.....	65
Çizelge 4.8. İzmit Depremi için hesaplanan fay parametreleri.....	75
Çizelge 4.9. İzmit Depremi için hesaplanan yeni fay parametreleri.....	76
Çizelge 4.10. Eski ve yeni fay parametrelerinin karşılaştırması.....	81

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : Elektromanyetik spektrum.....	6
Şekil 2.2 : Atmosferik geçirgenlik	7
Şekil 2.3 : Mikrodalga spektrumu	8
Şekil 2.4 : Yan bakışlı radarın basitleştirilmiş geometrisi.....	10
Şekil 2.5 : Menzil gecikmesi ve doppler kayıklığının detayların konumlandırılması için kullanılması.....	12
Şekil 2.6 : Karmaşık sayılar	13
Şekil 2.7 : Eğik-mesafe ölçek bozulması.....	14
Şekil 2.8 : Radar görüntü hataları.....	15
Şekil 3.1 : Michelson interferometrisi	18
Şekil 3.2 : İnterferometri geometrisi	21
Şekil 3.3 : InSAR deformasyon modeli	25
Şekil 3.4 : Yörünge durum vektörü	30
Şekil 3.5 : Hataların ilerlemesi	30
Şekil 3.6 : InSAR'ın uygulama alanları	39
Şekil 3.7 : InSAR'ın Galapagos Adalarındaki uygulaması.....	42
Şekil 4.1 : KAF boyunca depremsellik.....	46
Şekil 4.2 : Marmara Bölgesi GPS ölçüleri	46
Şekil 4.3 : SAR görüntülerinin kapladığı alan	48
Şekil 4.4 : İnterferometrik değerlendirme için kullanılan yükseklik verisi	49
Şekil 4.5 : İzmit Depremine ait interferogram.....	50
Şekil 4.6 : İzmit Depremine ait korelasyon haritası.....	50
Şekil 4.7 : Faz çözülmesi çalışmasındaki başlangıç noktaları.....	51
Şekil 4.8 : Başlangıç noktalarına göre çözülen faz.....	52
Şekil 4.9 : Oluşturulan interferogram üzerine düşen GPS noktaları.....	53
Şekil 4.10 : İnterferograma ait devinimlerin sayısallaştırılması.....	54
Şekil 4.11 : Quadtree algoritması.....	57
Şekil 4.12 : Quadtree algoritması ile indirgenen veri.....	58
Şekil 4.13 : Nokta seyrekleştirilmesi sonrası nokta dağılımı.....	59
Şekil 4.14 : Nokta seyrekleştirilmesi öncesi ve sonrası nokta dağılımı.....	60
Şekil 4.15 : Douglas-Peucker Algoritması.....	61
Şekil 4.16 : Deformasyon verisinden oluşturulan konturlar.....	62
Şekil 4.17 : Basitleştirme öncesi ve sonrası konturlar	63
Şekil 4.18 : Yeni yöntem uygulaması	63
Şekil 4.19 : İki farklı veri seti yardımıyla oluşturulmaya çalışılan ana veri kümesi.....	64
Şekil 4.20 : Algoritmaların asıl veri kümeleriyle karşılaştırmaları	65
Şekil 4.21 : Farklı gözlem nokta sayısına sahip iki farklı veri	68
Şekil 4.22 : Ölçüler için gerçekleştirilen ağırlıksız polinom	68
Şekil 4.23 : Ölçüler için gerçekleştirilen ağırlıklı polinom	69
Şekil 4.24 : Fay parametreleri	70

Şekil 4.25	:Kuzey-Güney bileşeni için hesaplanan yer değiştirme miktarları.....	76
Şekil 4.26	: Doğu-Batı bileşeni için hesaplanan yer değiştirme miktarları	77
Şekil 4.27	: Yükseklik bileşeni için hesaplanan yer değiştirme miktarları	77
Şekil 4.28	:Uydu Bakış Doğrultusu için hesaplanan yer değiştirme miktarları.....	77
Şekil 4.29	: GPS yatay koordinatlarında eski parametrelerle hesaplanan deformasyon ile ölçülen deformasyon arasındaki fark.....	78
Şekil 4.30	: GPS yatay koordinatlarında yeni parametrelerle hesaplanan deformasyon ile ölçülen deformasyon arasındaki fark.....	78
Şekil 4.31	: GPS düşey koordinatlarında eski parametrelerle hesaplanan deformasyon ile ölçülen deformasyon arasındaki fark.....	79
Şekil 4.32	: GPS düşey koordinatlarında yeni parametrelerle hesaplanan deformasyon ile ölçülen deformasyon arasındaki fark.....	79
Şekil 4.33	: InSAR ölçü noktalarında eski parametrelerle hesaplanan deformasyon ile ölçülen deformasyon arasındaki fark.....	80
Şekil 4.34	: InSAR ölçü noktalarında yeni parametrelerle hesaplanan deformasyon ile ölçülen deformasyon arasındaki fark.....	80

SEMBOL LİSTESİ

θ	: Bakış açısı
γ	: Korelasyon katsayısı
η	: Yansıma açısı
W_g	: Şerit genişliği
θ_v	: Düşey dalga genişliği
λ	: Dalga boyu
R_m	: Şerit ortasına olan mesafe
c	: Işık hızı
δx	: Azimut doğrultusundaki çözünürlük
ϕ	: Faz
B_{\perp}	: Dik baz mesafesi
B_{\parallel}	: Paralel baz mesafesi
ρ	: Yeryüz ile radar arasındaki mesafe
B	: Baz mesafesi
α	: Bazın yatay ile yaptığı açı
\vec{u}	: Yer değiştirme vektörü
\vec{n}	: Uydu bakış doğrultusu vektörü
r	: Korelasyon katsayısı
P_s	: Sinyal gücü
P_N	: Gürültü gücü

GPS VE INSAR ÖLÇÜLERİNİ BİRLİKTE KULLANARAK İZMİT DEPREMİNDE OLUŞAN DEFORMASYONLARIN BELİRLENMESİ: NOKTA SEYREKLEŞTİRMEDE YENİ BİR ALGORİTMA

ÖZET

Yapay Açıklıklı Radar İnterferometrisi (InSAR), yeryüzü topoğrafyasının ve deformasyonunun belirlenmesi için yeni bir jeodezik tekniktir ve yersel ölçümlere ihtiyaç duymaz. InSAR ölçü grubu çok yoğundur ve sadece uydu bakış doğrultusunda bilgi verir. Bu ölçülerin doğruluğu İzmit Depremi örnek verisi üzerinde test edilmiştir. İzmit depremiyle ilgili olarak bu bölgedeki GPS noktalarındaki ölçümlerle aynı noktalardaki InSAR ölçüleri karşılaştırılmış aradaki fark yaklaşık ± 2 cm bulunmuştur. InSAR ölçülerinin seyrekleştirilmesi üzerine yeni bir algoritma geliştirilmiş, bu algoritmanın sık kullanılan quadtree algoritması ile karşılaştırması yapılmış, yeni algoritmanın InSAR veri kümesini daha az noktayla daha doğru bir şekilde temsil ettiği gözlenmiştir. Bu veri setinin, GPS ve nivelman gibi diğer jeodezik ölçülerle birlikte kullanılması durumunda veri setlerinin dengeli katkılarına ihtiyaç vardır. InSAR ölçülerinin GPS ölçüleriyle birlikte kullanılabilmesi ve veri kümelerinin sonuç hesaplara dengeli katkıları sağlamak için ağırlıklandırma gerçekleştirilmiştir. Uygulanan ağırlıklandırma stratejisi ve geliştirilen veri seyreltme algoritması kullanılarak, İzmit Depremine ait fay parametrelerinin bulunması amacıyla GPS ve InSAR ölçüleri birlikte kullanılarak ters modelleme çok katmanlı yer kabuğu için gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşımla bulunan fay parametreleri, İzmit Depremine ait tek-katmanlı yarı uzay için yapılan çalışmalardan birinde bulunan parametrelerle karşılaştırılmış, belli miktarda farklılık bulunmuştur. Yeni fay parametreleri, eski parametrelerle karşılaştırılmış, fay parametreleri ile hesaplanan yüzey deformasyonu ile ölçülen deformasyon arasındaki fark yeni parametreler için GPS ve InSAR ölçülerinin tamamı ele alındığında daha iyi olduğu gözlenmiştir.

DETERMINING DEFORMATION OF IZMIT EARTHQUAKE BY USING GPS AND INSAR MEASUREMENTS: NEW ALGORITHM FOR DATA REDUCTION

SUMMARY

Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) is a new geodetic technique for determining earth topography and deformation, and it does not need any land survey. InSAR measurements are highly dense and they only give information in Line of Sight of Radar. The accuracy of these measurements is tested on İzmit Earthquake sample data. The measurements at GPS points are compared with the InSAR measurements at the same points for İzmit Earthquake and differences are found as ± 2 cm. For reducing InSAR measurements, a new algorithm is developed and compared with the commonly used algorithm named quadtree. It is observed that the new algorithm represents the original data more accurately with less points if compared with the quadtree. If used with other geodetic data sets as GPS or levelling measurements, balanced contribution of different data sets is needed. For using InSAR measurements with GPS measurements and supplying balanced contribution to calculations, weighting is done. By using weighting and new data reduction algorithm, inverse modelling is accomplished for determining fault parameters of İzmit Earthquake for multi-layered semi half-space. The fault parameters calculated by this approach are slightly different from those parameters, taken from one of the studies done for İzmit Earthquake for one-layered semi-half space. These new parameters are compared with those old ones, and it is observed that the difference between calculated and measured deformation is smaller for new parameters compared with the old ones.

1. GİRİŞ

Yeryüzündeki noktaların konumları birçok nedene bağlı olarak değişebilir. Heyelan, yer çökmesi, yanardağ patlaması, plaka hareketleri ve depremler gibi birçok jeolojik ve jeodinamik olaylara bağlı olarak meydana gelen yer kabuğu deformasyonu önemli bir olgudur. Bu tip felaketler insan canı ve malı için önemli tehlikelerdir. İzmit Depreminde 20000, Düzce Depremi'nde ise yaklaşık 1000 insan kaybının yanında milyarlarca liralık maddi hasar meydana gelmiştir. Bu tip kayıpların en aza indirgenebilmesi için jeodezik ölçümlere ve bunların değerlendirilmesine ihtiyaç vardır.

Jeodezi ile ilgili olarak son 30-40 yıl içerisinde büyük değişimler meydana gelmiştir. İlk olarak ölçümlerin yapıldığı alanlar büyümüştür (Hanssen, 2001). Uyduların kullanılmaya başlanması, küresel referans sistemlerinin tanımlanmasını ve kullanılmasını sağlamıştır. Küresel Konumlama Sisteminin (GPS) ortaya çıkması ile birlikte jeodezi için yeni bir çağ açılmıştır.

Jeodezi bilimi, zamana bağlı olarak meydana gelen değişimleri yani deformasyonları farklı tekniklerle belirleyebilmektedir. Yeryüzündeki deformasyonların belirlenebilmesi için halen GPS tabanlı sistemler ile açı ölçerler, elektromanyetik mesafe ölçerler veya hassas nivelman gibi diğer konvansiyonel jeodezik ölçme sistemleri mevcuttur. Jeodezik tekniklerin birçoğu (açı ölçümü, kenar ölçümü, nivelman, VLBI, GPS vb.) yer yüzü deformasyonunun belirlenmesi için tekrarlı yersel ölçümlere ihtiyaç duymaktadır (Wright, 2000). Fakat bunların birçoğu nokta tabanlı ölçme sistemleri olup geniş alanların ölçülmesinde maliyeti çok fazladır. Yapay Açıklıklı Radar İnterferometrisi (InSAR), yeryüzü topoğrafyasının ve deformasyonunun belirlenmesi için yeni bir jeodezik tekniktir ve yersel ölçümlere ihtiyaç duymaz.

Yapay Açıklıklı Radar (SAR) elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesinde çalışan aktif bir uzaktan algılama sistemidir. Bu sistem uçağa veya uyduya monte

edilmiş şekilde elektromanyetik dalgalar yayınlar ve yeryüzündeki nesnelere geri yansıyan bu dalgaların genliklerini ve fazlarını kaydeder. Bu bağlamda SAR sistemi karmaşık sayılardan oluşan görüntüler oluşturur. Deprem, heyelan veya su, petrol ve gaz çıkarılması nedeniyle oluşabilecek yer çökmeleri gibi yeryüzü deformasyonları, karmaşık sayılardan oluşan SAR görüntülerinin deformasyon öncesinde ve deformasyon sonrasındaki faz bilgilerinin karşılaştırılması ile belirlenebilir. Bu yöntem; yapay açıklıklı radar interferometrisi olarak isimlendirilmektedir. Diğer jeodezik yöntemler düzensiz olarak dağılmış ve kesikli ölçüler sağlarken, InSAR, SAR görüntülerinin kapsadığı binlerce kilometrelik alan içerisinde piksel tabanlı deformasyon bilgisi sağlamaktadır (Zhou ve diğ., 2003).

Uydular yardımıyla gerçekleştirilecek radar interferometrisi ile bütün dünyayı kaplayacak kadar alansal ölçeğe kavuşulmasının yanında, yüksek çözünürlüğü de erişilmiştir. Optik alıcıların aksine gece veri toplanabildiği gibi, bulutlu alanların üstünde de ölçü yapılabilmektedir. Son 15 yıl içerisinde InSAR tekniği teorik çalışmalardan; yer bilimlerinde kabul edilmiş, birçok farklı uygulama alanı olan bir araca dönüşmüştür (Smith, 2002).

Deformasyon ölçülerinde; GPS istasyonu ölçümleri, yüksek zamansal çözünürlüğe yani zaman içerisinde çok fazla ölçüye ve 3 boyutta milimetre seviyesinde doğruluğa sahipken, alansal çözünürlüğü düşük, sabit tesislere ihtiyaç duyan bir ölçü sistemidir. Bunun karşısında InSAR yüksek konumsal çözünürlüğe sahip, uzaktan ölçen ve bir tesise ihtiyaç duymamasına karşın zamansal çözünürlüğü düşük, tek boyutta skalar ölçü sağlayan görüntü korelasyonsuzluğunun mümkün olabileceği bir tekniktir.

Birbirine göre üstünlükleri ve zayıflıkları olan bu iki jeodezik tekniğin, gözlemlerinin birleştirilip, deformasyon belirlenmesine yönelik olarak yüksek zamansal ve mekansal çözünürlüğe sahip, yüksek doğruluklu yeni bir ölçü kümesi oluşturulabilir. Bu iki veri kümesi birleştirilirken sonuç veriye dengeli katkıları sağlanmalıdır. Bir ölçü kümesinin diğerine baskın olmaması gerekmektedir.

Deprem jeodezisinin birincil amacı, fay düzlemindeki kayma dağılımının belirlenebilmesi ve yüzey deformasyonlarının modellenmesidir (Pritchard ve diğ., 2002). Mevcut jeodezik ölçüler fay düzleminde onlarca kilometre uzakta yapılmakta ve deformasyonun en büyük olduğu bölge jeodezik ölçülerle kapsanmayan bir alanda

olmaktadır. Ayrıca GPS noktaları veya nivelman hatları seyrek bir dağılım göstermekte, fay düzlemi boyunca meydana gelen kaymanın çözülmesinde yeterli olamamaktadır. InSAR bu kısıtın üstesinden gelecek yeteneğe sahiptir.

İzmit depremiyle ilgili olarak modelleme çalışmaları farklı kişiler tarafından farklı yöntemler kullanılarak değişik tarihlerde gerçekleştirilmiştir. Barbieri ve diğ.(1999) InSAR ölçülerini kullanarak, Reilinger ve diğ.(2000), GPS ve InSAR ölçülerini kullanarak, Wright ve Parson (2001a) InSAR ölçüleri yardımıyla, Feigl ve diğ. (2002) ERS-1, GPS, RADARSAT ve SPOT ölçüleri ile ayrı ayrı olarak, Cakir ve diğ. (2003) yine sadece InSAR ölçüleri ile modelleme çalışmaları gerçekleştirmiştir. Bos ve diğ. (2004) GPS ve InSAR veri setini birlikte kullanarak İzmit depremini modellemeye çalışmıştır. Bu çalışmalarda veri setleri aynı anda kullanılmamış kademeli olarak birinin sonuçları yardımıyla diğerinin sonuçları değerlendirilmiş düz ve ters modellemeler yardımıyla sonuca ulaşılmıştır.

İzmit depremi dışında Pritchard ve diğ. (2002), Şili depreminde GPS ve InSAR ölçülerini, Zhou ve diğ. (2003) InSAR ve nivelman ölçülerini birleştirmeye çalışmış fakat bütün ölçüler aynı ağırlıklı kabul edilmiştir.

Hesaplama basitliği açısından yerkabuğu bir bütün yerine yarı uzay olarak alınmaktadır. Şimdiye kadar yapılan modellemelerin çoğu bu elastik yarı uzayı tek katmanlı olarak kabul etmiş ona uygun çözümler sunmuştur. Wang ve diğ. (2003) çok katmanlı yarı uzay için Fortran tabanlı bir program geliştirmiş ve GPS ölçüleri yardımıyla İzmit depremi için uygulamıştır.

Bu tezde İzmit Depreminin deprem anı deformasyonunun modellenmesi, InSAR ve GPS birlikte kullanılarak gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. InSAR metodunun yeni olması nedeniyle, depremlere ait kaynak parametrelerinin InSAR ve GPS ölçülerinin birlikte kullanılarak belirlenmesi konusunda en iyi ve tekrar edilebilen çözümler henüz oluşturulamamıştır. Bu nedenle bu tezin büyük kısmında teknik ve metodoloji incelenmektedir. InSAR yöntemi İzmit Deprem bölgesine uygulanmış ve aşağıdaki problemlerin çözümü araştırılmıştır.

- InSAR metodunun temelleri nelerdir ve deprem parametrelerini belirlemek için nasıl kullanılmalıdır?
- InSAR metodunun hata kaynakları nelerdir?

- InSAR ölçülerinin doğruluğu nedir?
- InSAR metodu ile elde edilen ölçüler GPS ölçüleri ile birlikte nasıl kullanılır?

InSAR ölçülerinin baskın olmaması için GPS ölçülerine göre nasıl ağırlıklandırılması gerekir?

- InSAR ölçüleri nasıl seyrekleştirilebilir? Bunun için yeni bir algoritma nasıl olmalıdır?

- InSAR ve GPS ölçüleri birlikte kullanılarak tek katmanlı yarı uzay yerine çok katmanlı yarı uzayda yapılacak modellemenin sonuçlarda meydana getireceği farklar ne kadardır?

Yapay Açıklıklı Radar ile ilgili açıklamalar, bu çalışmanın ikinci bölümünde verilmiştir. Bu bölümde Yapay Açıklıklı Radarın temelleri ile ilgili teorik bilgi verilmiştir.

Üçüncü bölümde İnterferometrik Yapay açıklı radar tekniği ve tekniğin temelleri anlatılmış, hata kaynakları incelenmiş, interferogram oluşturmak için gerekli işlem adımları verilmiştir. Dördüncü bölümde İzmit Depremi için InSAR metodu uygulanmış ve sonuçlar incelenmiştir. InSAR ölçülerinden elde edilen verilerin GPS ölçüleriyle birlikte kullanılabilmesi amacıyla veri indirgenmesi ve ağırlıklandırma konusu araştırılmıştır. Ayrıca İzmit Depremi için çok katmanlı yarı uzay için ters modelleme gerçekleştirilmiş ve tek katmanlı yarı uzay için yapılan modellenmeden olan farklar incelenmiştir. Beşinci bölümde elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve sonraki çalışma konularının ne olması gerektiği ifade edilmiştir.

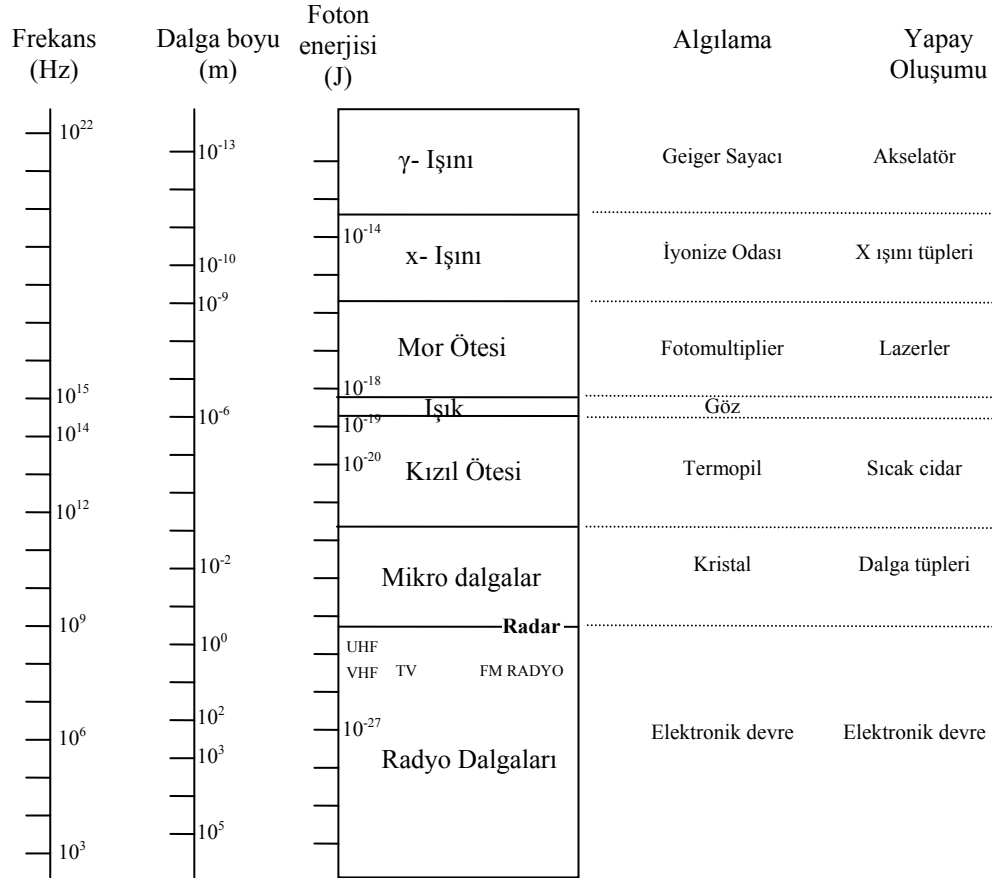
2. YAPAY AÇIKLIKLI RADAR

Elektromanyetik dalgalar, ilk olarak James Clerk Maxwell tarafından öne sürülmüş, Heinrich Hertz tarafından teyit edilmiştir. Maxwell, elektrik alan şiddetinin ve manyetik indüksiyonun uzaysal ve zamansal değişimleri arasındaki karşılıklı bağıntıları bulmuştur. Bu bağıntılar yardımıyla dalga denklemini ortaya koymuş ve elektromanyetik dalga olarak isimlendirmiştir. Kısaca elektromanyetik dalga elektrik ve manyetik alanlardan oluşan kendi başına ilerleyebilen (herhangi bir ortama ihtiyaç duymayan) dalgalardır. Elektrik ve manyetik alanlar birbirine diktir, dalganın yayılışı ise bu iki alana diktir. Elektromanyetik dalganın boşlukta yayılım hızı, ölçülen boşluktaki ışık hızıyla aynı olduğu için, Maxwell ışığın kendisinin de elektromanyetik dalga olduğunu ifade etmiştir.

Elektromanyetik radyasyon aynı anda hem dalga karakteri hem de parçacık karakterini birlikte gösterir. Dalga karakteri elektromanyetik radyasyon nispi olarak uzun zaman aralığında ve uzun mesafelerde ölçüldüğünde daha belirgindir. Parçacık karakteri ise kısa mesafelerde ve kısa zaman aralığında daha belirgindir.

Elektromanyetik spektrum milyonlarca kilometre büyüklükteki dev radyo dalgaları ile bir atom çekirdeğinden milyonlarca defa daha küçük dalga boyulu ışınları içine alır. Bu dalgalar Şekil 2.1’de verilen mikrodalgalar, morötesi, kızılötesi gibi çeşitli sınıflara ayrılırlar.

Radar, Şekil 2.1’de verilen elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesinde elektromanyetik dalga yayınlayan aktif bir sistemdir. Yeryüzünün daha önceden tespit edilemeyen özelliklerinin görüntülenmesine imkan verir. Aktif bir sistem olarak, aydınlatmasını kendi sağlar ve güneş ışığına bağlı değildir. Bu sayede gündüz/gece devamlı görüntü sağlar. Aynı zamanda bulutlar veya sis mikrodalgaları engellemez. Her hava şartında görüntüleme gerçekleştirilebilir.



Şekil 2.1: Elektromanyetik spektrum

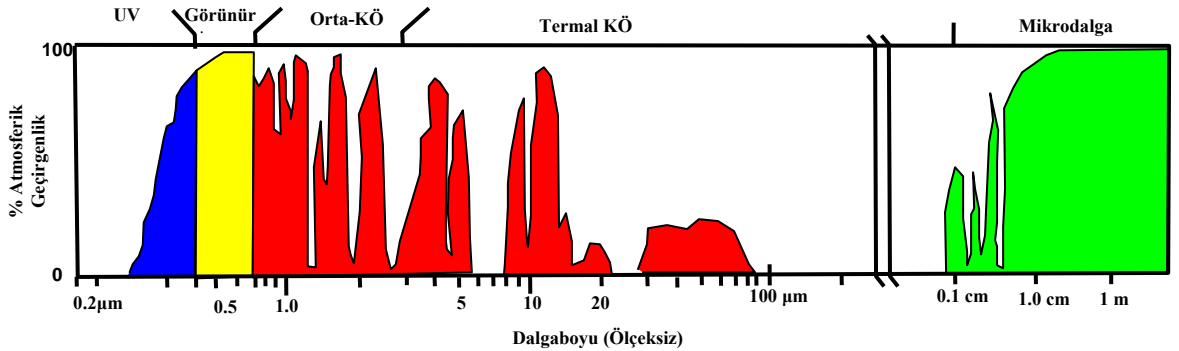
İlk görüntüleme radarları, 1950'lilerin başlarında askeri istihbarat amacıyla geliştirilmiş olan yan bakışlı radar (SLAR) sistemleridir. Görev yapan ilk SLAR'lar 50'li yılların ortasında geliştirilmiş AN/APQ-56 ve AN/APQ-55 isimli K_a bantta (2 cm dalgaboylu) çalışan sistemlerdir. SLAR aynı zamanda gerçek açıklıklı radar olarak da isimlendirilmektedir. Çünkü azimut çözünürlüğü dalga boyu ile sistemin yere olan uzaklığının çarpımının anten boyuna bölümüne eşittir.

Gerçek açıklıklı radarların bilimsel amaçlı ilk kullanımları kartoğrafik ve jeolojik haritalama amaçları içindir. SLAR kullanmanın temel dezavantajı azimut doğrultusundaki çözünürlük anten boyuyla sınırlı olmasıdır. Algılayıcıların yükseklikleri arttıkça, antenlerin fiziksel boyutları artmadığı sürece konumsal çözünürlük azalır. Görünür ve yakın kızılötesi dalga boylarında, uzaydan alınan görüntülerde bile küçük alet boyutları ile yüksek çözünürlüklü görüntüler elde etmek mümkündür. Fakat dalga boyu ışıktan 100000 kat daha büyük olan mikrodalga aletleri için, normal boyutlu antenlerle yüksek çözünürlük elde etmek mümkün

değildir. Mesela 800km’de 10 m anteni, 24 cm dalga boyu olan bir radar için gerçek açıklıklı çözünürlük yaklaşık 20 km’dir. 25 m’lik çözünürlük elde etmek için 8 km uzunluğunda antene ihtiyaç vardır. Bu olumsuzluğun üstesinden gelebilmek için Yapay Açıklıklı Radar (SAR) sistemleri geliştirilmiştir.

Yapay açıklıklı radar yansıyan sinyalin faz ve genlik bilgilerinin tutulduğu bir sistemdir. Yüksek çözünürlük, çok uzun bir antenin sinyal işlemcisinde yapay olarak yaratılmasıyla elde edilir. Sonuç olarak; SAR sistemi, algılayıcı yüksekliğinden bağımsız olarak yüksek çözünürlük elde edebilmektedir.

SAR frekansı atmosferik moleküller (oksijen ve su buharı) tarafından engellenmesi en az olacak şekilde seçilebilir. Şekil 2.2’de emilim bantları, frekansa göre atmosferik geçirimin yüzdesi olarak verilmiştir. x eksenindeki dalga boylarına göre y ekseninde ölçülen yüzde geçirgenlik verilmiştir. Yüksek geçirgenlik ışımının yeryüzü atmosferine girebilmesini sağlayan atmosferik pencereye karşılık gelmektedir.



Şekil 2.2: Atmosferik geçirgenlik

1-10 Ghz (3-30 cm) lik bölgenin geçirgenliği %100’e yaklaşmaktadır. Bu nedenle temel olarak bu frekans aralığında çalışan SAR bulut veya yağıştan etkilenmeden her zaman yeryüzünü görüntüleyebilir. Mikrodalga spektrumunda radar frekansı arttıkça atmosferik engelleme de artar. Mikrodalga spektrumu Şekil 2.3’de verilmiştir. Mikrodalga bölgesinde(1-300Ghz), nominal SAR frekans aralığı olan 1-10Ghz dir. Bu aralığın dışında atmosferik emilim bantlarında bir çok pencere mevcuttur. Altimetre ve skettrometre gibi çoğu aktif gerçek açıklıklı radar sistemleri 10-20 Ghz. bölgesinde çalışırlar. Bunlar genelde görüntüleme amaçlı olmayıp, özellikle oşinografi ve oşinografi uygulamaları için zaman serisi verisi toplamaktadırlar. Mikrodalga spektrumunun yüksek frekanslarında (30-300 Ghz) 35 Ghz,90Ghz ve

135 Ghz lik atmosferik pencere bölgeleri yüzey özelliklerinin gözlemi için uygundur. Bazı istisnalar dışında sadece mikrodalga radyometreleri gibi pasif sistemler bu bölgelerde çalışırlar. Bu algılayıcılar yüzey parlaklık ısısını (nesne tarafından yayılan ışının yoğunluğu) ölçerler.

BANT	P	L	S	C	X	K	Q	V	W
	0.39	1.55	3.9	5.75	10.9	36	46	56	
FREKANS (GHz)	0.3	1.0	3.0	10.0	30.0	100.0			
DALGABOYU (cm)	100	30	10	3	1	0.3			
TİPİK DEĞERLERİ	70	23	10	3					
	P	L	S	X		Ka			

Şekil 2.3: Mikrodalga spektrumu

Radar dalga boyunun seçimi sadece çözünürlük ve atmosferik engellemeyle ilgili değildir. Yayınlanan dalga ile yeryüzü arasındaki etkileşim büyük ölçüde dalga boyuna bağlıdır. Elektro manyetik dalgalar yüzey bileşimi ve yapısına bağlı olarak değişik şekillerde yüzeylerle etkileşirler. Mikrodalga bölgesi için, yansıyan dalganın karakteristikleri (güç, faz ve polarizasyon) büyük oranda yüzeyin elektriksel özellikleri (dielektrik sabit) ve yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır.

Bu nedenle radar dalga boyunun seçiminde atmosferik etkiler ve hedef yansıtma karakteristikleri önemli parametrelerdir. Radar dalga boyu ile pürüzlülük ve dielektrik sabit gibi yüzey karakteristikleri arasındaki ilişki gibi, yüzey özelliklerini belirlemek için kullanılacak görüntüleme geometrisi ve polarizasyon gibi başka sistem parametreleri de mevcuttur.

2.1 SAR Uydu Görevleri

1978'de fırlatılan Seasat uydusu, ilk SAR sistemi taşıyan uydudur. Mart 1991'de Sovyet yapımı S-bandında çalışan ALMAZ uydusu fırlatılmıştır. Bunu 1991 yazında fırlatılan C-bandında çalışan ERS-1 uydusu izlemiştir. Japon L-Band SAR sistemi olan JERS-1 1992'de fırlatılmıştır. Halihazırda SAR sistemi taşıyan uydu listesi Çizelge 2.1'de verilmiştir. Çizelgede ΔT tekrar periyoduna, H_{uydu} uydu yüksekliğine, f_0 taşıyıcı frekansına karşılık gelmektedir.

Çizelge 2.1: SAR uydu görevleri

İsim	Yıl	ΔT (Gün)	H_{uydu} (km)	f_0 (GHz)
Seasat	1978	3	800	1.275
SIR-B	1984	-	235	1.282
Magellan	1989-92	değ.	290-2000	2.385
ERS-1	1991-92	3	790	5.300
	1992-93	35	790	5.300
	1993-94	3	790	5.300
	1994-95	168	790	5.300
	1995- 2000	35	790	5.300
ERS-2	1995-	35	790	5.300
JERS-1	1992-98	44	568	1.275
Radarsat	1995-	24	792	5.300
SRTM	2000	0	233	5.300
	2000	0	233	5.300
ENVISAT	2001-	35	800	5.300
ALOS	2002-	45	700	1.270
Radarsat-2		24	798	5.300

2.2 SAR Teorisi

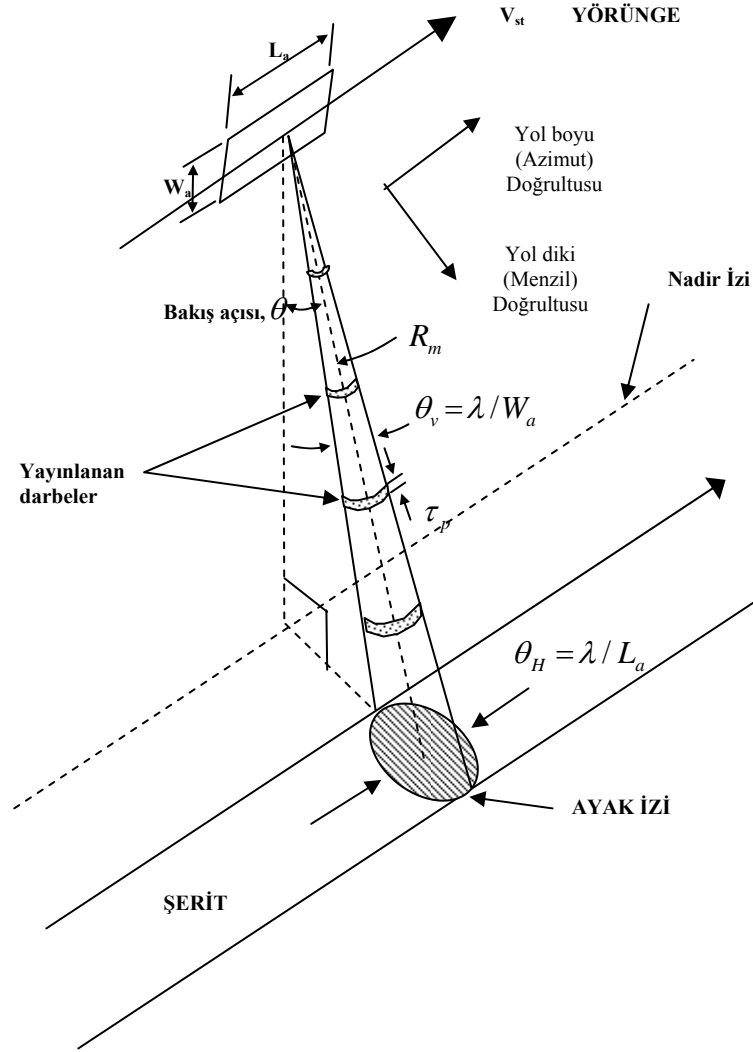
Şekil 2.4’de yan bakışlı radarın basitleştirilmiş bir geometrisi verilmiştir. Radar, sabit bir yükseklikte düz bir hat üzerinde ve V_s hızıyla hareket eden bir platformda (uçak veya uydu) taşınmaktadır. Radar ışın hüzmesinin (beam) uçuş doğrultusuna dik ve yeryüzüne doğru doğrultulmuş olduğu kabul edilmektedir. Platform ve yeryüzü arasındaki rölatif hız V_{st} dir.

Bu geometri için düşeye göre bakış açısı γ ile radar ışını ile yüzey normali arasındaki açı olan yansıma açısı η eşittir. Çünkü düz bir yeryüzü kabul edilmiştir. Radar elektro manyetik enerjiyi darbeler halinde gönderir. Yansıyan dalgalar ise daha sonra gerçekleştirilecek olan sinyal işleme için örneklenir. Radarın azimut doğrultusu uçuş doğrultusuna, menzil doğrultusu ise ona dik doğrultuya karşılık gelmektedir.

Radar ışınının W_g boyutu (yani şerit genişliği) düşey dalga genişliği θ_v ’yi belirleyen ($\theta_v = \lambda / W_a$) W_a anten yüksekliği tarafından belirlenir. Eğer R_m şeridin ortasına olan mesafe ise,

$$W_g \approx \frac{\lambda R_m}{W_a \cos \eta} \quad (2.1)$$

Radarin menzil çözünürlüğü, menzil doğrultusunda iki noktanın sistem tarafından menzil doğrultusunda ayrı olarak algılanabilmesi için gerekli minimum açıklıktır.



Şekil 2.4: Yan bakışlı radarın basitleştirilmiş geometrisi

Menzil çözünürlüğü;

$$\delta R_g = c / (2B_R \sin \eta) \quad (2.2)$$

olarak verilmektedir ve burada; B_R yayınlanan darbenin bant genişliğidir. Bu çözünürlüğü elde etmek için darbe sıkıştırma tekniği uygulanmaktadır.

SAR sisteminin diğer sistemlerden ayıran özellik azimut doğrultusundaki (uçuş doğrultusu) çözünürlüktür.

Doppler frekansı, dalga kaynağına göre rölatif harekette bulunan gözlemcinin algıladığı dalganın frekansında kaynak dalga frekansına göre meydana gelen farktır. Hareket eden radarın istikametinde birbirinden çok az farklı açılara sahip iki nesne her hangi bir anda platforma göre farklı görelî hızlara sahiptirler. Burada görelî hız hareket eden radara göre oluşacaktır. Bu nedenle, iki nesneden yansıyan radar dalgası iki farklı Doppler frekans kayıklığına sahip olacaktır. Herhangi bir anda radarın kaydettiği sinyal analiz edilirse, doppler frekansı algılanan detayın koordinatıyla ilintilidir. Bu sayede, detaylar aynı R mesafesinde ve aynı ışın demeti içerisinde olsalar dahi yansıyan sinyalin Doppler frekans spektrumu analiz edilerek bir birinden ayrılabilirler.

Doppler frekansının (f_{D_0}) ve darbe zaman gecikmesi (darbenin gönderilip alınması arasında geçen zaman) ile birlikte kullanılmasıyla detayların iki boyutlu olarak konumlarının belirlenmesi mümkün olmaktadır. $\tau_0 = 2R(0)/c$ darbe gecikmesi bir çembere, f_{D_0} ise hiperbole karşılık gelmektedir. Bu iki şekil R_g menzîl düzleminde x yol mesafesinde dört noktada kesişir (Şekil 2.5). Sağ/sol belirsizliği, radar ışınının doğrultulduğu tarafı bildiğimiz için kolayca çözülür. Hiperbolin kolları ise Doppler kayıklığının işareti ile belirlenir.

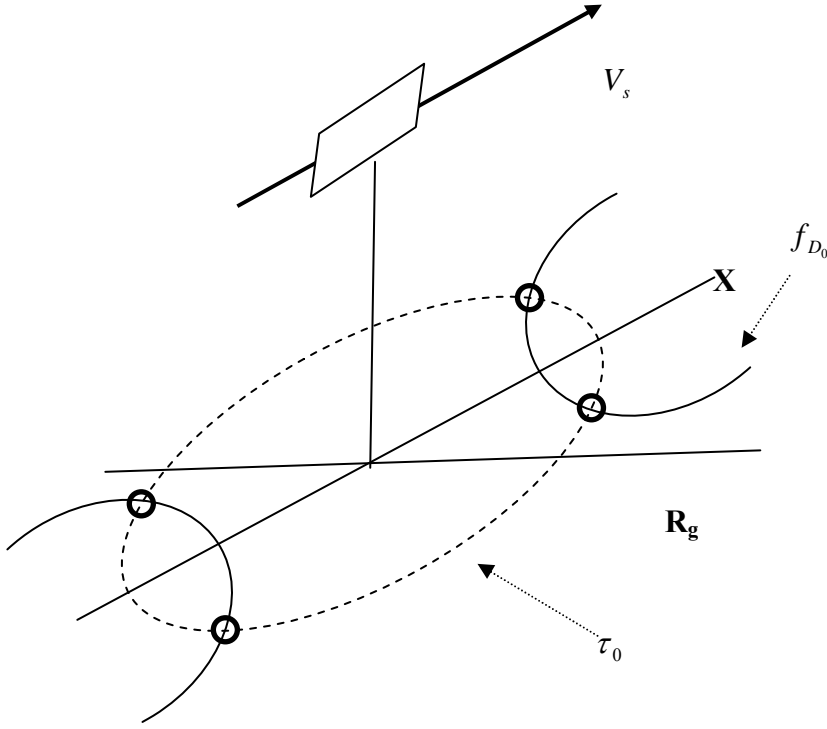
Bu durumda azimut doğrultusundaki çözünürlük;

$$\delta x = \left(\frac{\lambda R}{2V_{st}} \right) \left(\frac{L_a V_{st}}{R \lambda} \right) = L_a / 2 \quad (2.3)$$

olarak verilmektedir ve burada; V_{st} , rölatif hız, L_a , radar antenin uçuş doğrultusundaki boyu, R , radar hedef arası eğik mesafe, λ , dalga boyuna karşılık gelmektedir.

Gerçek açıklıklı radarların tam tersi olan bu duruma göre, antenler küçüldükçe daha iyi çözünürlükler elde etmek mümkündür. Fakat aynı zamanda menzîl doğrultusundaki konumun da ölçülmesi gerekliliği azimut çözünürlüğüne sınır

getirmektedir. Radar darbe göndererek çalışmaktadır. Darbe gönderildiğinde, radar yansıyan dalgaları almak için dinlemeye geçer. Belirli bir darbe için şerit üzerindeki herhangi bir noktadan mümkün olan en kısa zamanda gelen yansıma, bir önceki darbeden üzerindeki herhangi bir noktadan mümkün olan en geç zamanda gelen yansımadan daha sonra olmalıdır. Aksi halde önceki darbe yansımasının kuyruğuna mevcut darbe tarafından görüntülenen alandaki yakın nokta eklenmiş olacaktır.



Şekil 2.5: Menzil gecikmesi ve doppler kayıklığının detayların konumlandırılması için kullanılması

2.3 SAR Tek Bakışlı Karmaşık Görüntüsü ve Formatı

SAR sistemi, tek bakışlı karmaşık görüntü (Single look complex image) üretebilmektedir. İnterferometrik çalışmalarda bu görüntü kullanılır. Bu görüntüde yansıyan sinyalin faz ve genlik bilgisi saklanır.

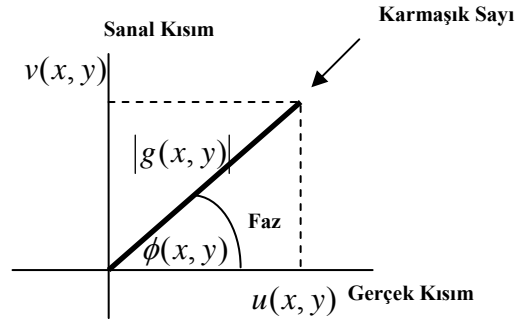
Tek bakışlı karmaşık görüntü (TBKG)'deki genlik bilgisi, radarın aydınlattığı alandaki yansıtma karakteristiğini gösterir. Yansıtma karakteristiği temelde yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır. Eğer yüzey pürüzsüzse, radara geri yansıma olmayacağı için görüntüde koyu, pürüzlüyse açık renkli görülecektir.

Görüntüde bir piksele karşılık gelen alan içerisindeki bütün detayların yansımasının toplamı, o pikselin yansıma değerini oluşturmaktadır. Bazı durumlarda aynı yer için

bu toplam birbirini söndürmekte piksel koyu gözükmekte, bazı durumlarda ise tam aksi durum yaşanabilmektedir. Bu değişkenliğe benek denmektedir. Bunun giderilmesi için komşu piksellerin ortalaması alınmaktadır.

TBKG'deki faz bilgisi, yeryüzüne olan mesafeye, atmosfere ve yeryüzüyle etkileşime bağlı olarak oluşabilecek faz kayıklığına bağımlı bir değerdir.

TBKG'de, yeryüzünün görüntüsü düzgün grid yapıda karmaşık sayılardan oluşur $g(x, y)$. Karmaşık sayılar gerçek (R) ve sanal (I) kısım veya kosinüs ve sinüs bileşenler ile ifade edilmektedir. Eğer bir dalga karmaşık sayılarla ifade edilecekse $A*(\cos(\omega t) + i*\sin(\omega t))$ gösteriminde ω dalganın frekansını, A ise genliğini ifade eder. Kosinüs değeri gerçek kısmı, sinüs değeri sanal kısmı ifade eder ve $\tan^{-1}(\sin/\cos)$ faza karşılık gelmektedir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6: Karmaşık Sayılar

SAR sinyali karmaşık sayılarla şu şekilde de ifade edilebilir:

$$g(x, y) = u(x, y) + iv(x, y) \quad (2.4)$$

Karmaşık sayının $u(x, y)$ gerçek, $v(x, y)$ ise sanal kısmıdır. Karmaşık sayılar genlik $|g(x, y)|$ ve faz $\phi(x, y)$ cinsinden de ifade edilebilirler:

$$g(x, y) = |g(x, y)|e^{i\phi(x, y)} \quad (2.5)$$

Genlik

$$|g(x, y)| = \sqrt{u^2(x, y) + v^2(x, y)} \quad (2.6)$$

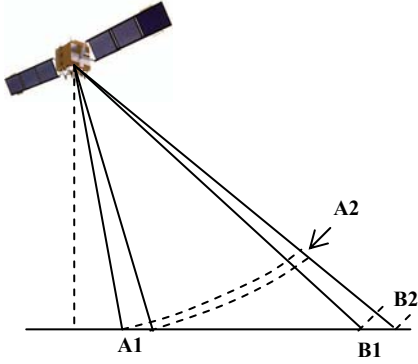
olarak hesaplanabilmekte, faz;

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{v(x, y)}{u(x, y)} \quad (2.7)$$

olarak verilmektedir.

2.4 Radar Görüntü Hataları

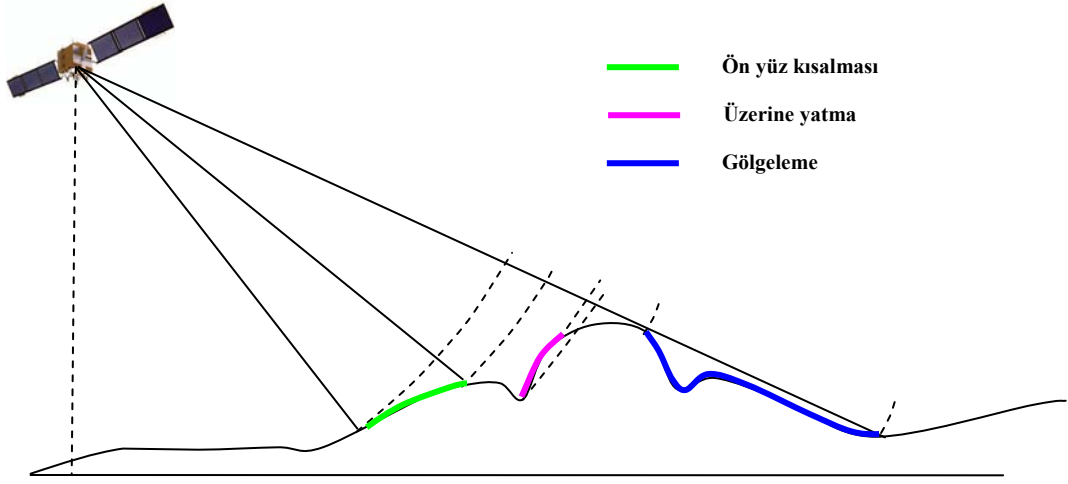
Her uzaktan algılama sisteminde olduğu gibi, radarın görüntüleme geometrisinden dolayı sonuç görüntüde belirli geometrik bozulmalar oluşmaktadır. Fakat radarın yana bakan geometrisinden dolayı önemli farklar bulunmaktadır. Temel olarak radar mesafe ölçen bir alettir. Bu nedenle eğik-mesafe ölçek bozulması oluşmaktadır. Çünkü radar detaylara olan eğik mesafeleri ölçmektedir. Bu değişen görüntü ölçeğine sebep olmaktadır (Şekil 2.7). Yeryüzünde uzunlukları aynı olan A1 ve B1 aralığı radar tarafından aynı uzunlukta algılanmamaktadır. Trigonometri yardımıyla, eğik mesafe ile platform yüksekliği kullanılarak eğik-mesafe ölçek bozulması giderilebilmektedir.



Şekil 2.7: Eğik-mesafe ölçek bozulması

Radar dalgası, radara dönük yüksek bir detayın (mesela dağ) zirvesinden önce eteklerine ulaşıyorsa önyüz kısalması oluşur. Radar eğik mesafe ölçtüğü için, eğim sıkıştırılmış gösterilir ve eğimin uzunluğu yanlış görülür (Şekil 2.8).

Dağın eğimiyle ilişkili olarak radar dalgasının bakış açısına bağımlı olarak, önyüz kısalmasının derecesi değişir. Maksimum önyüz kısalması radar dalgası eğime dik olduğu zaman oluşur. Taban ve zirve aynı anda görüntülenmektedir. Önyüz kısalmasından etkilenen eğimler açık tonlarda görülür.



Şekil 2.8: Radar görüntü hataları

Radar dalgası radara dönük yüksek bir detayın (mesela dağ) tabanından önce zirvesine ulaşıyorsa üzerine yatma oluşur (Şekil 2.8). Zirveden geri dönen sinyal tabandan gelen sinyalden daha önce alınır. Sonuç olarak dağın zirvesi tabanından daha önce görülür.

Radar aydınlatmasından uzağındaki eğim, algılayıcının bakış açısından daha dikse gölgeler oluşturur (Şekil 2.8). Aynı boydaki iki nesnenin radar gölgeleri karşılaştırıldığında uzakta olanınki yakında olana göre daha uzundur. Gölge alanlar koyu gözükür (sıfır sinyal). Bu bölgedeki herhangi bir sinyal değişimi sistem gürültüsünden kaynaklanır.

3. İNTERFEROMETRİK YAPAY AÇIKLIKLI RADAR

InSAR veya radar interferometrisi, iki veya daha fazla SAR görüntüsünün doğru bir topografya belirlenmesi veya deformasyon bilgisi elde edilmesi için bir araya getirilmesini ifade etmektedir (Rees, 1999). İnterferometri terimi girişim kelimesinden türetilmiştir. InSAR, girişim olgusunun yapay açıklıklı radarla birleştirildiği bir metottur. 20 yıldan az bir süre içerisinde InSAR; teoriden, bir çok bilim dalında uygulanan bir tekniğe dönüşmüştür (Burgmann ve diğ., 2000).

3.1 Radar İnterferometrisinin Tarihi

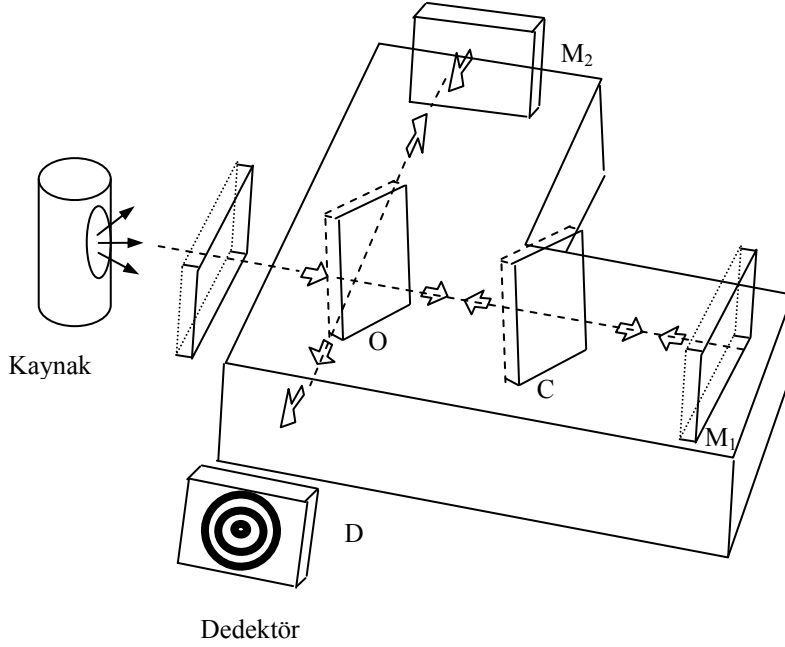
Radar interferometrisi, ikinci dünya savaşından sonra gelişmiştir. Radar interferometrisinin dayandığı temel Michelson interferometrisidir.

Dalgalar birbiriyle etkileşirler ve etkileşim sonucu, etkileşime giren dalgaların durumlarına bağlıdır. Etkileşim yapıcı (güçlendirici) toplam veya söndürücü toplam olarak ikiye ayrılır. Yapıcı etkileşimde dalgalar hemen hemen aynı faza sahiptir ve genlikleri toplandığında daha büyük bir genlik elde edilir. Söndürücü etkileşimde ise dalgalar birbirine göre kayık (yaklaşık $\lambda/2$) fazdadır ve genlikleri toplandığında birbirini yok etme eğilimindedir. Dalgaların etkileşimine girişim denir.

Michelson interferometrisinde ışık, bir ışın bölücü yardımı ile ikiye ayrılır. Farklı yollardan giden ışıklar tekrar birleştirilir. Farklı yollardan giderken meydana gelen optik yol farkı, birleşme esnasında girişimlere neden olur.

Şekil 3.1'de görüldüğü gibi bir ışın bölücüde (yarı parlatılmış ayna), ikiye ayrılır. Işık dalgalarından biri, o ışın bölücüsünde yansıyor, M_2 aynasından geri dönüp ekrana gelir. Diğer ışık dalgası ise ışın bölücüden geçtikten sonra M_1 aynasından ve ışın bölücüden yansarak ekrana ulaşır. O noktasından itibaren gidip gelen ışınların optik yolları arasında bir fark varsa ekranda girişim çizgileri veya saçığı görülecektir. Çizgilerin bir kısmı koyu bir kısmı ise açık renktedir. Koyu renkli girişimler söndürücü toplamın olduğu yerlerdir. Yani iki dalga birbirini söndürmektedir. Fazları birbirlerinin aksi istikametindedir. Parlak çizgiler yapıcı

girişimin olduğu yerlerdir ve genlikler birbiriyle toplanır. Bu açık ve koyu çizgilerden oluşan desene, genel anlamda girişim deseni (interferometrik fringes) denmektedir.



Şekil 3.1 : Michelson interferometrisi

Uçakta taşınan sistemlerle yapılan ilk interferometri çalışması, topografik haritalama için ABD silahlı kuvvetleri tarafından gerçekleştirilmiştir. İlk olarak Graham 1974 yılında bu yöntemin sonuçları yayınlamıştır. Araziden yansıyan sinyalleri alabilmek için dikey olarak ayrılmış iki anten kullanmıştır. Çift antenli (tek geçişli) interferometri 80li yıllarda sayısal işleme teknikleri yardımıyla olgunlaşmıştır (Hanssen, 2001).

Zebker ve Goldstein (1986) her bir pikselin, faz farkının alındığı interferogramlar oluşturmuştur. Bu çalışmada 10x11 km'lik bir alanın 10m ile 30m arasında bir doğrulukta topoğrafik haritası elde edilmiştir. İnterferometrinin tekrar geçişli metod kullanılarak uydu verisi ile kullanılabilirliği, 1988 yılında Gabriel ve Goldstein (1988) tarafından SIR-B uydu verisi kullanılarak gösterilmiştir. Tekrar geçişli interferometride görüntüler eş zamanlı olarak alınmamakta, radarın aynı bölgeden her geçişinde bir görüntü alınmaktadır.

Radar interferometrisi ilk yıllarında genelde topografyanın oluşturulması için kullanılmasına rağmen, 1989 yılında deformasyon belirlemek için

kullanılabileceğine dair ilk fikirler öne sürülmüştür. Gabriel ve diğ. (1989) üç geçişli diferansiyel interferometri yardımıyla topografyada meydana gelen değişimlerin tespit edilebileceğini öne sürmüşleridir. Çalışmalarında Güney Kaliforniya'da tarım alanı üzerindeki Seasat-L band görüntülerini kullanmışlar, sulamadan sonra bu alanda 1 cm'lik yükseklik farkı tespit etmişlerdir. Bu yöntemde üç SAR görüntüsünden iki interferogram oluşturulmuş, iki interferogramdan bir tanesinin sadece topografik sinyal taşıdığı diğerinin ise hem topografik hem de deformasyon sinyali taşıdığı varsayılarak iki interferogramın farkı alınarak deformasyon belirlenmeye çalışılmıştır.

1991'de ESA tarafından ERS'in fırlatılmasından sonra; deprem, volkanlar, heyelan, petrol çıkarma ve yer altı patlatmaları gibi yeryüzündeki hareketleri haritalamak için InSAR tekniği birçok bilimadamı tarafından bir çok çalışmada kullanılmıştır. Sadece deniz yüzeyi gözlemleri için tasarlanmasına rağmen, ERS1 görüntüleriyle yapılan InSAR uygulamalarıyla ilgili olarak birçok makale yayınlanmıştır.

Gabriel tarafından 1989'da uygulanan yöntemde Sayısal Yükseklik Modeline (SYM) ihtiyaç duyulmazken, bir sayısal yükseklik modeli yardımıyla 2 görüntü kullanılarak deformasyon belirlenmesi Massonnet ve diğ. (1993) tarafından Landers depremine uygulanmıştır. Aynı deprem için üç geçişli interferometri uygulamasını Zebker ve diğ. (1994) gerçekleştirmiştir.

Massonnet ve diğ. (1994) eğer çalışılacak alan kurak ve bozulmamışsa bir yıl aralıklı alınan görüntülerle interferogram oluşturulabileceğini göstermiştir.

1995'de ERS2 uydusunun fırlatılmasından sonra, ERS1 ve ERS2 uydusunun tandem yani birbiri ardına hareket edecek şekilde kullanımı sayesinde uzaydan SAR interferometrisinin kullanım alanları genişlemiştir. ERS1 uydusu MART 2000'de ömrünü tamamlamıştır ve planlanan süresinden 6 yıl fazla görev yapmıştır.

Bu uygulamaların sonucunda elde edilen interferogramların kalitesini etkileyen bir çok faktör vardır. İnterferometride korelasyonsuzluk iki görüntü alımı sırasındaki farklı atmosferik koşullardan, yörüngeden, çok değişken topografyadan kaynaklanabilir. Zamana bağlı meydana gelebilecek korelasyonsuzluğun üstesinden gelmek için Ferretti ve diğ. (2000), Ferretti ve diğ. (2001) sabit yansıtıcı metodunu ortaya koymuştur. Bu yöntemde zaman içerisinde tutarlı ve her zaman için görüntüde fark edilebilecek doğal veya insan yapısı sabit nesnelerin kullanılması temeline

dayanır. Bu sabit noktalarda interferogram analiz edilerek SYM hatası, atmosferik etkiler hesaplanmıştır. Bu metot Landers depremi için Lyons ve Sandwell (2003) tarafından geliştirilmiştir.

InSAR'da en zor işlemlerden biri faz çözümleridir. Özellikle korelasyonsuz olan bölgeler için problem oluşturmaktadır. Sandwell ve Price (1998), interferogramlar ile yüzey deformasyonu belirlemek için faz çözülmesi yerine faz gradyentinin kullanıldığı yeni bir yöntem geliştirmiştir.

3.2 İnterferometrik SAR Tekniği

SAR sistemleri Bölüm 3.1'de açıklandığı gibi yansıyan sinyallerden hem faz hem de genlik bilgisi taşıyan tek bakışlı karmaşık görüntü (TBKG) oluşturabilmektedir. Bu görüntüdeki faz bilgisi, yeryüzüne olan mesafeye, atmosfere ve yeryüzüyle etkileşime bağlı olarak oluşabilecek faz kayıklığına bağımlı bir değerdir. SAR interferometrisinde TBKG'ler kullanılmaktadır.

Michelson interferometresindeki esaslar SAR interferometrisine uygulanmıştır. SAR interferometrisi gerçekleştirmek için iki SAR görüntüsüne ihtiyaç vardır. Bu görüntülerden ilki Asıl anlamında A harfi ile isimlendirilecek, ikinci görüntü ise Eşlenik anlamında E harfi ile isimlendirilecektir. Uyduda taşınan yan bakışlı yapay açıklıklı radar sistemi yörüngesinde ilerleyip, bir şeridi görüntülerken, yeryüzünden yansıyan radar dalgalarının genlik ve faz bilgilerini kaydeder (Zebker ve diğ., 1994). Radar görüntülerindeki her bir piksel için ölçülen faz bilgisi, radarın gönderdiği dalganın gidiş-dönüş mesafesi ile dalganın yüzey ile etkileşimine bağlı olarak oluşan fazın toplamına eşittir.

Radar interferometrisinin temeli iki farklı radar görüntüsünün fazlarının karşılaştırılmasıdır. İki radar sistemi S_A ve S_E noktalarından aynı bölgeyi gözlemlensin (Şekil 3.2). Bu durumda, iki radar sisteminin SAR görüntülerinin karmaşık sayılarla ifadesi;

$$g_A(x, y) \cong |g_A(x, y)| \exp\{i\phi_A\} ; \phi_A = \frac{4\pi R_A(x, y)}{\lambda} \quad (3.1)$$

$$g_E(x, y) \cong |g_E(x, y)| \exp\{i\phi_E\} ; \phi_E = \frac{4\pi R_E(x, y)}{\lambda} \quad (3.2)$$

olarak verilmektedir.

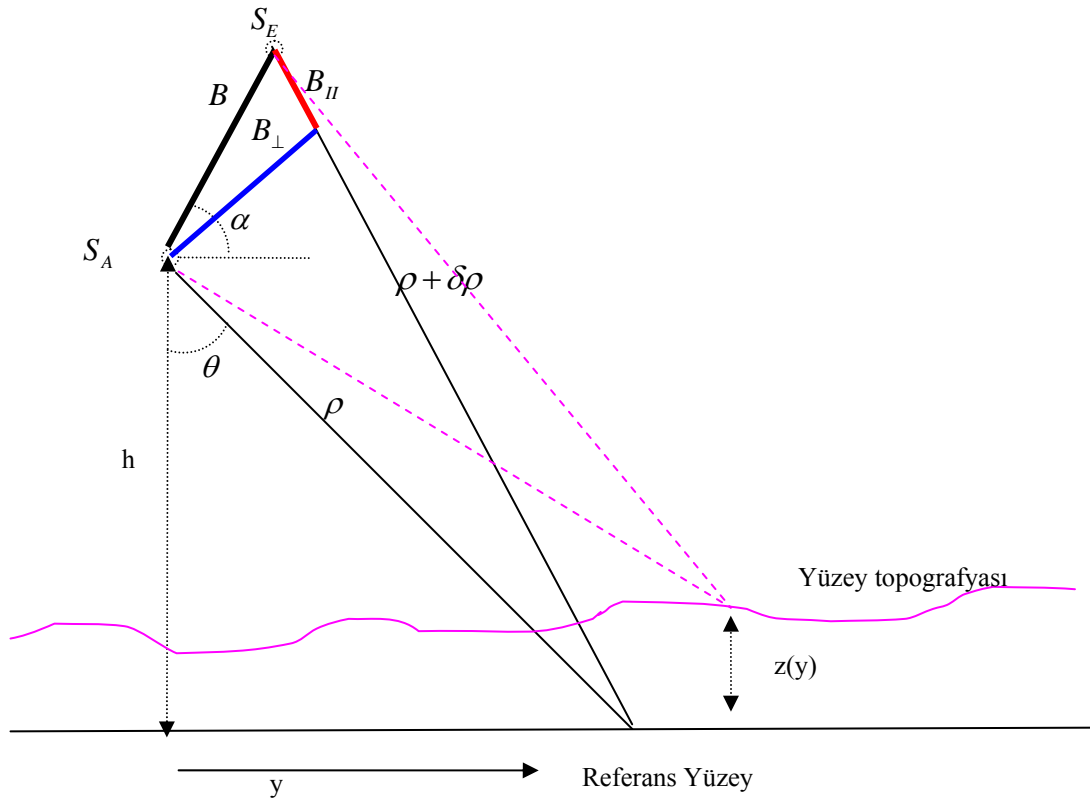
$|g_A(x, y)|$ ve $|g_E(x, y)|$ yeryüzünün yansıtma karakteristiğini ifade eden genlik bilgisi, R_A ve R_E yeryüzündeki belirli bir noktaya olan mesafe, λ ise dalgaboyudur.

Eşlenik görüntü, asıl görüntüde kendisine karşılık gelen noktalara göre konumlandırılıp yeniden örneklendikten sonra iki görüntüdeki verilerin birbirine girişimi sağlanabilir. Bunun için asıl görüntünün kompleks değerleri $g_A(x, y)$, eşlenik görüntünün kompleks eşleniği (conjugate) ile $g_E^*(x, y)$ çarpılırsa.

$$g_A(x, y) \cdot g_E^*(x, y) \cong |g_A(x, y)| |g_E(x, y)| \exp\{i(\phi_A - \phi_E)\} \quad (3.3)$$

olur.

Bu çarpımın sonucu kompleks interferogramdır. Görüntüdeki her bir piksele karşılık gelen yeryüzündeki alan iki görüntü çekimi sırasında da aynı şekilde davranış gösterirse yani $|g_A(x, y)| \cong |g_E(x, y)|$, iki görüntü arasındaki faz farkı saçılma olgusuna bağımlı olmaz, sadece geometrik farklılığa bağımlı faz farkı değeri 2π 'nin modülü şeklinde kalır (Zebker ve diğ., 1994).



Şekil 3.2: İnterferometri geometrisi

Yani aynı bölgenin iki radar görüntüsünün faz değerlerinin farkı alınır ve yer yüzünün geri yansıtma karakteristiği değişmemişse, rasgele katkılar gider ve bu faz farkı sadece iki radar geçişi arasında meydana gelen mesafe değişimine ve atmosferik mesafe gecikmesindeki farktan oluşur (Wright, 2000).

Mesafede ve bu nedenle fazda meydana gelen değişimlerin nedeni görüntüleme geometrisi, topografya, yeryüzü küreselliği ve yeryüzü deformasyonundan kaynaklanmaktadır.

3.2.1 Görüntüleme geometrisinin faz farkına olan katkısı

Eğer iki görüntü çekim noktasından yeryüzündeki aynı noktaya olan mesafeler ρ ve $\rho + \delta\rho$ olarak alınır, ölçülen faz farkı;

$$\phi = \phi_A - \phi_E = \frac{4\pi}{\lambda} \delta\rho \quad (3.4)$$

olur. 4π olmasının nedeni gidiş dönüş mesafesini dikkate almak içindir. Kosinüs teoremi yardımıyla $\delta\rho$ görüntüleme geometrisi ile ilişkilendirilebilir ve;

$$(\rho + \delta\rho)^2 = \rho^2 + B^2 - 2\rho B \sin(\theta - \alpha) \quad (3.5)$$

olur. Burada; B , baz mesafesine, yeryüzündeki noktaya olan mesafe, ρ ; bakış açısı θ ; bazın alıcısındaki yatay düzlem ile yaptığı açı α dir. ($\delta\rho$) terimleri çok küçük olduğu için ihmal edilirse;

$$\delta\rho \approx B \sin(\theta - \alpha) + \frac{B^2}{2\rho} \quad (3.6)$$

yazılabilir.

Uyduda taşınan sistemler için eşitliğin sağındaki ikinci terim de ihmal edilebilir. Bu durumda.;

$$\delta\rho \approx B \sin(\theta - \alpha) \quad (3.7)$$

veya

$$\delta\rho \approx B_{II} \quad (3.8)$$

bulunur. Burada;

$B_{||} = B \sin(\theta - \alpha)$, bazın bakış doğrultusuna paralel bileşenidir.

Eşitlik 3.7'de görüldüğü gibi, ölçülen faz farkı, bazın bakış açısına paralel bileşenine bağlıdır. Faz farkı cinsinden eşitlik;

$$\phi = \frac{4\pi B \sin(\theta - \alpha)}{\lambda} \quad (3.9)$$

olur.

Şekil 3.2'de verildiği gibi yüzey sabit alınırsa yani nokta referans yüzey üzerinde ise faz farkının bakış açısına göre değişimi;

$$\frac{\partial \phi}{\partial \theta} = \frac{4\pi \cos(\theta - \alpha)}{\lambda} \quad (3.10)$$

elde edilir. Şekilden; $B_{\perp} = B \cos(\theta - \alpha)$, bazın bakış doğrultusuna dik bileşenidir.

Buradan,

$$\frac{\partial \phi}{\partial \theta} = \frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda} \quad (3.11)$$

elde edilir.

Bu nedenle radar şeridi boyunca θ değiştikçe, basit olarak 2 antenin B_{\perp} dik baz mesafesine bağımlı olarak faz değişimi oluşacaktır. Yani iki görüntü alımı sırasındaki baz mesafesinin dik bileşeninin büyüklüğüne bağlı olarak görüntü üzerindeki her bir pikselde bakış açısına bağlı olarak faz farkı oluşacaktır. Bu faz farkı yörünge bilgisi yardımıyla hesaplanabilir ve sonuç interferogramdan çıkartılabilir.

3.2.2 Küreselliğin etkisi

Topografyanın olmadığı durumda, yani yeryüzünde dağ, tepe, dere gibi hiçbir topografik detayın olmaması durumunda bile, interferogramın fazında, dünyanın küreselliğinden dolayı faz oluşacaktır. Küresel dünya etkisi;

$$\phi_{flat} = \frac{4\pi}{\lambda} [B \sin(\theta - \alpha) - B \sin(\theta_0 - \alpha)] \quad (3.12)$$

olarak verilmektedir (Zebker ve diğ., 1994).

Burada; θ_0 , görüntüdeki her bir noktaya düzlem üzerinde olması durumunda ölçülecek bakış açısıdır.

3.2.3 Yüzey topoğrafyası kaynaklı faz

Eğer yüzey düz değilse yani yüzeyde topografya mevcutsa, gözlenen faz farkına katkısı olacaktır. Yüzey topografyası faz değişimine şu şekilde ilişkilendirilebilir. Şekil 3.2'den;

$$\begin{aligned} z(\rho, \theta) &= h - \rho \cos \theta \\ \frac{\partial z}{\partial \theta} &= \rho \sin \theta \end{aligned} \quad (3.13)$$

yazılır. Eşitlik :3.11'den;

$$\frac{\partial \phi}{\partial \theta} = \frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda} \quad (3.14)$$

ile birlikte,

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{4\pi B_{\perp}}{\rho \lambda \sin \theta} \quad (3.15)$$

olur. Fazda 2π değişime yol açacak topografya büyüklüğü, yükseklik belirsizliği (h_a) olarak tanımlanırsa;

$$\begin{aligned} h_a &= \frac{\partial z}{\partial \phi} \cdot (2\pi) \\ h_a &= \frac{\rho \lambda \sin \theta}{2B_{\perp}} \end{aligned} \quad (3.16)$$

olur. Düzeltme yapılmadığı sürece, eğer bir interferogramın B_{\perp} değeri sıfır değilse, topoğrafyaya bağlı girişim çizgileri olacaktır. Bu girişim çizgileri, h_a aralığında kontur çizgileri gibi görünecektir. ERS için $h_a \approx 10^4 / B_{\perp}$ alınabilir. Bunun anlamı eğer uydular birbirinden 100 m uzaktaysa, topografyanın her ~100 metresi için bir girişim çizgisi oluşacaktır. Bu etki InSAR'dan topografik modellerin çıkarılması için kullanılmaktadır. Deformasyonun belirlenmesi için, topografik fazın giderilmesi gerekmektedir. Bu da genellikle Sayısal Yükseklik Modeli kullanılarak yapılır. Eğer

B_{\perp} değerleri küçük olursa büyük h_a değerleri elde etmek mümkün olacak ve yüzey değişim ölçümlerinde topografik hataların etkisi azalacaktır.

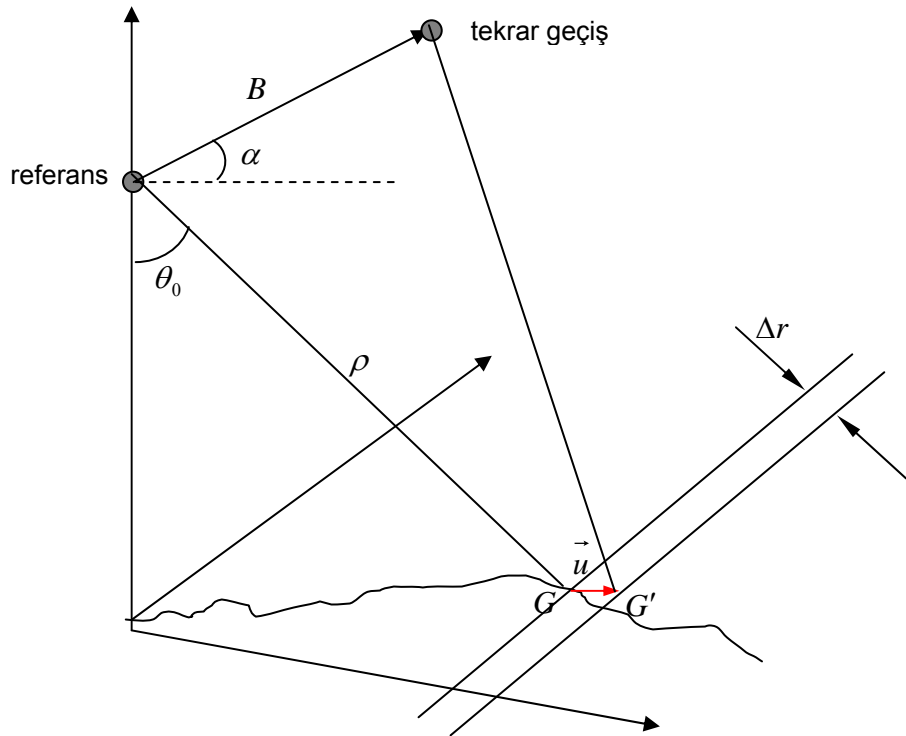
3.2.4 Yüzey deformasyonu

Eğer görüntüleme geometrisi ve yüzey topografyası nedeniyle oluşacak faz etkileri giderilirse, geriye atmosferik gecikme ve yüzey deformasyonu nedeniyle oluşacak faz farkı kalacaktır.

Yüzey deformasyonu nedeniyle, Şekil 3.3'deki G noktası G' noktasına deforme olmuşsa bu deformasyon radar yer arasındaki mesafede Δr , fazda ise $\Delta\phi$ değişime neden olacaktır. Δr ; yeryüzü yer değiştirme vektörü \vec{u} 'nun uydunun bakış doğrultusundaki bileşenidir ve

$$\Delta\phi = \frac{4\pi\Delta r}{\lambda} = -\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)\vec{n} \cdot \vec{u} \quad (3.17)$$

olur. Burada \vec{n} , gözlem noktasından uyduyu gösteren birim vektördür.



Şekil 3.3: InSAR deformasyon modeli

Bu nedenle, yer değiştirme vektörünün, uydu bakış doğrultusundaki bileşeninde $(\vec{n} \cdot \vec{u}) \lambda/2$ büyüklüğünde (ERS uydusu için 2.8 cm) bir değişim, $\Delta\phi = 2\pi$ büyüklüğünde girişim çizgisi oluşturacaktır.

3.2.5 Atmosferik düzensizlikleri ve atmosferik gecikme

İnterferogramın fazına bir etki de atmosferdeki değişimlerden gelmektedir. Eğer atmosfer zamansal olarak durağan ve konumsal olarak homojen ise, atmosferden dolayı oluşacak ek faz gecikmesi bütün interferogram boyunca sabit olacaktır. Ancak, gerçekte bu duruma pek rastlanmamaktadır ve bu durum yüzey deformasyonu çalışmalarının doğruluğunu sınırlamaktadır. Atmosfer kaynaklı faz bir çok değişik Şekil alabilir. Etna yanardağında yapılan bir çalışmada 6 ± 3 cm.lik atmosferik gecikmeler hesaplanmıştır (Delacourt ve diğ., 1998).

Farklı zamanlarda alınan görüntüler için atmosferik koşullar aynı olmayacağı için alıcı ile yer arasında ölçülen mesafe, troposferik ve iyonosferik etkiler nedeniyle oluşacak gecikmeden dolayı farklılaşacaktır. Herhangi bir atmosferik farklılaşma, interferogram içerisinde faz bozulması olarak kendini gösterecektir ve sonuçların güvenilirliğini azaltacaktır.

Hava balonları ve yüzey verisi troposferik etkinin belirlenip çıkarılabilmesi için uygun bir yöntemdir fakat genelde ilgilenilen bölge için yeterli miktarda veri yoktur. Yerden meteoroloji ve GPS ölçüleri troposferik gecikmenin tespiti ve radar kalibrasyonu için kullanılabilir (Bonforte ve diğ., 2001; Williams ve diğ., 1998).

İyonosferik etkinin radar ölçülerinden ayıklanması zordur. GPS'de kullanıldığı gibi iki farklı frekanstaki faz ölçüleri iyonosferik katkıyı giderebilir. Bu yaklaşım için iki farklı frekanstaki radar görüntüsünün aynı anda alınmasına ihtiyaç vardır. Fakat bu Şekilde bir radar sistemi halihazırda mevcut değildir.

3.3 İnterferogramların Kalitesi

3.3.1 Uyumluluk

İki kompleks SAR görüntüsü g_A ve g_E arasındaki kompleks uyumluluk γ (kompleks korelasyon katsayısı);

$$\gamma = \frac{E\{g_A g_E^*\}}{\sqrt{E\{|g_A|^2\}E\{|g_E|^2\}}} \quad (3.18)$$

olarak verilmektedir(Lee ve diğ., 1994). Burada; $E\{ \}$ beklenen değeri ifade eder.

Uyumluluk; birbirine karşılık gelen iki faz sinyalinin korelasyon ölçütüdür. Bu değer interferogramın her bir pikseli için hesaplanabilir. Bu değerlerden oluşan matris uyumluluk haritası denmektedir. 0 ile 1 arasında değer alır. 0 hiçbir korelasyonun olmadığını ifade eder. 1 ise bütün faz değerlerinin aynı olduğunu gösterir.

3.3.2 Uyumsuzluk (korelasyonsuzluk) nedenleri

İnterferometrik faz bir çok faktörden etkilenip korelasyonunu kaybedebilir. Korelasyonsuzluk interferometrik fazdaki gürültü oranını arttırmakta, bu nedenle deformasyon belirleme veya SYM oluşturma yeteneğini kısıtlamaktadır. Korelasyonsuzluk nedenleri; termal korelasyonsuzluk, zamansal korelasyonsuzluk, geometrik korelasyonsuzluk, doppler merkezi korelasyonsuzluğu, veri işleme kaynaklı korelasyonsuzluk olarak sıralanabilirler (Hanssen, 2001).

Korelasyonsuzluk etkenleri birlikte düşünüldüğünde çarpan etkisine sahiptir. Toplam korelasyon aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Zebker ve Villasenor, 1992).

$$\mathcal{Y}_{toplam} = \mathcal{Y}_{termal} \cdot \mathcal{Y}_{zamansal} \cdot \mathcal{Y}_{geometrik} \cdot \mathcal{Y}_{dopplermerkezi} \cdot \mathcal{Y}_{proses} \quad (3.19)$$

3.3.2.1 Termal korelasyonsuzluk

Termal gürültünün interferometrik faza olan etkisi algılayıcı sistemin “sinyal gürültü oranı” (SNR) ile ifade edilebilir. Buna göre;

$$\mathcal{Y}_{termal} = \frac{1}{1 + SNR^{-1}} \quad (3.20)$$

$$SNR = \frac{P_S}{P_N} \quad (3.21)$$

olarak verilmektedir. P_S ;sinyalin gücü, P_N ;gürültünün gücüne karşılık gelmektedir. SNR değeri genelde radar sisteminin tasarımıyla ilgilidir.

3.3.2.2 Zamansal korelasyonsuzluk

Zamansal korelasyonsuzluk $\gamma_{zamansal}$; tekrar geçişli interferometri esnasında oluşabilir ve radar interferometrisinin en önemli kısıtlarından birisidir. Bu durum, görüntü alımları arasında pikselin faz yansıtma karakterinde değişim meydana gelmesi durumunda ortaya çıkar ve anlamsız faz ölçümlerine yol açar. Bunun olduğu bölgeleri belirlemek mümkündür. Çünkü interferogramdaki komşu pikseller birbirinden çok farklı faz değerlerine sahiptirler. Uyuşumdan uzaktırlar.

Zamana bağımlı korelasyonsuzluk, yüzey tipine bağımlı olarak değişik zaman ölçeklerinde meydana gelebilir. Görüntüler bir gün arayla alınsa bile su kütleleri her zaman için tutarsızdır çünkü suyun yüzeyi devamlı olarak değişmektedir. Su yüzeyi tamamen düz olsa bile, bütün enerji radar anteninin uzağına yansıtacak ve hiçbir faz bilgisi alınamayacaktır. Ormanlık alanlar da aynı zamanda C-band için stabil değildir. Çünkü örtü içerisinde meydana gelen birçok yansıma, hacimsel yansıma etkisine sebep olmaktadır. Tarım alanları ise kısa zaman aralıklarında tutarlıdır fakat zaman uzadıkça tutarsızlaşır (mesela tarım alanı sürülür). En tutarlı alanlar çıplak kayalık alanlar ve şehirlerdir. Her ikisi de uzun süre durağan kalabilirler. Kurak veya yarı kurak alanlar da aynı zamanda yüzey değişimi belirlemek için interferometri tekniğinin kullanılabilmesi için uygun alanlardır. Zamansal korelasyonsuzluğun analitik olarak modellenmesi mümkün değildir.

3.3.2.3 Geometrik korelasyonsuzluk

Lee ve Liu geometrik baz korelasyonsuzluğunun $\gamma_{geometrik}$ fonksiyonunu oluşturmuşlardır(Lee ve diğ., 1999). Buna göre yeryüzü eğimi ve iki görüntü arasındaki baz mesafesinin dik bileşenine bağlı olarak korelasyon sınırını belirleyen fonksiyon;

$$\gamma_{geometrik} = 1 - \frac{cB_{\perp}}{\lambda RB_w} |\cot(\theta_0 - \alpha_t)| \quad (3.22)$$

olarak verilmektedir. Burada; c ; ışık hızı, θ_0 ; nominal eğim açısı, B_{\perp} ; metre cinsinden dik baz mesafesi, α_t ; bölgesel arazi eğimi, B_w ; yayınlanan sinyalin dalga genişliğidir.

Korelasyonun tamamen yitirilip interferometrinin yapılamadığı dik baz mesafesi sınırı;

$$B_{\perp} = \frac{\lambda B_w R}{c} \tan(\theta_0 - \alpha_t) \quad (3.23)$$

ile bulunur.

ERS-1/2 ve ENVISAT uyduları için bu değer yaklaşık olarak 1100 m dir. Bu değerden daha büyük dik baz mesafesine sahip görüntülerle interferometrik çalışma yapmak mümkün değildir.

3.3.2.4 Doppler merkezi korelasyonsuzluğu

Asıl ve eşlenik görüntülerin Doppler merkezi frekanslarındaki fark ($\Delta f_{DM} = f_{DM}^A - f_{DM}^E$) doppler merkezi korelasyonsuzluğuna $\gamma_{dopplermerkezi}$ neden olmaktadır. Bu değeri;

$$\gamma_{dopmer} = \begin{cases} 1 - \frac{\Delta f_{dm}}{B_A} & \text{eger } |\Delta f_{dm}| \leq B_A \\ 0 & \text{eger } |\Delta f_{dm}| > B_A \end{cases} \quad (3.24)$$

olarak verilmektedir. Burada; B_A ; azimut doğrultusundaki dalga genişliğidir. Bu nedenle Δf_{DM} 'nin büyük değerleri korelasyonsuzluğu arttıracaktır.

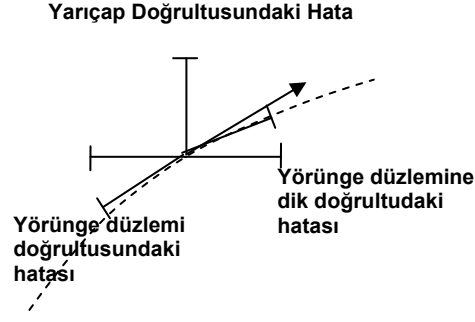
3.3.2.5 Veri işleme kaynaklı korelasyonsuzluk

İnterferometri işlemi sırasında görüntülerin yanlış eşlemesi, veri işleme kaynaklı korelasyonsuzluk γ_{proses} isimli ek bir gürültü kaynağı yaratmaktadır.

3.3.3 Yörünge hataları

İnterferometrik bazın belirlenebilmesi ve interferometrik verilerin referans datumla ilişkilendirilebilmeleri için uydu yörünge bilgilerine ihtiyaç vardır. Yörünge bilgilerinde herhangi bir hata doğrudan SYM veya deformasyon haritalarında hataya sebep olacaktır.

Yörünge durum vektöründeki hata üç bileşene ayrılabilir. Bu bileşenler; yarıçap vektörü doğrultusunda (σ_R), yörünge düzleminde (σ_A) ve yörünge düzlemine dik (σ_X) doğrultudadır (Şekil 3.4) (Hanssen, 2001).

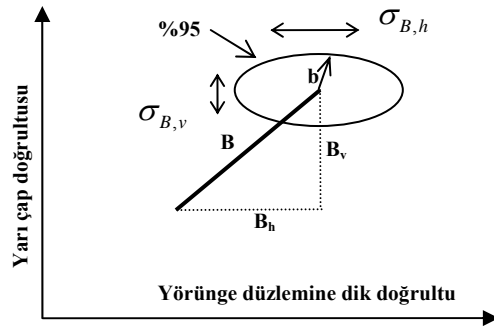


Şekil 3.4: Yörünge durum vektörü

Hanssen'e göre σ_A ana ve eşlenik görüntünün bir birine eşlenmesi sırasında (coregistration) düzeltilmekte ve interferogram fazına etkisi kalmamaktadır (Hanssen, 2001). Bu nedenle problem iki boyutlu olarak kalmaktadır. Ana ve eşlenik görüntülerin yörüngelerindeki hataların birbiriyle korelasyonsuz olduğu kabul edilirse, hatalar doğrudan,

$$\begin{aligned}\sigma_{B,h} &= \sqrt{\sigma_{A,X}^2 + \sigma_{E,X}^2} \\ \sigma_{B,v} &= \sqrt{\sigma_{A,R}^2 + \sigma_{E,R}^2}\end{aligned}\tag{3.25}$$

bağıntıları kadar baz uzunluğunu etkileyecektir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5: Hataların ilerlemesi

Güven aralığı %95'e çıkarılırsa, baz hatası b Şekil 3.5'deki hata elipsinin içerisinde kalacaktır. b hatasının sadece uzunluğu bilindiği için yani yöneltmesiyle ilgili bir bilgi olmadığı için bu hatanın interferogram üzerindeki etkisi her türlü davranışta olabilir. b yörünge hatası fazda bir sistematik etkinin oluşmasına sebep olmakta ve b

vektörünün yol-diki eksenini ile yaptığı açının 0 ve π olduğu durumlarda etkisi maksimum olmakta $\pm \frac{\pi}{2}$ 'de ise ihmal edilebilir seviyeye inmektedir.

Yörünge hatalarının, β yöneltmesine $y = |\vec{y}|$ uzunluğuna sahip \vec{y} hata bazına sebep olduğu kabul edilirse, neden olacağı topografik hata Eşitlik :3.3'den ;

$$dH = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{R \sin \theta y_{\perp}}{(B_{\perp}^0)^2} \varphi = H^0 \frac{y_{\perp}}{B_{\perp}^0} \quad (3.26)$$

bulunur. Burada; H^0 ; mevcut yörünge bilgisi kullanılarak elde edilen yükseklik, B_{\perp}^0 ; mevcut verilerden hesaplanan dik baz mesafesi, y_{\perp} ; yörünge hataları nedeniyle oluşan hata vektörünün yörünge düzlemine dik doğrultudaki bileşenidir.

3.4 İnterferometrik Veri İşleme Adımları

SAR verisinden; interferogram ve yer uyumlu yani koordinatlandırılmış ürünler elde etmek için işlem adımları sırasıyla incelenecektir. İnterferometrik işlem adımlarına tek-bakışlı karmaşık görüntü (TBKG) ile başlanabilir. Bu ürün uyduyu işleten firmadan temin edilebilir. Bu ürün işlenmiştir. Fakat genellikle ham SAR verisi tercih edilir çünkü daha ucuzdurlar, işlenmesi için zamana ihtiyaç olmayacağı için görüntü alımından kısa bir süre sonra temin edilebilirler ve ham veri olduğu için üzerinde her türlü işlem gerçekleştirilebilirler.

3.4.1 Görüntü seçimi

Bir çok uygun SAR görüntüsünün olduğu varsayılırsa görüntü seçimi radar interferometrisinin uygulamasında muhtemelen en önemli kararlardan birisidir (Hanssen, 2001). İşimize yarayan bir interferogram oluşturabilmek için radar görüntülerinin seçimi, istediğimiz görüntülerin olup olmaması, tarihleri ve yörünge bilgilerini içeren birçok kriteri içerir (Massonet ve Feigl, 1998) .

Sensör tipi, veri uygunluğu, zamansal ve mekansal baz dağılımı, arazinin ve atmosferin görüntü alımı sırasındaki karakterlerini dikkate alınarak görüntü seçimi gerçekleştirilir (Hanssen, 2001).

Sensör ve platform karakteristikleri; dalga boyu, SNR (sinyal gürültü oranı), yörünge eğimi ve tekrar periyodu gibi önemli parametreleri içerir. Buna bağlı olarak

sinyallerin hava şartlarına duyarlılığı, elde edilecek interferogramın topografya ve deformasyon kaynaklı girişim çizgi yoğunluğunu etkileyecektir.

SAR uyduları için, alımı yapılmış görüntüler arasında dolaşmayı sağlayacak uygun araçlar mevcuttur. ESA tarafından ücretsiz olarak dağıtımı yapılan descw ve eolisa isimli yazılımlar bunlara örnektir. Bu yazılımlar ile istenilen tarihleri kapsayan uygun veri çifti veya seçilen görüntülerin amaca uygun interferometrik çift oluşturup oluşturmadıkları kontrol edilebilir.

Veri seçimindeki son dikkate alınacak husus, beklenen atmosferik etkilerdir. Atmosferin durumu hakkındaki bilgi uydu görüntülerinden veya yer bazlı meteorolojik veriden elde edilebilir (Hanssen, 2001).

3.4.2 Ön işlemler

Hem yapılacak işlemlerin her aşamasına hakim olmak, hem de daha ucuz olan ham radar verisi yani “Seviye 0” verisi seçilmişse, verinin ön işlemlere tabi tutulması gerekmektedir. Bu aşamada, ham veriden görüntü oluşturulması işlemleri gerçekleştirilmektedir.

Veri merkezlerindeki arşivleme işlemi sırasında bozuk veri satırları silinmiş olabilir. Bu eksik satırlar interferogram oluşturmada görüntülerin birbirine eşleştirilmesi sırasında problem yaratacağı için eksik satırlar bir önceki ve sonraki satırlar alınarak tamamlanırlar.

Yeryüzünden yansıyan radar dalgası menzil örnekleme frekansı ile örnekleme penceresi başlangıç zamanından itibaren (Sampling Window Start time- SWST) örneklenir. Arazinin topografik yüksekliği değiştiğinde SWST de değişebilir. Yani SWST dalganın gidiş-dönüş zamanına göre farklılık gösterebilir. Görüntü oluşturma sırasında sabit bir SWST ile çalışmak gerekmektedir. Bu nedenle ham verideki en küçük SWST tespit edilir ve bu değerden büyükler için 0 değerli satırlar eklenir .

Örneklenen radar yansıması karmaşık sayı olarak tutulmaktadır. Bu sayıların gerçek ve sanal kısımlarının ortalamaları birbirinden ayrı olarak ortalamaları 0 olacak şekilde verideki kayıklıklar giderilir ve veri ötelenir.

Görüntü oluşturmada gerekli olacak sistem parametreleri veriden elde edilir. Bir çok parametre uydu yörünge efemerisinden çıkarılır. Bunlar uydu konum ve hızı, referans yüzeyden yükseklik ve yer yüzü yarıçapıdır.

Menzil-Doppler işlemcisi yardımıyla Bölüm:2'de anlatılan esaslar yardımıyla ham veriden TBKG görüntüsü elde edilir.

3.4.3 Görüntülerin eşleştirilmesi ve interferogramın oluşturulması

Görüntüler oluşturulduktan sonra, ana ve eşlenik görüntüler bir birine henüz eşlenmemiştir. Görüntü eşleme; her bir yer noktasının iki görüntüde de aynı konumda olacak şekilde geometrik görüntü dönüşüm fonksiyonunun oluşturulması ve eşlenik görüntünün buna göre yeniden örneklenmesi olarak ifade edilebilir (Franceschetti ve Lanari, 1999). İki görüntü birbirine pikselden daha küçük oranlarda uyumlu hale getirilir yani eşlenirler. Bu aşama interferometrik veri işleme için çok gerekli olan bir işlemdir. Bu işlem genelde kaba ve hassas olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmektedir.

Kaba eşlemede, ana ve eşlenik görüntü arasında azimut ve menzil doğrultularındaki kayıklık birkaç piksel doğruluğunda hesaplar. Bu ya gözle yada hassas uydu yörünge ve zaman bilgileri kullanılarak gerçekleştirilir. Bunun için, her bir görüntüdeki pikselin konumu, uydu yörünge bilgisi, uydunun hızı kullanılarak yaklaşık 25-50 m doğruluğunda belirlenir. İki görüntüdeki aynı piksellerin koordinatları kullanılarak azimut ve menzil doğrultusundaki kayıklıklar kabaca hesaplanabilir.

Hassas eşlemede, ise kaba eşlemeden çıkan kayıklıklar da kullanılarak pikselin alt seviyelerine kadar eşleme gerçekleştirilebilir. İki görüntünün genliklerinin karelerinin çapraz- korelasyonu genelde kullanılan yöntemdir. Korelasyonun tepe yaptığı yer görüntülerin azimut ve menzil doğrultusunda kayıklık vektörünü bulmaya yardımcı olur (Gabriel ve Goldstein, 1988). Yeterli derecede korelasyona sahip görüntüler için, kayıklık miktarı piksel büyüklüğünün 1/20'si kadar hesaplanabilir. Bu azimut doğrultusunda 20 cm ve menzil doğrultusunda 1 m'ye karşılık gelmektedir (Hanssen, 2001). Elde edilen kayıklıklar yardımıyla, iki boyutlu bir polinom oluşturulur ve bu polinom yardımıyla eşlenik görüntüdeki her bir piksel için referans görüntüdeki karşılığı bulunur.

Referans görüntüdeki x,y konumundaki pikselin eşlenik görüntüdeki karşılığı menzil doğrultusundaki kayıklık Δm ve azimut doğrultusundaki kayıklık Δa ile hesaplanabilir. Bu kayıklıklara ait polinomlar;

$$\Delta m = C_1^m + C_2^m x + C_3^m y + C_4^m xy + C_5^m x^2 + C_6^m y^2 + C_7^m xy^2 + C_8^m x^2 y + C_9^m x^3 + C_{10}^m y^3 \quad (3.27)$$

$$\Delta a = C_1^a + C_2^a x + C_3^a y + C_4^a xy + C_5^a x^2 + C_6^a y^2 + C_7^a xy^2 + C_8^a x^2 y + C_9^a x^3 + C_{10}^a y^3 \quad (3.28)$$

olarak verilmektedir (Buckley, 2000). Burada C_i^m menzil kayıklığıyla ilgili katsayılar, C_i^a azimut kayıklığıyla ilgili katsayılardır.

Eşlenik görüntüdeki piksel değerleri yeniden örneklenir. Yani eşlenik görüntüdeki pikseller ana görüntüde hangi piksele karşılık geliyorsa onun konum değerini alırlar.

İki radar görüntüsü alımı sırasındaki bakış açılarının farklılığı iki radar görüntüsü arasında spektral kayıklık oluşmasına neden olmaktadır. Spektral kayıklığın sebebi nesne spektrumu ile veri spektrumu arasındaki farktır (Hanssen, 2001). Nesne spektrumu yeryüzünün yansıtma karakteristiği olup yeryüzündeki nesnelerin özelliklerine bağlıdır ve görüntüleme sisteminden bağımsızdır. Bunun karşılığında veri spektrumu görüntüleme sisteminin özelliğini yansıtmakta olup nesne spektrumunun ölçülebilir bant genişliğiyle sınırlıdır. Spektral kayıklık, radarın iki geçişi esnasındaki farklı bakış açılarıyla görüntü alınmasından kaynaklanır. Farklı bakış açıları nedeniyle faz farkı meydana gelecek, iki görüntünün frekansları farklı aralıklara taşınmış olacaktır. Bu nedenle, iki görüntüdeki farklı frekans spektrasının çakışmayan kısımları sonuç interferogramda gürültüye neden olmaktadır. Bu da SNR oranının düşmesine sonuçta da iki görüntü arasındaki korelasyonun azalmasına neden olmaktadır. Bu olumsuzluğun giderilebilmesi için SAR görüntülerine interferogram oluşturulmadan önce filtre uygulanmaktadır. Bu filtreye apriori- filtre ismi verilmektedir. Menzil doğrultusunda bu işlem, her bir görüntünün diğerinin spektral kayıklığının yarısı kadar ötelenmesi ile giderilir.

Azimut doğrultusunda farklı bir yöntem izlenir. Azimut filtreleme tekniği yardımıyla iki radar görüntüsünün Doppler frekanslarının birbirinden çok farklı olduğu durumlarda azimut görüntü spektrumunun birbiri üzerine çakışmayan bölgelerinden kurtulmak için kullanılabilir.

İnterferogram yukarıda ifade edilen işlemlerden geçmiş iki kompleks görüntüye ait piksellerin eşlenik çarpımı sonucu elde edilir. İnterferometrik faz görüntüsü ile

birlikte, interferometrik uyuşum (coherence) görüntüsü de elde edilir. Uyuşum görüntüsü iki görüntünün bir biri ile ne kadar uyuşum gösterdiğini ifade eder ve sonuç interferogramın kalitesiyle doğrudan ilgilidir. Sonuç interferogram, çok bakışlı prosese tabi tutulur. Yani azimut ve menzil doğrultusundaki komşu piksellerden belli saydakilerin ortalamaları alınarak yeni bir interferogram oluşturulur. Bu görüntüdeki Bölüm:2.3’de ifade edilen benekleri azaltarak SNR oranını iyileştirir. Fakat bu işlem konumsal çözünürlüğü düşürmektedir.

3.4.4 Baz hesaplaması ve elipsoitten kaynaklanan fazın giderilmesi

Oluşturulan interferogram topografik ve deformasyon sinyalini taşımaya rağmen, interferogramdaki baskın sinyal yeryüzü elipsoidinden kaynaklanmaktadır. Bu sinyalin giderilmesinden önce interferometrik bazın hassas hesaplanmasına ihtiyaç vardır.

Radar interferometrisinin önemli konularından biri de interferometrik bazın tanımlanması, hesaplanması ve uygulanmasıdır. İnterferometrik baz herhangi bir hedef görüntülenirken anten faz merkezleri arasındaki mesafedir ve ,

$$\vec{t} = \vec{p}_1 + \rho_1 \vec{l}_1 = \vec{p}_2 + \rho_2 \vec{l}_2$$

$$\vec{b} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1 = \rho_1 \vec{l}_1 - \rho_2 \vec{l}_2 \quad (3.29)$$

olarak bulunur (Buckley, 2000). Burada; \vec{t} , hedefe ait konum vektörü, \vec{p}_i ; anten i ’nin faz merkezi, ρ_i ; i anteninin hedefe olan mesafesi, \vec{l}_i ; i anteninden hedefe olan birim bakış vektörü, \vec{b} ise baz vektörüdür.

Topoğrafyanın interferometrik faza ne kadar etki yaptığı, interferometrik baza bağlıdır. Yani interferometrik bazda yapılacak hata, interferogramda artık topoğrafik girişim çizgilerine sebep olacaktır.

İnterferometrik baz hesabı için ilk olarak her bir görüntü için lokal bir koordinat sisteminde hedefe olan birim bakış vektörleri hesaplanır. Tanımlanan birim vektörler, görüntü alım parametreleri yardımıyla birbiri cinsinden ifade edilirler ve hedefe bağlı olarak bir baz mesafesi modeli, Eşitlik:3.29’dan hesaplanır.

Elipsoit veya referans yüzeyinin interferometrik faza katkısı vardır. Bu nedenle, interferometrik baz modeli oluşturulduktan sonra referans yüzey nedeniyle oluşan faz

interferogramdan çıkarılır. Baz modeli kullanılarak her bir piksel için iki görüntünün çekim noktaları belirlenir ve bunlar için referans yüzeyinin oluşturması beklenen faz değerleri, uydunun yüksekliği ve yeryüzü yarıçapı (küresel dünya için) parametreleri de dikkate alınarak hesaplanır. Bu faz bilgisinden yararlanılarak, karmaşık sayılardan oluşan bir interferogram oluşturulur ve mevcut interferogramdan çıkarılır ve düzleştirilmiş interferogram elde edilmiş olur.

3.4.5 Filtreleme

İnterferogramın kalitesinin yani sinyal gürültü oranının artırılabilmesi için uygulanan filtrelemedir. Farklı yazılımlar farklı filtreler uygulamasına rağmen, bu çalışmada; Goldstein ve Werner (1998) tarafından geliştirilmiş olan “adaptif filtresi” kullanılmıştır. Bu filtre spektrumun genlik değerlerini kullanarak interferogramın spektrumunu küçük parçalar halinde yumuşatmaktadır. Bu filtrelemenin temelinde, görüntü içerisinde gürültünün diğer sinyallere göre görece olarak düşük genliğe sahip olduğu kabul edilip düşük genlikli sinyaller bastırılmakta, spektrumdaki asıl sinyalin ise görece olarak büyük bir genliğe sahip olduğu düşünülüp büyük genlikler zenginleştirilmektedir. Bu filtreleme için filtrelemenin derecesi bir parametre olup, bastırılacak sinyal seviyesini ifade etmektedir. Düşük filtreleme derecesi daha az filtreleme uygularken, filtreleme seviyesi arttıkça bastırılan sinyal genliği de artmaktadır.

3.4.6 Faz açılması (unwrapping) ve mutlak faz belirlemesi

İnterferometride, topografik yükseklik ve deformasyon miktarı ile doğrudan ilişkilendirilebilecek şey mutlak interferometrik fazdır. Bununla birlikte, ölçülen interferometrik faz, mutlak interferometrik fazın 2π 'ye göre modudur. Ölçülen fazdan mutlak faza varabilmek için, faz açılmasına ve mutlak faz belirlenmesine ihtiyaç vardır.

Faz çözülmesi için birçok değişik metod mevcuttur. Bunlar; residue-tabanlı algoritmalar (Goldstein ve Werner, 1998), en küçük kareleri kullanan algoritmalar (Ghiglia ve Romero, 1994), (Ghiglia ve Romero, 1996) ve minimal maliyet akışı algoritmaları (Chen ve Zebker, 2000) olarak sıralanabilir. Bütün algoritmalar, ilk önce ölçülen fazı ayrıştırmakta daha sonra çözülmüş faza erişebilmek için ayrışmadan sonra kalan faz gradyentini (komşu fazlar arasındaki faz farkını) kullanmaktadır. Algoritmalar, ölçülen fazda meydana gelen kesikliklerle nasıl başa

çıktıkları konusunda birbirinden ayrılmaktadırlar. Residue-tabalı algoritmalar, residue denilen fazın kesildiği alanları belirleyip faz çözülme bölgesini sınırlayarak işlemi gerçekleştirmekte, en küçük kareler algoritmaları ise çeşitli faz devamlılık ve yumuşatma parametreleri kullanarak faz gradyentini kullanmaktadır.

Faz çözülmesinden sonra, çözülmüş fazı, mutlak fazla ilişkilendirebilmek için faz kayıklığı hesaplanmalıdır. Bununla ilgili birçok yöntem olmakla birlikte en fazla kullanılanı, yer kontrol noktası yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda bilinen konumlardaki yükseklik ölçüleri, çözülmüş fazlarla birlikte değerlendirilerek faz kayıklığı hesaplanır.

3.4.7 Deformasyonun belirlenmesi

Radar interferometrisinde; deformasyon, topoğrafik etkinin interferogramdan giderilmesi ile elde edilir. Bu işlem faz çözülmeden önce gerçekleştirilir.

İki geçişli interferometride yani ilk geçişte referans görüntünün ikinci geçişte ise deformasyon içeren eşlenik görüntünün alındığı durumda, topoğrafya interferometri yardımıyla oluşturulamayacağı için Sayısal Yükseklik Modeline (SYM) ihtiyaç vardır.

Kullanılacak olan SYM, üzerinde çalışan interferograma göre örnekleme aralığı ve yöneltmesi daha farklı olabilir. Bu nedenle SYM'nin interferograma göre eşlenmesi ve örneklenmesi gerekmektedir.

İlk olarak SYM'nin uygun radar geometrisine örneklenmesi gerçekleştirilir. Aynı zamanda çıktı piksellere SYM yüksekliği radar görüntü datumu ile SYM datumu arasındaki fark giderilerek atanır.

SYM'nin radar koordinatlarına simüle edilmesinden sonra, bu simülasyon interferogram ile eşlenir.

SYM'nin interferogram ile eşlenmesi gerçekleştirildikten sonra, interferogramdan topografya çıkarılır. Topografyanın çıkarılması, referans yüzeyinin etkisinin çıkarılması ile benzerdir. Buradaki hesaplar referans yüzeyine göre değil topoğrafik yüzeye göre gerçekleştirilir.

Topografyanın katkısı giderildikten sonra interferogramın fazı çözülebilir ve mutlak anlamda uydu bakış doğrultusundaki deformasyon miktarı hesaplanabilir.

3.4.8 Topografyanın üretilmesi

Eğer amaç deformasyon belirlemek değil de topoğrafyanın üretimi ise, interferometrik faz kendisiyle ilgili olan topografik yüksekliğe dönüştürülür. Bu interferometrik faz dönüşümü için farklı yöntemler mevcuttur (Rodriguez ve Martin, 1992). Temelde faz çözümü gerçekleştirildikten sonra, baz modeli hassas olarak tekrar hesaplanır. Bu aşamadan sonra yükseklik belirsizliği denklemleri kullanılarak topografik yüksekliklerin elde edilmesi mümkündür. Bu üretim için deformasyon içermeyen görüntülere ihtiyaç vardır.

3.4.9 Verilerin konumla ilişkilendirilmesi (geocoding)

Burada amaç, radar koordinatlarından (menzil, azimut, yükseklik)'den jeodezik referans sistemine (Φ, Λ, h) dönüşümdür (Hanssen, 2001). Bunun için üç boyutlu Helmert dönüşümü kullanılır. Gölgeleme gibi hatalar nedeniyle verisi olmayan yerleri ait yapılan dönüşümde h değeri elde edilemeyecektir. Bu sebepten düzgün bir grid veri elde etmek için dönüşümden sonra delaunay üçgenlemesi ve lineer enterpolasyon ile tekrar örnekleme gerçekleştirilir.

3.5 İnterferometrik Yapay Açıklı Radar'ın Uygulama Alanları

InSAR tekniğinin uygulama alanları yüzey hareketlerinin belirlenmesi ve diğer uygulamalar olarak ikiye ayrılabilir.

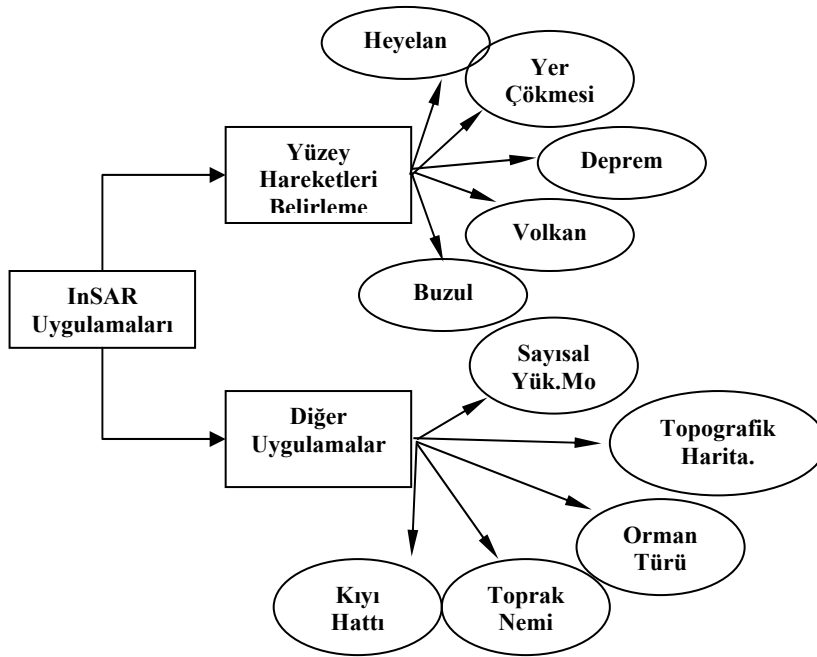
Yüzey hareketlerinin içerisinde heyelan, yer çökmeleri, depremle ilgili olarak meydana gelen yer değiştirmeler, volkanik hareketler ve buzul hareketlerini belirlemeyi sayabiliriz. Diğer uygulama alanları içerisinde sayısal yükseklik modeli oluşturma, topografik haritalama, orman türü belirleme, toprak nemi belirleme ve kıyı hattı belirleme çalışmaları yer almaktadır (Şekil 3.6).

3.5.1 Heyelan belirleme

Yüksek hızlı heyelanların belirlenmesi görüntü korelasyonunun düşük olması nedeniyle zordur. Fakat düşük hızlı kaymalarda korelasyon göreceli olarak korunabileceğinden, heyelan nedenli deformasyonların belirlenebilmesi mümkündür. Fruneau, Güney Fransa'da Nice yakınındaki "La Clapieri" heyelanını InSAR yöntemiyle belirlemeye çalışmıştır (Fruneau ve diğ., 1996). 1991 yılında çekilmiş ERS-1 görüntüleri kullanılmış ve heyelan belirlenmiştir.

Sighroy ve diğ. (1998) Kanada’da Fraser vadisinde benzer bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışma sonucunda RADARSAT SAR görüntülerinden elde edilen interferogramların heyelanların önemli bileşenlerini belirlemek için kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Rott ve Siegel (1999) InSAR yöntemini Alplerdeki kütle hareketlerini ve tehlikeli bölgeleri belirlemek için kullanmıştır. Refice ve diğ. (2000), InSAR tekniğinin çok küçük bir bölgedeki heyelan çalışmalarına uygulanabilirliği hava şartlarıyla sınırlı olduğu öne sürmüştür.



Şekil 3.6: InSAR’ın uygulama alanları

3.5.2 Yer çökmesi belirleme

Yer çökmesi doğal veya insan kaynaklı olarak yerin çökmesi veya batması olarak ikiye ayrılır. Yer altı sularında çözülebilen maddelerin çözülmesiyle yer altında oluşan boşluklara yeryüzünün çökmesine doğal çökme olarak ifade edilebilir. Halihazırda, çoğu çökme insan kaynaklıdır ve yer altı madenciliği sonucunda oluşur. Yer çökmesinin takibi tehlikeleri öngörmek ve önleyebilmek için önemlidir.

Wright ve Stow (1999), İngiltere’de Selby ve Çek Cumhuriyeti’nde Silesain kömür alanlarında kömür çıkarılması nedeniyle oluşan çökmeleri InSAR yöntemiyle

ölçmüştür. Amelung ve diğ. (1999) Las Vegas'ta devamlı olarak çekilen yer altı suyu nedeniyle oluşan yer çökmesini belirlemiştir.

Wegmüller ve diğ. (2000) yüzey madenciliği nedeniyle oluşan deformasyonun belirlenmesi için önemli bir metod olduğunu göstermiştir. Wegmüller ve diğ. (2000) InSAR'ın en kısıtlayıcı tarafının zamansal korelasyonsuzluk olduğunu ifade etmiştir.

Popiolek ve diğ. (2002), InSAR ile yüzey madenciliğiyle ilgili olarak heyelanların, maden çıkarılması nedeniyle oluşan çökmelerin ve deformasyonların, maden kazılan sahadaki ilerlemenin belirlenebileceğini ifade etmiştir.

Tao ve diğ. (2004), Çin'de Tianjin şehrinde yer altı su kaynaklarının aşırı şekilde çekilmesi nedeniyle oluşan çökmeyi InSAR yöntemiyle belirlemeye çalışmış, sonuçlarını bölgedeki nivelman ağında yapılan ölçülerle karşılaştırmış ve iyi sonuçlar bulunmuştur. Fakat sonuçların zamansal korelasyonsuzluk ve atmosferik düzensizliklere çok fazla bağlı olduğunu ifade etmiştir.

3.5.3 Depremle ilgili yer değiştirmenin belirlenmesi

Deprem öncesi, deprem anı ve deprem sonrası yer değiştirmelerin belirlenmesi yönelik olarak halihazırda bir çok InSAR çalışması gerçekleştirilmiştir ve gerçekleştirilmektedir. Geniş kapsama alanı ve maliyeti ucuz bir yöntem olması nedeniyle birçok deprem InSAR yardımıyla çalışılmaktadır. InSAR sonuçları fayların modellenmesi için kullanılmaktadır.

3.5.3.1 Deprem anı yer değiştirmeleri

InSAR ile araştırılan deprem sayısı GPS ile araştırılan deprem sayısına hızla yaklaşmaktadır (Burgmann ve diğ., 2000). Deprem öncesi bir görüntü mevcutsa, deprem sonrası bir görüntü yardımıyla tutarlı bir interferogram elde edilebilir. 1992 Landers depremi interferometri yardımıyla detaylı bir şekilde çalışılan ilk depremdir (Massonnet ve diğ., 1993). Bu çalışma 7.3 büyüklüğünde merkezi Landers kasabası olan depremin yarattığı deformasyonla ilgilidir. Bu çalışmada InSAR yöntemiyle depremlerle ilgili olarak oluşturulan interferogramdan topografyanın etkisi mevcut SYM ile çıkarılmıştır. Klasik jeodezik yöntemlerle yapılan çalışmanın doğruluğu karşılaştırılmış rms'i 34mm bulunmuştur.

Daha sonra Zebker aynı bölge için benzer çalışma gerçekleştirmiş fakat SYM'yi kendisi InSAR yöntemiyle oluşturmuştur (Zebker ve diğ., 1994).

Bir çok deprem anı yer değiştirmesi bu yöntem ile çalışılmıştır (Peltzer ve Rosen, 1995; Stramondo ve diğ., 1999; Amelung ve Bell, 2003; Wang ve diğ., 2004). Bu çalışmaların hepsinde deprem anı arasında kalacak deprem öncesi ve sonrası görüntülere ihtiyaç vardır.

Deprem anı yer değiştirmeleriyle ilgili olarak İzmit depreminde birçok çalışma gerçekleştirilmiştir (Reilinger ve diğ., 2000; Feigl ve diğ., 2002; Cakir ve diğ., 2003; Bos ve diğ., 2004).

3.5.3.2 Deprem sonrası yer değiştirmeleri

Deprem devrini inceleyen bilim adamlarının özellikle ilgilendikleri konulardan bir tanesi de büyük depremler sonrasında meydana gelen günler veya yıllar sürebilen geçici hareketlerdir. Bu deprem sonrası hareket (postsismik) olarak isimlendirilmektedir. InSAR tekniği bu amaç için ilk olarak 1992 Landers depreminde kullanılmıştır (Massonet ve diğ., 1994; Massonet ve diğ., 1996; Peltzer ve diğ., 1996). Bu çalışmalarda 7-8 cm.lik postsismik hareketler tespit edilebilmiştir.

İzmit depremiyle ilgili olarak deprem sonrası hareketleri belirlemeye yönelik bir çok çalışma gerçekleştirilmiştir (Reilinger ve diğ., 2000; Cakir ve diğ., 2003; Burgmann ve diğ., 2002; Ergintav ve diğ., 2002).

Ryder ve diğ. (2007) Tibet depreminden sonraki 4 sene içerisinde deprem sonrası deformasyonun devam ettiğini göstermiştir. InSAR ölçüleri yardımıyla ± 5 cm lik deformasyon tespit edilebilmiştir.

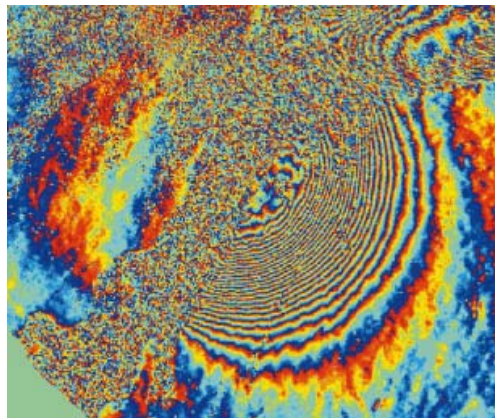
3.5.3.3 Depremler arası yer değiştirme

Depremler arası yer değiştirme büyüklük açısından deprem anı ve sonrası yer değiştirmeye göre çok küçük olduğu için çalışılması ve belirlenmesi daha zor bir konudur. Yıllık deformasyon miktarları InSAR'ın kendi hatası içerisinde kalabilmektedir. İnterferometrik koşulların iyi olduğu durumlarda depremler arası deformasyonun belirlenebileceğini Wright ve diğ. (2001b) Kuzey Anadolu Fay hattı için göstermiştir. Bunun için birçok interferogramı birbiri üstüne yığarak (Stacking) daha uzun bir zamana ait daha doğru bir deformasyon elde edebilmeyi başarmıştır. Biggs ve diğ. (2007) ise korelasyonun düşük olduğu bölgeler için üç aşamalı iteratif

bir yöntem önermiştir. Buna göre yörünge hataları tespit edilmekte, her bir piksel için en uygun deformasyon hız haritaları oluşturulmakta ve en son olarak piksel bazında deformasyon hız haritaları modellenerek kayma miktarı belirlenmektedir. Bu işlem iteratif olarak gerçekleştirilmektedir.

3.5.4 Volkanik hareket izleme

Volkanlar diğer bir doğal tehlikedir. Volkanik patlamalar buldukları bölgeleri lavları, sıcak gazları ve uçucu külleri ile tehdit ederler. InSAR yardımıyla tespit edilen yüzey deformasyonunun konumsal dağılımı magmatik ve tektonik süreç çalışmalarının zenginleştirilmesini sağlayan detaylı mekanik modellerin oluşturulabilmesini sağlar. Bu çalışmalar volkanların nasıl faaliyet gösterdiğiyle ilgili bilgi sağlamanın yanı sıra gelecekteki patlamaların tahminiyle ilgili veri sağlar. Magma tarafından oluşturulan yüksek basınç nedeniyle, volkanik patlamalardan önce yüzey deformasyonu meydana gelir. Sismik çalışmalar ile birlikte InSAR yardımıyla belirlenen yüzey deformasyonu, arazi çalışmasının zorluğu dikkate alındığında magma dinamiklerinin belirlenmesi açısından önemli bilgiler sağlar. İlk olarak Massonet ve diğ. (1995) InSAR'ı volkanik çalışmalar için Etna Yanardağı için denemiştir. ERS-1 uyduları tarafından alınan görüntüler yardımıyla volkanik deformasyon belirlenmiştir. Şekil 3.7'de Sigurjon Jonnsson (1999) tarafından, Galapagos adalarındaki Fernandina Yanardağı ile ilgili interferogram çalışması verilmiştir. Etna Dağı volkanik patlaması sonrasında meydana gelen deformasyon Briole ve diğ. (1997) tarafından da çalışılmıştır. Alaska'daki New Trident volkanı deformasyonu Lu ve diğ. (1997), Etiyopya'da Gada 'Ale volkanının yakınındaki çökme Amelung ve diğ. (2000), Alaska'daki Okmok volkanının 1997 patlama öncesi ve sonrası deformasyonu Lu ve diğ. (2000) araştırılmıştır.



Şekil 3.7: InSAR'ın Galapagos Adalarındaki uygulaması

3.5.5 Buzul hareketleri

İnterferometrik SAR tekniğinin kullanıldığı diğer bir alan ise Antartika ve Gröland'da hareket eden buzulların hızının belirlenmesidir. Buzulların hareketi ile küresel iklim durumu arasında doğrudan bağlantı mevcuttur (Zebker, 2000). Kutup bölgeleri uzak, büyük ve insan yaşamadığı için, buzul hareket hızı InSAR için ideal bir uygulama alanıdır. Buradaki kısıt plaka hareketlerine göre buzul hareket hızının daha fazla olmasıdır. Bu kısıt daha sık gözlem yapılarak giderilmektedir. Fakat buradaki kısıt ERS 2 ve ENVISAT uydularınının 35 günlük aynı yerden geçme periyodudur. Buzul hareketleriyle ilgili ilk çalışmayı Goldstein ve diğ. (1993) yapmıştır. Daha sonra bu çalışmalar devam ettirilmiştir (Haarpainter ve diğ., 2000; Mohr ve Madsen, 1996) .

3.5.6 Diğer uygulamalar

Orta ve küçük ölçekli topoğrafik haritalar genellikle stereo hava fotoğrafları yardımıyla oluşturulmaktaydı. Aynı şekilde uydular tarafından alınan stereo görüntüler de bunun için kullanıldı. Bu yöntemin en önemli problemi, bazı bölgelerin bulutlanma nedeniyle uygun görüntülerinin elde edilememesi, özellikle buzullarda olduğu şekilde kontrast yaratacak detayın olmaması nedeniyle stereo eşlemenin gerçekleştirilememesidir. İnterferometri tekniğinin radar görüntülerine uygulanmasının ana sebeplerinden biri de topoğrafik haritalamadır. Stereo hava fotoğrafları veya uydu görüntülerinin dezavantajları InSAR tekniğini etkilememektedir. Zebker ve diğ. (1994) ERS-1 görüntülerinden oluşturulan topoğrafik haritaların doğruluğunu ortaya koymuştur.

Gerek tekrar geçişli SAR interferometrisi gerekse tek geçişli SAR interferometrisi tekniğiyle Sayısal Yükseklik Modeli üretilmektedir. InSAR yönteminin optik stereo görüntü tekniğine olan üstünlüğü ; yer kontrol noktasına hiç veya çok az ihtiyaç duyması, detaysız alanların yüksekliklerini ölçebilmesi ile bulutlardan ve karanlıktan etkilenmemesi olarak değerlendirilebilir. Sayısal Yükseklik çalışmasına en önemli örnek SRTM çalışmasıdır.

Ormanlık alanlarda InSAR yoluyla elde edilen uyuşum (coherence) haritaları orman ve orman olmayan bölgelerin ayırt edilmesi için kullanılmaktadır. Askne ve diğ. (1997), interferometrik ölçüler ile temel orman özellikleri arasındaki ilişkiyi gösteren

bir model geliştirmiştir. Ayrıca mevcut SYM'ni interferometri yoluyla elde edilen yükseklik modeliyle karşılaştırarak ağaç yüksekliklerini belirlemiştir

Wegmüller (1997), InSAR'ı toprak nemini belirlemek için kullanmıştır. Bu çalışmada Zeeland'da (Hollanda) toprak nemi uzaktan algılanmaya çalışılmıştır. ERS interferometrik uyuşum haritasında korelasyonun 0.7'den büyük olduğu yerlerde başarıyla toprak nemi belirlenmiştir.

Kıyı hattı belirleme Schwabisch ve diğ. (1997) tarafından gerçekteştirilmiştir. Uyuşum haritaları yardımıyla deniz-kara sınırı belirlenmeye çalışılmıştır.

4. TEST BÖLGESİ İZMİT'TE INSAR UYGULAMASI

Şimdiye kadar İzmit depremi ile ilgili olarak modelleme çalışmaları farklı kişiler tarafından farklı yöntemler kullanılarak değişik tarihlerde gerçekleştirilmiştir. Barbieri ve diğ. (1999) InSAR ölçülerini kullanarak, Reilinger ve diğ. (2000) GPS ve InSAR ölçülerini kullanarak, Wright ve diğ. (2001a) InSAR ölçüleri yardımıyla, Feigl ve diğ. (2002), ERS-1, GPS, RADARSAT ve SPOT ölçüleri ile ayrı ayrı olarak, Çakır ve diğ. (2003) InSAR ölçüleri ile modelleme çalışmaları gerçekleştirmiştir. Bos ve diğ. (2004), GPS ve InSAR veri setini birlikte kullanarak İzmit depremini modellemeye çalışmıştır. Bu çalışmada veri setleri aynı anda kullanılmamış kademeli olarak birinin sonuçları yardımıyla diğerinin sonuçları değerlendirilmiş düz ve ters modellemeler yardımıyla sonuca ulaşılmıştır. Yukarıdaki çalışmaların bir kısmında InSAR verilerinin hesap yükünün azaltılması için veri indirgeme yöntemleri kullanılmıştır. Fakat bu yöntemler kendi içerisinde yetersizlikleri olan yöntemlerdir. Bu çalışmaların hepsi tek katmanlı yer kabuğu için modelleme gerçekleştirmiş, çok katmanlı yer kabuğu dikkate alınmamıştır.

Bu çalışmanın test bölgesi, deprem olgusu nedeniyle İzmit ve çevresi seçilmiştir. Yukarıda belirtilen veri işleme süreçlerinden farklı bir yol izlenmesi amaçlanmıştır. İzmit Depremi için gerçekleştirilecek bu çalışmada çok katmanlı yarı uzay için modelleme yapılacak, GPS ve InSAR ölçülerinin birlikte kullanılabilmesi için ağırlıklandırma gerçekleştirilecek, InSAR ölçülerinin indirgenmesi için yeni bir yöntem geliştirilecek, güvenilirliği test edilecek ve İzmit bölgesindeki InSAR ölçülerinin doğruluğunun GPS ölçüleri yardımıyla değerlendirilmesi yapılacaktır.

4.1 İzmit Depremi

17 Ağustos 1999'da, $M_w=7.5$ olan deprem Marmara bölgesini etkilemiştir. Bu deprem 1939'da başlayıp Kuzey Anadolu Fay Hattı boyunca batıya doğru ilerleyen ve şimdiye kadar fayın 1200km.lik bir kısmını kıran depremlerin sonuncusuydu (Barka, 1992). Şekil 4.1'deki Kuzey Anadolu Fay (KAF) hattı boyunca depremsellik ve tarihleri Stein ve diğ. (1997) den alınmıştır.

4.3 Test Bölgesindeki InSAR Ölçüleri

Test Bölgesine ilişkin interferometrik çalışmada, ROI_PAC yazılımı kullanılmıştır. 11 adet SAR görüntüsü temin edilmiş olup, bunlardan sadece 2 tanesi konumsal ve zamansal baz mesafesi olarak uygun bulunmuştur. Yörünge bilgileri olarak Delft Üniversitesi tarafından hazırlanan yörünge bilgileri kullanılmıştır. Sayısal Yükseklik Modeli olarak USGS (United States Geological Survey)'in 3 saniye aralıklı InSAR yöntemiyle elde edilmiş SRTM verisi kullanılmıştır.

4.3.1 ROI_PAC yazılımı

ROI_PAC'in açılımı tekrar geçişli yörünge interferometri paketi (Repeat Interferometry Package) olup, JPL ve Caltech'de geliştirilmiştir. Yazılım Fortran ve C programlarının Perl scriptleriyle birbirine bağlanması ile oluşmuştur. Bireysel programlar; ham veri düzenlenmesi, SAR görüntüsü işleme, interferogram oluşturma, korelasyon tahmini kestirimi, faz açılması, baz belirlenmesi, topoğrafyanın belirlenmesi, deformasyon interferogramından topoğrafyanın giderilmesi ve yer uyumlu hale getirilmesi aşamalarını yerine getirebilir. Perl scriptleri önceden tanımlanan şekillerde bu programları bir araya getirilmelerini kontrol ederek, özellikle iki ERS radar görüntüsünden yer uyumlu topografik faz görüntüsü veya deformasyon görüntüsü oluşturmayı, sayısal yükseklik verisi olmayan durumlarda üç radar görüntüsünden deformasyon faz görüntüsü oluşturmayı sağlar. Perl scriptleri, işlemin her aşaması üzerinde önemli bir kontrol sağlar.

4.3.2 SAR görüntüleri

Deprem bölgesini ve zamanını içine alan ve uygun dik baz mesafesine sahip ERS1 uydusuna ait iki adet görüntü belirlenmiştir. Bu görüntülere ait bilgiler Çizelge-4.1'de verilmiştir.

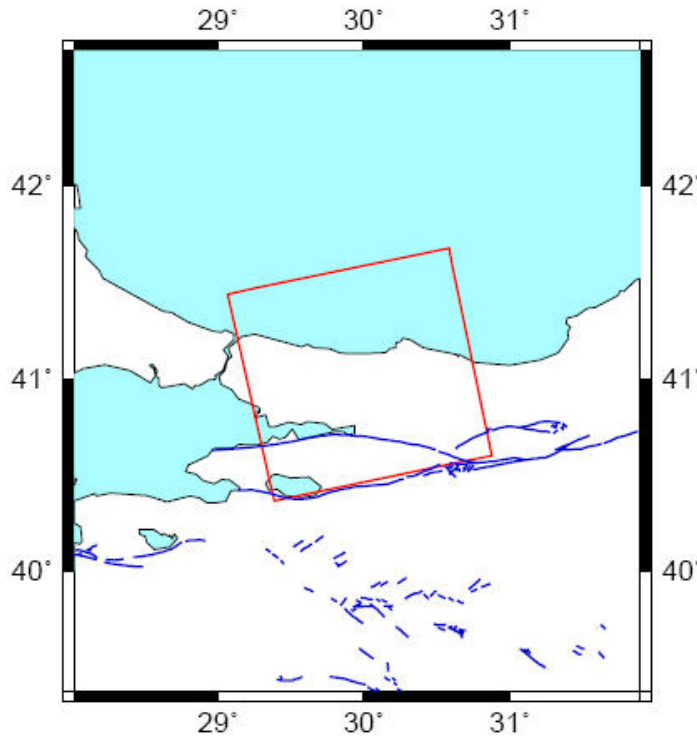
157 iz numarası ve 815 çerçeve numarasına sahip görüntünün konumu Şekil 4.3'de verilmiştir. Kırmızı ile sınırlandırılmış çerçeve, görüntülerin kapladığı alanı, mavi çizgiler ise mevcut fay hatlarını temsil etmektedir. Her iki görüntü de uydunun yükselen yörüngesinde çekilmiştir. Yani görüntünün alımı uydunun güneyden kuzeye olan hareketi sırasında gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.1: Kullanılan Uydu Görüntülerine Ait Bilgiler

Uydu	Yörünge Numarası	Alım Tarihi	İz numarası	Çerçeve Numarası
ERS1	42229	12 08 1999	157	815
ERS1	42730	16 09 1999	157	815

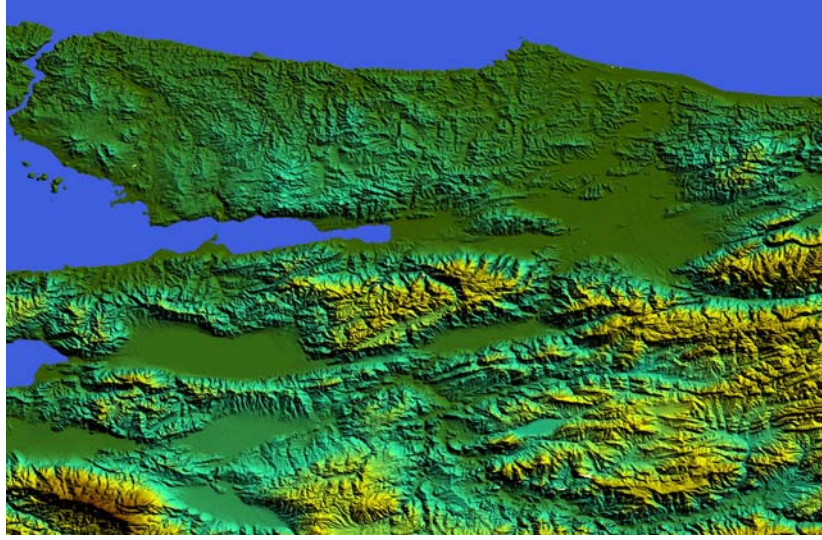
4.3.3 Sayısal yükseklik verisi

Sayısal yükseklik verisi olarak SRTM 3 verisi kullanılmıştır. Mekik Radar Topografya Görevi (SRTM); Ulusal Görüntüleme ve Haritalama Kurumu (NIMA) ve Ulusal Havacılık ve Uzay Yönetimi (NASA) arasındaki ortak bir projedir. Bu projenin amacı Dünya yüzeyinin %80'inin (60⁰N ve 50⁰S enlemleri arasındaki bütün alan) Sayısal Yükseklik Modelini oluşturmaktır. Verilerin her biri enlem/boylam gridinde 1 saniyede bir (yaklaşık 30 m) oluşturulmuştur. 1 saniye aralıklı verilere SRTM1 adı verilemekte olup herkesin kullanımına açık değildir. SRTM 3, 3 saniye aralıklarla yükseklik verisine karşılık gelmekte olup internetten indirilip kullanılabilir.



Şekil 4.3: SAR görüntülerinin kapladığı alan

Verideki bütün yükseklikler metre biriminden olup WGS84 datumunda EGM96 jeoidine göre hesaplanmıştır. Yatay koordinatlar coğrafi değerler olarak, WGS84 elipsoidine göre tanımlanmıştır. 3 saniyelik veri 1201x1201 satır ve sütundan oluşmaktadır. Veri formatı 16 bit integer şeklindedir. Kullanılan verinin görüntüsü Şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.4: İnterferometrik değerlendirme için kullanılan yükseklik verisi

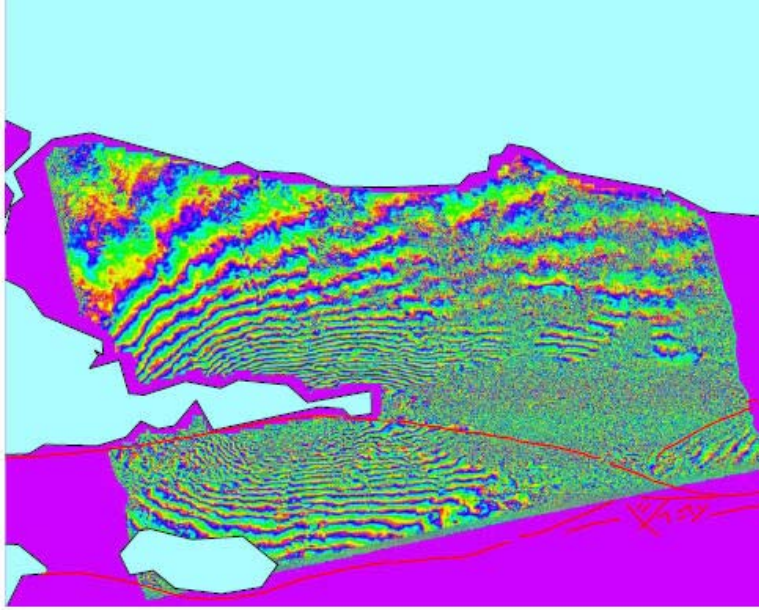
4.3.4 Uydu yörünge bilgisi

ERS uyduları için iki adet yörünge bilgisi kaynağı vardır. Bunlardan biri ERS1 ve ERS2 için yörünge bilgisi hesaplayıp dağıtan Delft Institute for Space-Oriented Space Research (DEOS), diğeri ise Avrupa Uzay Ajansı (ESA)’dır. DEOS’a ait yörünge bilgileri internet üzerinden hiçbir sınırlamaya bağlı olmaksızın indirilebilirken, ESA’ya ait yörünge bilgilerini elde edebilmek için ESA’dan bunla ilgili izin almak gerekmektedir. Bu çalışmada, DEOS’a tarafından üretilen yörünge bilgileri kullanılmıştır.

4.4 İnterferogram Oluşturulması

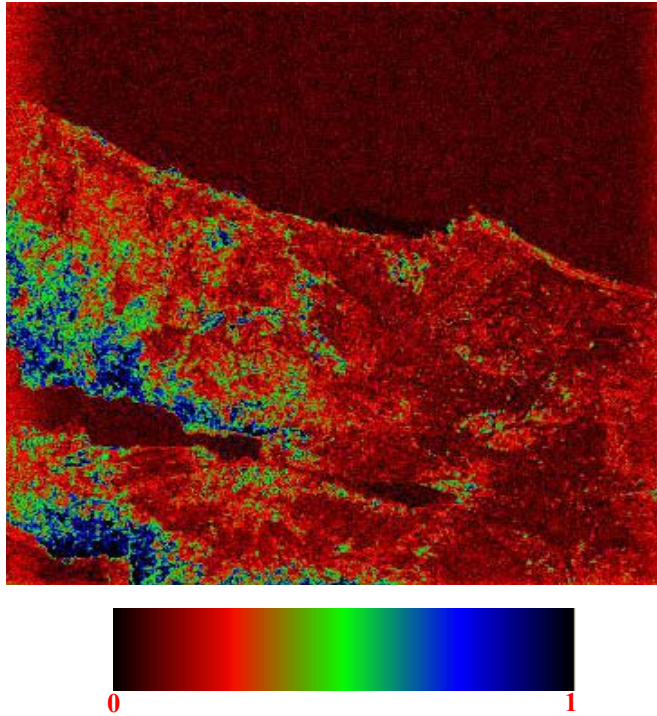
ROI_PAC yazılımı yardımıyla, DEOS’a ait uydu yörünge bilgileri ve USGS’e ait SRTM verileri kullanılarak Çizelge 4.1’de verilen görüntüler yardımıyla Bölüm 3.4’de belirtilen esaslara göre İzmit Depremine ait oluşturulan interferogram Şekil

4.5’de verilmiştir. Şekil 4.5’deki Sayısal Yükseklik Modeli yardımıyla Bölüm 3.4.9’a göre yer uyumlu hale getirilmiş interferogramdır.



Şekil 4.5: İzmit Depremine ait interferogram

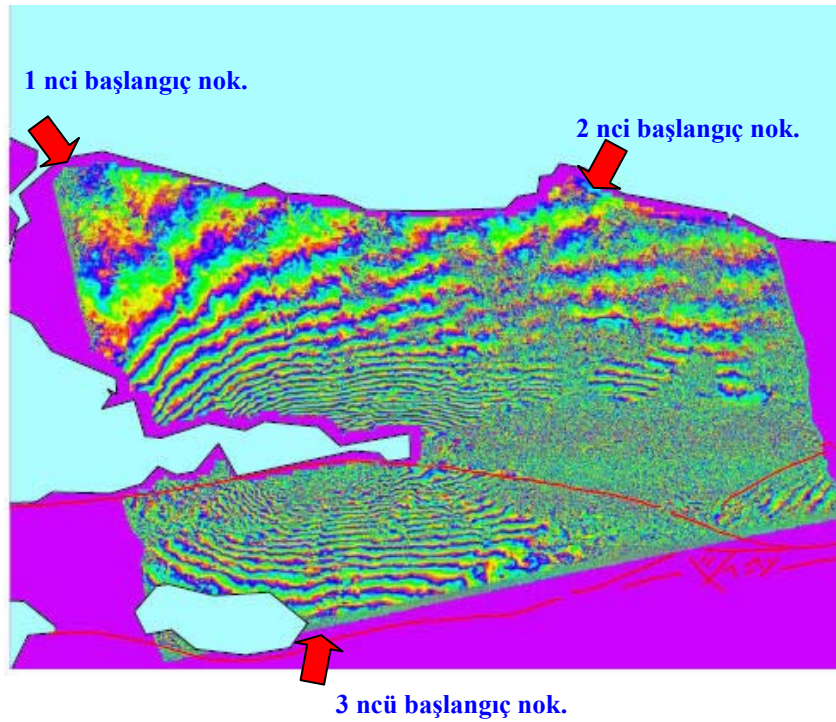
Eşitlik:3.18’e göre interferograma ait oluşturulan korelasyon haritası Şekil 4.6’da verilmiştir. Korelasyonun 0 olduğu yerler iki görüntü arasında hiçbir uyumun yakalanamadığı yerler, 1 olduğu yerlerin ise %100 uyum sağlanan yerlerdir.



Şekil 4.6: İzmit Depremine ait korelasyon haritası

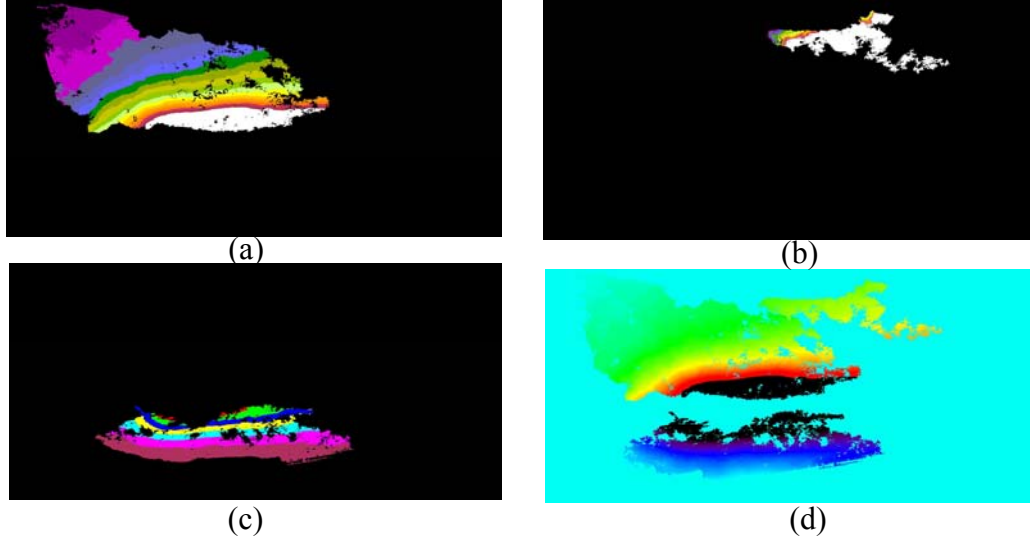
İnterferogram; meydana gelen deformasyonu, 2π devinimleri şeklinde birbirine görelî olarak radyan şeklinde ifade etmektedir. Bu, desen olarak anlam ifade etmesine rağmen sayısal olarak değerlendirilebilmesi için fazının çözülmesine veya desenlerin sayısallaştırılıp sonuçlarının değerlendirilmesine ihtiyaç vardır.

Faz çözülmesi, fazın 2π devinimlerinin üst üste toplanarak, belirlenen başlangıç noktasına göre mutlak deformasyonun Bölüm 3.4.6'da belirtilen yöntemlere göre belirlenmesi işlemidir. Çözülen faz da radyan birimindedir. Bu işlem için farklı algoritmalar uygulanmaktadır. Bu çalışma için "old" isimli yazılım içerisinde mevcut algoritma kullanılmıştır. Tek başlangıca göre bütün fazın çözülmesi mümkün olmamıştır. Çünkü, faz bütün interferogram boyunca sürekli değildir. İnterferogram üzerinde korelasyonsuzluk nedeniyle süreksiz bölgeler mevcuttur. Bu nedenle faz çözülmesi çalışmasında farklı başlangıç noktaları denenmiş, fazın çoğunluğunun çözülmesinin sağlayacak başlangıç noktaları belirlenmeye çalışılmıştır. Üç farklı başlangıç noktası belirlenmiş ve faz bu noktalardan itibaren çözülmeye çalışılmıştır. Şekil 4.7'de faz çalışması için verilen başlangıç noktalarının yaklaşık konumları kırmızı ok ile gösterilmiştir.



Şekil 4.7: Faz çözülmesi çalışmasındaki başlangıç noktaları

Üç farklı noktadan faz çözülmesi neticesinde elde edilen sonuçlar ile tümünün birleşmiş hali Şekil 4.8'de verilmiştir. Şekil 4.8.a; 1'inci başlangıç noktasına göre çözülen faz, Şekil 4.8.b; 2'nci başlangıç noktasına göre çözülen faz, Şekil 4.8.c; 3'üncü başlangıç noktasına göre çözülen faz, Şekil 4.8.d; bütün noktalara göre çözülen fazların birleştirilmiş halidir



Şekil 4.8: Başlangıç noktalarına göre çözülen faz

4.5 Oluşturulan İnterferogramın Doğruluk Araştırması

İzmit depremi öncesinde ve sonrasında Harita Genel Komutanlığı (HGK) , İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) , Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (TÜBİTAK-MAM) ile Massachusetts Institute of Technology (MIT) tarafından yapılan GPS ölçülerinden hesaplanan deprem anı yer değiştirme miktarları Reilinger ve diğ. (2000) tarafından yayınlanmıştır. Bu noktalar ve yer değiştirme vektörleri Şekil 4.2'de görülmektedir. Kırmızı çerçeve bu çalışmada oluşturulan interferogramın kapsadığı bölgeyi göstermektedir. Şekil 4.9'da ise oluşturulan interferogram üzerine düşen GPS noktaları verilmiştir.

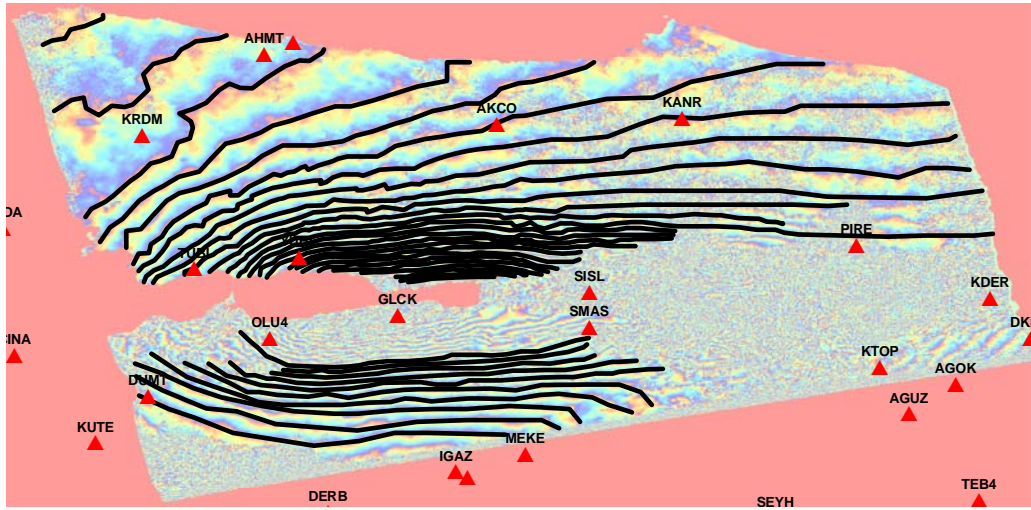
İnterferogram ile çakışan ve interferogramın korelasyonu yüksek olan bölgesine gelen GPS noktaları ve bu noktalarda GPS ölçülerinden yararlanarak hesaplanan yer değiştirme miktarları ve nokta konum hataları Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Faz çözülmesi tanımlı algoritmalar tarafından yapıldığı için ve bütün durumlar tam olarak modellenememesi nedeniyle gözle fark edilebilen fakat program tarafından çözülemeyen bölgeler oluşabilmektedir. GPS noktalarından bir kısmı da gözle

grubunun karşılaştırılabilmesi için GPS yer değiştirme vektörlerinin uydu bakış doğrultusuna izdüşürülmesi gerekmektedir. Bunun için, GPS noktalarındaki yer değiştirme vektörleri, uydunun bakış doğrultusundaki birim vektörle içsel çarpım yapılarak (inner product), GPS vektörlerinin uydu bakış doğrultusundaki bileşenleri hesaplanmıştır. İçsel çarpım için eşitlik;

$$\vec{u} \cdot \vec{n} = u_x n_x + u_y n_y + u_z n_z \quad (4.1)$$

şeklinde verilmektedir. Burada; \vec{u} ; GPS için yer değiştirme vektörü, \vec{n} ; uydu bakış doğrultusundaki bileşendir.



Şekil 4.10: İnterferograma ait devinimlerin sayısallaştırılması

GPS ve InSAR ölçüleri karşılaştırılırken fayın kuzeyi ve güneyindeki farkları birbirinden ayrı olarak değerlendirilmiştir. Fayın kuzeyindeki 8 nokta için farkların hepsi aynı yönlüdür ve ortalaması 49 mm'dir. Çizelge 4.3'de GPS ölçüleri için YUHE noktasının uydu bakış doğrultusundaki belirsizliğine bakılırsa 63 mm'dir. Bu noktanın GPS ölçülerinde Çizelge 4.2'de verildiği gibi özellikle yükseklik tekrarlılığında problem olduğu görülmektedir. YUHE noktası hariç tutulup tekrar bir değerlendirme yapılırsa farkların ortalaması 38 mm'dir.

GPS ölçüleri ile InSAR ölçülerinin mutlak anlamda karşılaştırılması yerine, GPS noktaları arasındaki görel koordinat farklarının aynı noktalardaki InSAR ölçüleri arasındaki görel farklarla karşılaştırılmasının, InSAR faz çözümünde seçilen başlangıç noktasının faz kayıklığının giderebileceği değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.3: İnterferometri ve GPS sonuçlarının karşılaştırılması

Nokta İsmi	İnterferogramdan Hesaplanan Yer Değişirme Miktarı (mm)	GPS'den uydu bakış doğrultusunda hesaplanan yer değişirme miktarı (mm)	GPS Uydu bakış doğrultusu 1-sigma hatası (mm)	GPS Ölçüsü ile İnterferogram Arasındaki Fark (mm)	Açıklama
PIRE	337	280	16.9	57	Fayın Kuzeyi
KANR	168	126	20.6	42	Fayın Kuzeyi
AKCO	148	88	18.0	60	Fayın Kuzeyi
YUHE	422	314	62.7	108	Fayın Kuzeyi
SILE	50	26	17.1	24	Fayın Kuzeyi
AHMT	43	33	15.0	10	Fayın Kuzeyi
TUBI	258	210	3.0	48	Fayın Kuzeyi
KRDM	52	21	15.2	31	Fayın Kuzeyi
SMAS	-340	-361	19.7	21	Fayın Güneyi
OLU4	-404	-499	15.3	95	Fayın Güneyi
DUMT	-37	-130	3.3	93	Fayın Güneyi

Fay hattının kuzeyi için noktaların görel koordinatlarının değerlendirme sonuçları Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4: Nokta deformasyonlarının görel karşılaştırması

Nokta İsmi	İnterferogramdan Hesaplanan Görel Yer Değişirme Miktarı (mm)	GPS'den uydu bakış doğrultusunda hesaplanan Görel yer değişirme miktarı (mm)	GPS Ölçüsü ile İnterferogram Arasındaki Fark (mm)	Açıklama
KRDM-TUBI	206	189	17	Fayın Kuzeyi
KRDM-AKCO	96	67	29	Fayın Kuzeyi
AKCO-TUBI	110	122	12	Fayın Kuzeyi
SILE-TUBI	208	184	24	Fayın Kuzeyi

Çizelge 4.4’te ikili GPS noktaları arasındaki görel farklar hem GPS ölçülerinden hem de interferometrik ölçülerden karşılaştırılmıştır. Bu farkların ortalaması 20 mm ve standart sapması ± 7 mm dir.

Fayın kuzeyindeki ölçüler incelendiğinde InSAR'dan elde edilen ölçülerin GPS'den elde edilen ölçülerden yaklaşık 20-40mm arasında farklı olduğu görülmüştür. Bu farkın nedeninin, deprem sonrası hareketin InSAR ölçülerinin içerisinde olması, GPS ölçüleri içerisinde olmaması olabileceği düşünülmüştür. İnterferogram oluşturulan ikinci görüntünün tarihi 16 Eylül 1999 tarihidir. Halbuki GPS ölçüleri hemen deprem sonrasında gerçekleştirilmiş ve deprem sonrasında hızlı yer hareketlerine maruz kalmamıştır.

Fayın güneyindeki 3 nokta için de farkların hepsi aynı yönlüdür ve ortalaması 70 mm'dir. SMAS noktası sayısallaştırılmış interferogram üzerinden desen takip edilerek okunmaya çalışılmıştır. İnterferogram incelenecek olursa bu desen çok da belirgin değildir. SMAS noktası hariç tutulursa kalan iki noktadaki fark birbirine çok yakındır. Bu farkların ortalaması 94 mm dir. Bu farkın da Şekil 4.7'deki üçüncü başlangıç noktasının 0 olarak alınmasına rağmen 0'dan farklı olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. IGAZ noktası Şekil 4.7 ve Şekil 4.9 birlikte incelenirse 3 ncü başlangıç noktasının hemen güneyine denk gelmektedir. IGAZ noktasındaki GPS yer değiştirme vektörünün uydu bakış doğrultusundaki bileşeni 91 mm'dir. Bu değer incelenirse OLUK ve DUMT noktalarında bulunan değerlerle uyumludur. DUMT noktası, deprem anında sabit bir tesis üzerine inşa edilmemesine rağmen sabit istasyon gibi 24 saat çalışan bir istasyondur. IGAZ noktası da Boğaziçi Üniversitesi tarafından pilye olarak tesis edilmiş belirli aralıklarla ölçüm yapılan bir istasyondur. IGAZ noktasındaki deformasyonun DUMT noktasında hesaplanan farkla uyumlu olması anlamlıdır.

4.6 Modelleme İçin Nokta Seyrekleştirilmesi

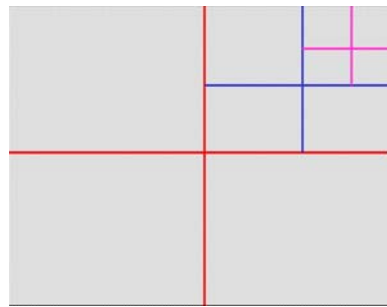
4.6.1 Veri indirilmesi ve quadtree algoritması

90x90m çözünürlüklü, tek görüntülük (100kmx100km) bir interferogram yaklaşık olarak 1.5 milyon noktadan oluşmaktadır. Bu verinin herhangi bir hesaplamada olduğu gibi kullanılması hesaplama yükünü çok fazla arttıracaktır. Ayrıca bu verinin GPS verisi gibi yoğunluğu daha az bir veriyle birlikte kullanılması durumunda interferogramdan elde edilen veri baskın duruma geçecek, birlikte kullanıldığı verinin hiçbir etkisi kalmayacaktır.

İnterferogramdan elde edilen deformasyon verisi konumsal olarak yüksek korelasyona sahiptir ve büyük bir sinyal kaybına sebep olmadan bu veri miktarı azaltılabilir. Bunla ilgili ilk olarak Simons ve diğ. (2002) alt örnekleme ismini verdikleri bir yöntem kullanmışlardır. Bu yöntemde göre örnekleme yoğunluğu deformasyon alanının eğriliğine (ikinci türevine) göre belirlenmektedir. Eğer ikinci türev büyükse örnekleme sıklığı artmakta, küçükse örnekleme sıklığı azalmaktadır. Deformasyonun az olduğu bölgedeki örnekleme aralığı maksimum 10 km ile sınırlanmıştır.

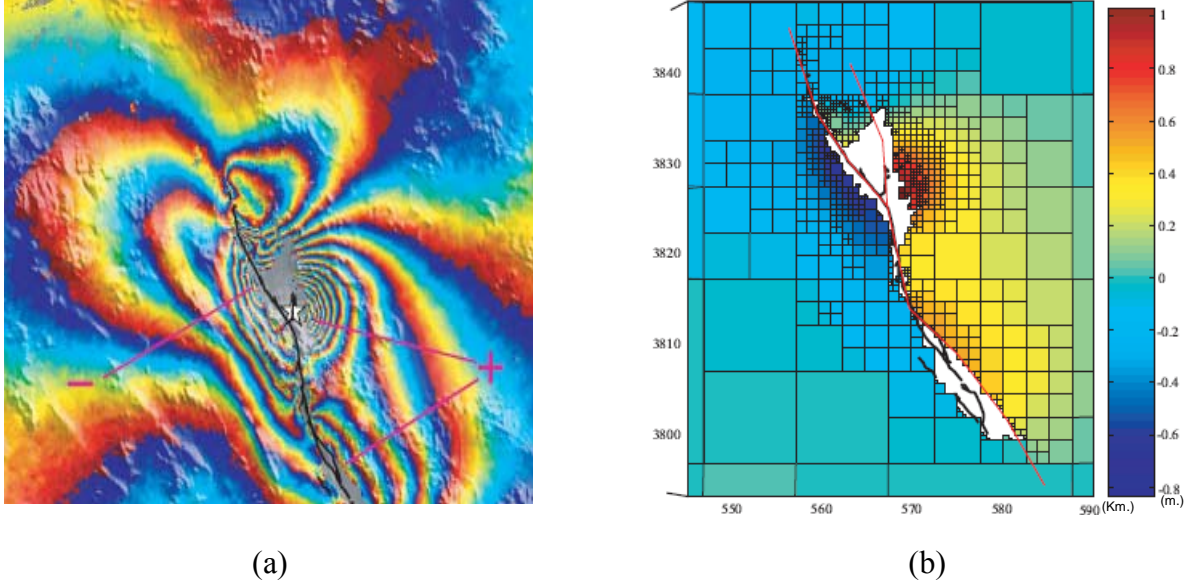
Diğer bir uygulama ise devinim çizgileri üzerinde belirli aralıklarla noktalar alarak örnekleme yöntemidir. Stramondo ve diğ. (1997) devinim çizgisi üzerinde her 500m'de bir nokta alarak InSAR verisini indirgemeye çalışmışlardır.

Diğer bir yöntem ise quadtree algoritmasıdır. Veri miktarı iki boyutlu veri indirgeme algoritması olan quadtree ile sinyal kaybına neden olmadan daha az bir sayıya indirgenmeye çalışılmıştır (Welstad, 1999). Quadtree algoritmasında, işleme başlamadan önce eşik varyans değeri belirlenir. Görüntü Şekil 4.11'de verildiği gibi ilk olarak dört parçaya bölünür, her bir parçanın ortalaması hesaplanır. Eğer ortalamaya göre varyans dağılımı önceden belirlenen değerden büyükse, incelenen parça tekrar dört yeni parçaya bölünür ve her bir parça için ortalama hesaplanır ve varyans değeri ile tekrar kontrol edilir. Bu işlem iteratif olarak hesaplanan varyans değerinin önceden belirlenen varyans değerinin altında kalıncaya kadar devam eder. Varyans değerinin altında kaldığında o parça için değer o parçayı oluşturan verilerin ortalamasıdır. O parçayı ifade eden koordinat ise o parçanın orta noktasıdır. Bu şekilde indirgenen veri daha az nokta ile sinyalin önemli bir kısmını ifade edebilir hale gelmektedir.



Şekil 4.11: Quadtree algoritması

Şekil 4.12a’da Jonsson ve diğ. (2002) Hector Mine depremi için yaklaşık 1.5 milyon noktaya sahip interferograma, quadtree algoritmasını uygulanması sonucunda Şekil 4.12b ‘de interferogram 843 adet noktaya düşmüştür.

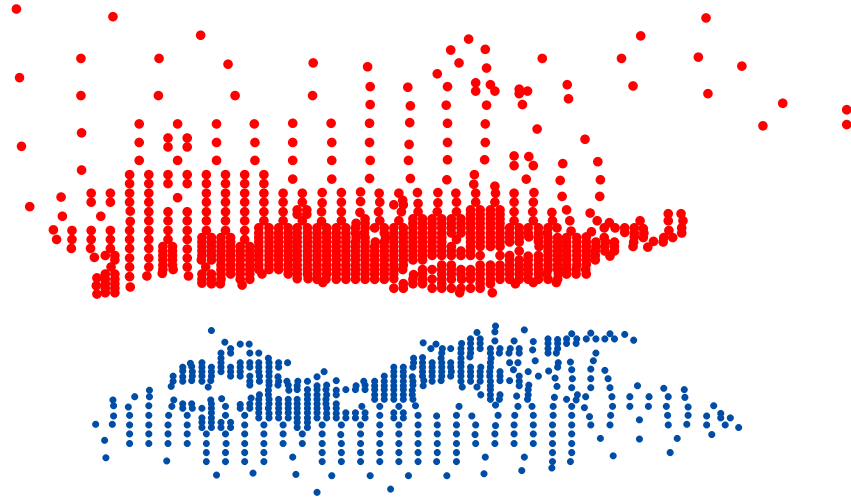


Şekil 4.12: Quadtree algoritması ile indirgenen veri

Quadtree algoritması her seferinde veriyi düzgün şekillerle dörde bölerek veri indirgemesine gittiği için normalde veri içerisinde olan desenleri dikkate almamaktadır. Ayrıca her bir çeyreğin sınırında da problem olabilmektedir. Veri daha az miktarda alt bir kümeyle daha doğru şekilde ifade edilebilecekken, nokta sayısı daha fazla olarak kalabilmektedir. Verinin üzerindeki deseni dikkate alan bir algoritmaya ihtiyaç vardır.

4.6.2 Quadtree algoritmasının İzmit depremi için uygulaması

Bunun için çözülmüş fazların çözüm başlangıç noktaları tam olarak 0’dan başlamadığı için 0’a ötelenmiş, çözüm bölgelerinin birbirine göre göreceli farkları ortadan kaldırılmıştır. Ayrıca radyan cinsinden olan uydu bakış doğrultusundaki yer değiştirme miktarları uzunluk birimine çevrilmiştir. Üç farklı noktadan çözülen ve üç farklı bölge olarak oluşan faz çözüm dosyaları fay hattının kuzeyi ve güneyi olarak iki grup olarak ayrılmıştır.

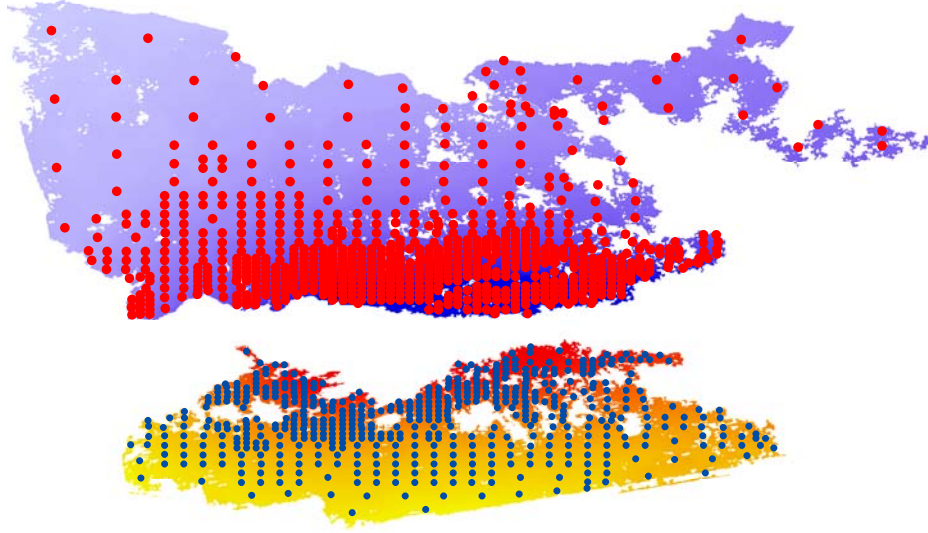


Şekil 4.13: Nokta seyrekleştirilmesi sonrası nokta dağılımı

Quadtree algoritmasının daha fazla dörde bölmemesi için gerekli olan sınır varyans değeri 80 mm olarak belirlenmiştir. Yani incelenen hücredeki değerlerin varyansı 80mm 'yi geçiyorsa dörde bölme işlemine devam edilmekte, bu değerden düşük kalıyorsa bölme işlemi sonlandırılmaktadır. Ayrıca algoritma için minimum nokta sayısı kriteri mevcuttur. Eğer bölünen hücre içerisindeki nokta sayısı bu eşik değerden az ise varyans değere bakılmaksızın dörde bölme işlemi kesilmektedir. Bu çalışma için minimum nokta sayısı 100 olarak tespit edilerek işlem yükü ve kalan nokta sayısı azaltılmaya çalışılmıştır.

İzmit depremi sonrası oluşan yer değiştirme miktarı çok büyük olduğu için verilecek daha küçük varyans değerleri minimum nokta sayısına ulaşılmasına rağmen, incelenen pencere için verilen varyans değerinin altına düşülemediği için hedeflenen sonuca ulaşılamamaktadır. Quadtree algoritmasından sonra elde edilen nokta dağılımı Şekil 4.13'de verilmiştir.

Çözülmüş interferogramın nokta seyrekleştirilmiş ve seyrekleştirilmemiş durumları Şekil 4.14'de verilmiştir.



Şekil 4.14: Nokta seyrekleştirilmesi öncesi ve sonrası nokta dağılımı

Nokta seyrekleştirme öncesi ve sonrasındaki nokta sayıları Çizelge 4.5’te verilmiştir.

Çizelge 4.5: Nokta Seyrekleştirme Öncesi ve Sonrası Nokta Sayıları

	Nokta Seyrekleştirme Öncesi	Nokta Seyrekleştirme Sonrası
Üst Bölge	492660	861
Alt Bölge	206214	596
Toplam	698874	1457

4.6.3 Nokta seyrekleştirilmesi için yeni bir yöntem

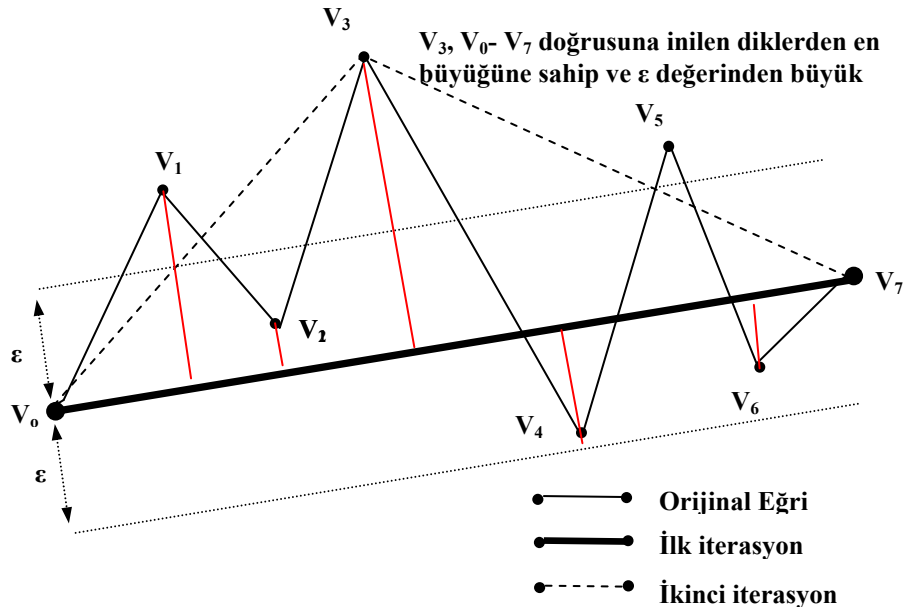
Quadtree algoritmasının yetersizliklerini gidermek için yeni bir yöntem geliştirilmiş ve quadtree algoritmasının sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

4.6.3.1 Yöntemin temelleri

Kontur çizgisi, aynı değere sahip noktaları birbirine bağlayan eğridir. Önerilen yöntemde InSAR yöntemiyle elde edilen deformasyon verisi için belirlenen aralığa göre kontur çizgileri oluşturulmaktadır. Kontur çizgileri için aralık deformasyon verisinin değişim hızına ve deformasyon verisinin ikinci türevine bağlı olarak belirlenmelidir. Yani deformasyon verisinden hesaplanacak eğim haritası düzgün

olan bir veri için çok küçük kontur aralığına ihtiyaç yokken eğiminin değişim gösterdiği deformasyon haritası için daha küçük bir kontur aralığına ihtiyaç vardır.

Oluşturulan kontur haritası, kontur oluşturma algoritmaları nedeniyle çok fazla noktadan oluşabilmektedir. Bu nedenle bu konturların basitleştirilmesine ihtiyaç vardır. Basitleştirme, çizgi üzerindeki küçük dalgalanmaları veya gereksiz kıvrımların, asıl şekil korunarak giderilmesi olarak ifade edilebilir. Kontur basitleştirme için hali hazırda bir çok algoritma mevcuttur: Douglas-Peucker, visvalingam-whyatt,convex hull bunlardan bir kaçıdır. Bu çalışmada dünyada en fazla kullanılan Douglas-Peucker algoritması kullanılmıştır (Douglas ve Peucker, 1973). Douglas-Peucker algoritmasına göre ilk olarak bir eğrinin iki ucundaki noktalar alınır ve arasına doğru çizilir (Şekil 4.15). Daha sonra bu iki noktanın arasındaki bütün noktalardan çizilen doğrunun üzerine dikler inilir. Eğer bu diklerin mesafesi önceden belirlenen ϵ eşik değerinden daha küçükse çizilen doğru orijinal doğrunun basitleştirilmiş hali olarak kabul edilir. Başlangıç ve bitiş noktaları alınır diğer noktalar silinir. Aksi durumda ϵ eşik değerini en fazla geçen mesafeye ait nokta alınır, bu noktadan başlangıç ve bitiş noktasına doğru çizilir. Bu durumda orijinal eğri iki parçaya bölünmüş olur. Yukarıdaki işleme iteratif olarak hiçbir dikin ϵ eşik değerinden fazla olmadığı duruma kadar devam edilir.



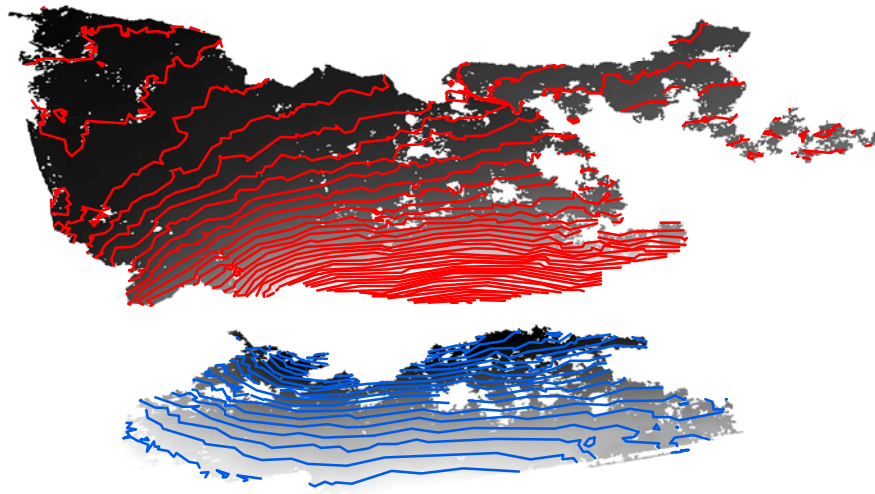
Şekil 4.15: Douglas-Peucker Algoritması

Basitleştirilmiş çizgileri oluşturan noktalardan yeni bir veri kümesi oluşturulur. Ağırlıklandırma çalışmasında kullanmak üzere, bu veri setindeki her bir noktanın ana

kümedeki kaç tane noktayı temsil ettiği bulunmalıdır. Bunun için seyrekleştirilen noktalar ile ana kümedeki noktalar arasındaki öklid mesafeleri bulunur ve ana kümedeki her bir nokta bu mesafelere göre en yakınındaki örneklenmiş nokta ile ilişkilendirilir.

4.6.3.2 İzmit depremi için yöntemin uygulaması

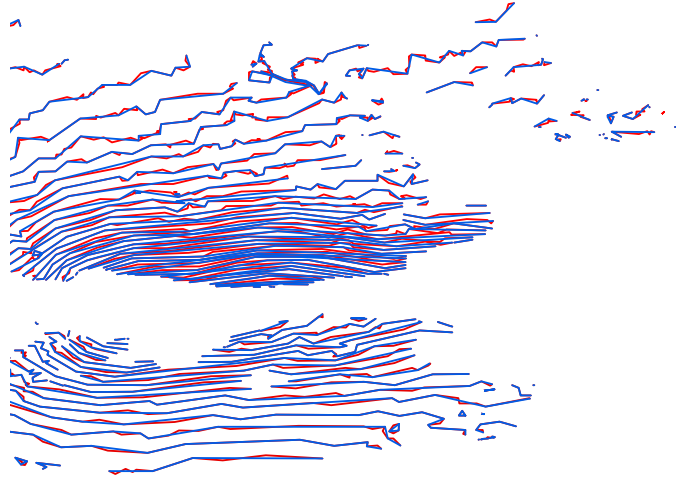
InSAR verilerinden oluşturulacak kontur aralığı fayın kuzeyi için 20 mm, güney kısmı için 30 mm alınmıştır. Oluşturulan konturlar Şekil 4.16’de verilmiştir.



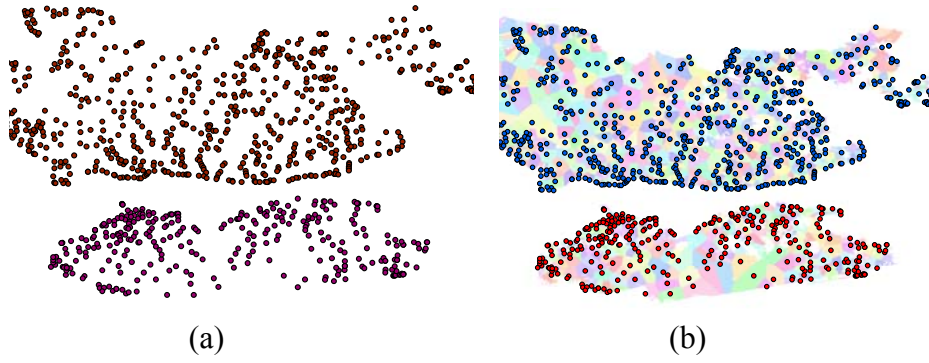
Şekil 4.16: Deformasyon verisinden oluşturulan konturlar

Oluşturulan konturlar Douglas-Peucker Algoritması yardımıyla, Bölüm: 4.6.3.1’de ifade edilen $\epsilon = 0.005^\circ$ eşik değeri ile basitleştirilmiş, bu sayede nokta sayısı azaltılmıştır. Şekil 4.17’de basitleştirme öncesi ve sonrası durum verilmiştir. Kırmızı çizgiler basitleştirme öncesini, mavi çizgiler ise basitleştirme sonrasını göstermektedir.

Şekil 4.18a’da konturları oluşturan noktalar veri kümesi olarak oluşturulmuştur. Şekil 4.18b’de ise asıl deformasyon haritasındaki her bir noktanın en yakınındaki örneklenmiş noktayla ilişkisi kurulmuştur. Her bir renk grubu aynı örneklenmiş noktayla ilişkili noktaların kümesini ifade etmektedir.



Şekil 4.17: Basitleştirme öncesi ve sonrası konturlar



Şekil 4.18: Yeni yöntem uygulaması

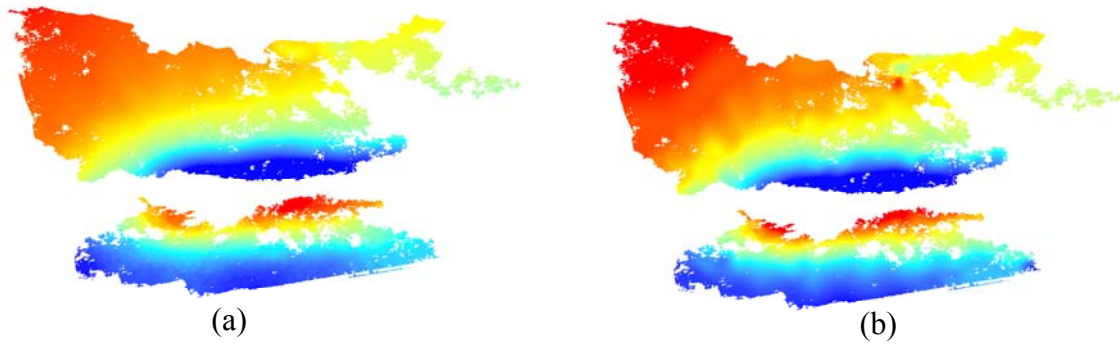
4.6.3.3 Quadtree algoritması ile yeni algoritmanın karşılaştırılması

Quadtree algoritması ve yeni oluşturulan algoritma sonucunda oluşan nokta sayıları özet olarak Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6: Nokta Seyreltme Yöntemlerinin Örneklenen Nokta Bakımından Karşılaştırılması

	Nokta Seyrekleştirme Öncesi Nokta Sayısı	Nokta Seyrekleştirme Sonrası Nokta Sayısı (Quadtree Algoritması)	Nokta Seyrekleştirme Sonrası Nokta Sayısı (Önerilen Algoritma)
Üst Bölge	492660	861	699
Alt Bölge	206214	596	319
Toplam	698874	1457	1018

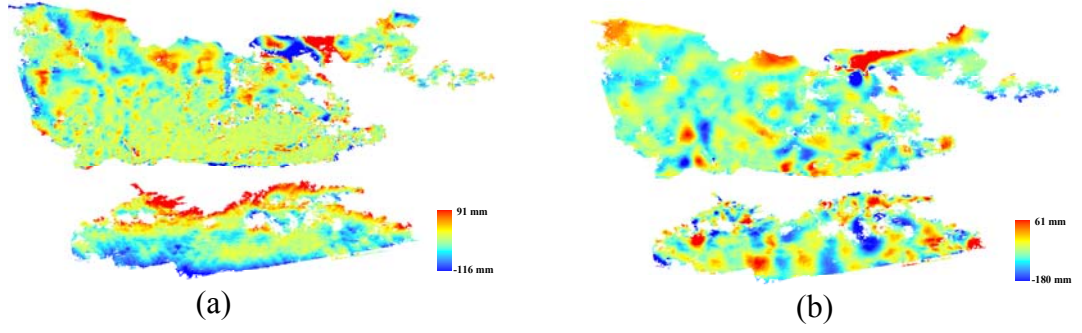
Elde edilen sonuçların asıl veriyi ne kadar temsil ettiğini belirleyebilmek amacıyla, iki yöntemle de örneklenen veri yardımıyla asıl veri tekrar oluşturulmaya çalışılmıştır. Asıl verinin elde edilmesinde Kriging gridlemesi gerçekleştirilmiştir. Buna göre Şekil 4.19'da iki farklı veri seti yardımıyla oluşturulmaya çalışılan ana veri kümesi verilmiştir. Şekil 4.19a Quadtree algoritmasının verisinden elde edilen ana veri kümesini Şekil 4.19b önerilen algoritmanın verisinden elde edilen ana veri kümesini göstermektedir.



Şekil 4.19: İki farklı veri seti yardımıyla oluşturulmaya çalışılan ana veri kümesi

Şekil 4.20'de elde edilen veri kümelerinin, orijinal veri kümesinden olan farkları verilmiştir. Şekil 4.20a'de Quadtree algoritmasının asıl veri kümesiyle karşılaştırılması Şekil 4.20b'de önerilen algoritmanın asıl veri kümesiyle karşılaştırılması verilmiştir.

Elde edilen sonuçlar özet olarak Çizelge 4.7'de verilmiştir. Çizelgedeki değerler incelenirse asıl veri kümesi ile örneklenen veriler yardımıyla elde edilmeye çalışılan asıl veri kümesi arasındaki farkların standart sapması fayın kuzeyinde quadtree algoritması için 5 mm, yeni algoritma için 4.7 mm dir. Fayın güneyi için quadtree algoritması için 17 mm , yeni algoritma için 9.63 mm dir. Maksimum ve minimum değerler de incelendiğinde bu uygulamada yeni algoritma, quadtree algoritmasına göre daha iyi bir sonuç vermektedir. Çizelge 4.6 incelenirse quadtree algoritmasında 1457nokta ile bölge temsil edilirken, yeni algoritmada 1018 nokta ile bölge temsil edilmiştir. Yeni algoritma quadtree algoritmasına göre daha az noktayla, daha doğru şekilde asıl veri kümesini temsil etmektedir.



Şekil 4.20: Algoritmaların asıl veri kümeleriyle karşılaştırmaları

Çizelge 4.7: Nokta Seyreltme Yöntemlerinin Asıl Veri Kümesiyle Karşılaştırılması

QUADTREE	FAYIN KUZEYİ	Minimum (mm)	-40
		Maksimum (mm)	61
		Ortalama (mm)	0.2
		Standart Sapma (mm)	5
	FAYIN GÜNEYİ	Minimum (mm)	-180
		Maksimum (mm)	61
		Ortalama (mm)	5.8
		Standart Sapma (mm)	17.1
YENİ YÖNTEM	FAYIN KUZEYİ	Minimum (mm)	-38
		Maksimum (mm)	44
		Ortalama (mm)	1.5
		Standart Sapma (mm)	4.7
	FAYIN GÜNEYİ	Minimum (mm)	-116
		Maksimum (mm)	48
		Ortalama (mm)	1.37
		Standart Sapma (mm)	9.6

4.7 Ağırlıklandırma

4.7.1 Ters modellemede farklı veri gruplarının birlikte kullanılması

Deprem jeodezisinin birincil amacı fay düzlemi boyunca kayma dağılımının belirlenebilmesi için deformasyon ölçülerinin ters modellenmesidir (Pritchard ve

diğ., 2002). Pratikte yüzey deformasyonu ile ilgili yapılan ölçümler yüzeyi karakterize ettiği varsayılan noktalardan yapılır. Yani yüzey deformasyonu belirlemek amacıyla üzerinde ölçü yapılan GPS veya nivelman noktaları, maliyet ve ölçü zorluğu nedeniyle optimal bir yoğunlukta seçilirler. Bu durum ters modelleme ile deprem parametrelerinin doğru kestirimini sınırlamaktadır. InSAR, bu yöntemlerin kısıtlarını ortadan kaldırmakta, çok daha sık aralıklı ölçü sağlayabilmektedir. Fakat bunla birlikte GPS üç boyutlu deformasyon ölçü sağlarken, InSAR sadece uydu bakış doğrultusunda yani tek boyutta veri sağlayabilmektedir. InSAR ile birlikte diğer veri setlerinin birlikte kullanılmasına ihtiyaç vardır.

Stramondo ve diğ. (1997) 1997 Colfiorito depremi kosismik yüzey deformasyonlarını InSAR ve GPS ölçüleriyle modellemeye çalışmışlardır. Her bir devinim çizgisi üzerinde her 0.5 km'de bir nokta olarak InSAR ölçü sayısını 258'e düşürmüşler ve bu ölçüleri 4 adet GPS ölçüsüyle birlikte ters modellemeye sokmuşlardır. Herhangi bir ağırlıklandırma yapmamışlardır.

Motagh ve diğ. (2006) Mashhad vadisindeki çökmeyi InSAR, nivelman ve GPS ölçüleriyle birlikte belirlemeye çalışmışlardır. Bu çalışmada bütün ölçüler birbirinden ayrı değerlendirilmiş sonuçlar bir birbiriyle karşılaştırılmıştır.

Pritchard ve diğ. (2002), P ağırlık matrisi kullanarak GPS ve InSAR veri setini birlikte kullanmaya çalışarak Antofagasta depremini modellemiştir. Ağırlık matrisinin GPS ile ilgili elemanları, GPS ölçülerinin her bir bileşeninin hatasıyla oluşturulmuştur. InSAR verisinin her bir pikseli için 1 cm'lik korelasyonsuz hata kabul edilmiş ve ağırlık matrisi buna göre oluşturulmuştur.

Johnson ve diğ. (2002) Hector Mine depremiyle ilgili olarak fay kayma dağılımı InSAR ve GPS ölçüleriyle belirlemeye çalışmışlardır. Bunun için 4.6.1 bölümünde ifade edilen quadtree algoritması ile InSAR ölçü sayısı 1.5 milyondan 843'e düşürülmüştür. Bu ölçülere 55 noktadaki GPS ölçüleri de katılmış , ölçüler birbirinden bağımsız olarak değerlendirilerek diyagonal kovaryans matrisi oluşturulmuştur. InSAR ölçüleri için belirsizlik değeri 3 cm olarak alınmıştır.

Simons ve diğ. (2002) ise yine aynı deprem için InSAR ve GPS ölçülerini kullanarak modelleme yapmaya çalışmışlardır. Onların çalışmasında InSAR ölçüleri hesaplama yükünün azaltılması amacıyla deformasyon alanının eğrilğine (ikinci derece

türevine) bağı olarak örneklenmiştir. Elde edilen örneklenmiş veri GPS ölçüleriyle birlikte kullanılabilmesi amacıyla ağırlıklandırılmıştır.

Fialko (2004), Landers depreminin farklı ölçü gruplarıyla birlikte modellenmesi için InSAR veri setinin quadtree algoritması ile seyrekletmiş ve tüm veri setlerini ağırlıklandırmıştır.

İzmit depremi için de GPS ve InSAR verilerinin birlikte kullanılmasına yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Feigl ve diğ. (2002) GPS, InSAR ve fotogrametrik ölçü gruplarıyla bir birinden bağımsız olarak ayrı ayrı İzmit depremini incelemiş ve sonuçlarını karşılaştırmışlardır.

Bos ve diğ. (2004) iki aşamalı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. GPS yardımıyla kestirdikleri parametreler yardımıyla InSAR noktalarındaki ölçüleri hesaplamışlar ve ölçülen ve hesaplanan arasındaki farkları incelemişlerdir.

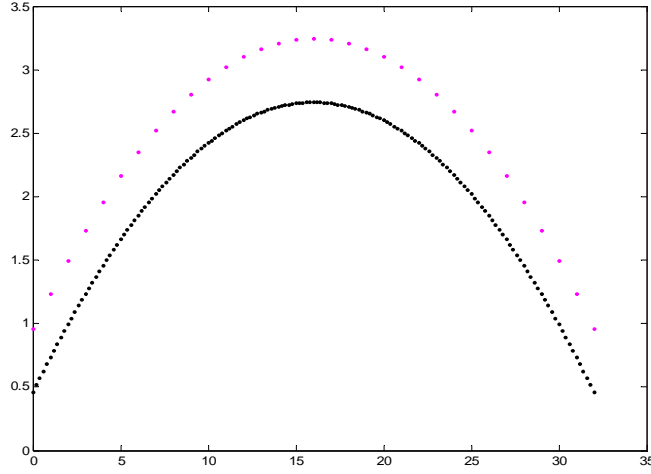
4.7.2 İzmit çalışması için ağırlıklandırma

İki farklı veri setinin yani GPS ölçüleriyle InSAR ölçülerinin birlikte kullanılabilmesi için ve InSAR ölçülerinin sayı olarak daha fazla olması nedeniyle baskın olmaması için ağırlıklandırmaya ihtiyaç vardır.

Birleşik ters modellemede farklı veri setlerin dengeli katkılarının sağlanabilmesi için, her bir veri setinin normalize edilmesi gerekmektedir (Simons ve diğ., 2002). Bu şekilde veri noktalarına atanan ağırlıkların toplamı 1 olur.

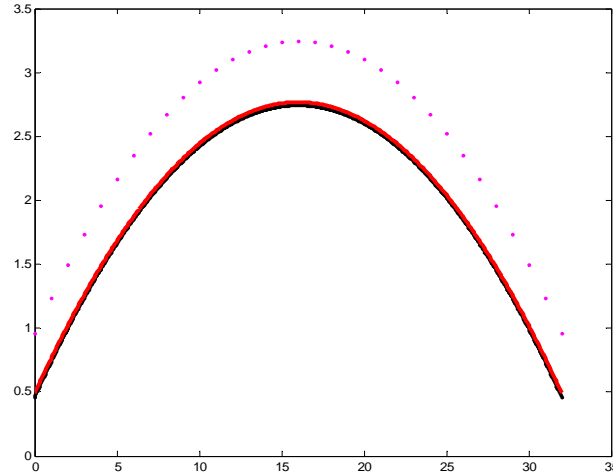
$$\sum_{i=1}^N w_i = 1 \quad (4.2)$$

Şekil 4.21’de siyah ile gösterilenlerin yeryüzünde bir kesit boyunca InSAR ölçüleri gibi ölçü noktasının fazla olduğu veri setini, kırmızıyla gösterilenler ise aynı kesit üzerinde GPS gibi daha az ölçü noktasına sahip veri kümesini temsil etmektedir. Veri setinden biri 33, diğeri ise 674 noktadan oluşmaktadır.



Şekil 4.21: Farklı gözlem nokta sayısına sahip iki farklı veri

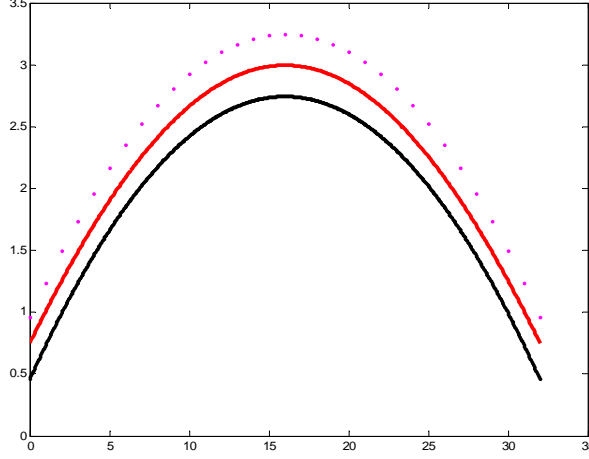
İki ölçü grubundan oluşan ölçü kümesi için veri kümeleri dikkate alınmadan bütün ölçüler için aynı ağırlık alınıp üçüncü dereceden bir polinom en küçük kareler yöntemiyle geçirilmeye çalışılırsa Şekil 4.22'deki görüntü elde edilir. Bu görüntüde kırmızı çizgi oluşturulan polinomu ifade etmektedir. Polinom tamamen verisi yoğun olan veri kümesine yapışmış durumdadır.



Şekil 4.22: Ölçüler için gerçekleştirilen ağırlıksız polinom

İki ölçü grubundan oluşan ölçü kümesi için veri kümeleri dikkate alınarak verilerin ağırlıkları kendi veri kümelerindeki toplamı 1 olacak şekilde normalize edilip buna göre üçüncü dereceden bir polinom en küçük kareler yöntemiyle geçirilmeye

çalışılırsa Şekil 4.23'deki görüntü elde edilir. Bu görüntüde kırmızı çizgi oluşturulan polinomu ifade etmektedir. Oluşturulan polinoma iki veri setinin dengeli katkısı gözlemlenmektedir.



Şekil 4.23: Ölçüler için gerçekleştirilen ağırlıklı polinom

Buna göre, GPS ile belirlenen deformasyon ölçüleri için ağırlık ;

$$w_i = \frac{1}{\sigma_i \sum_{j=1}^N \frac{1}{\sigma_j}} \quad (4.3)$$

eşitliğiyle tanımlanmıştır. σ_i , GPS verisi için GPS'den elde edilen yer değiştirme vektörlerinin %95 güven sınırına karşılık gelen standart sapmasıdır. N, GPS ölçü sayısıdır. GPS ölçülerinin tek başına kullanıldığı durumdaki ağırlıklandırmadan tek fark, eşitliğin $\sum_{j=1}^N \frac{1}{\sigma_j}$ kısmıdır. Bu kısım normalizasyonun sağlanması için kullanılmaktadır.

InSAR ölçüleriyle belirlenen deformasyon için ağırlık;

$$w_i = \frac{\sqrt{n_i}}{\sum_{j=1}^N \sqrt{n_j}} \quad (4.4)$$

eşitliğiyle tanımlanmıştır (Simons ve diğ., 2002). Uydunun bakış doğrultusundaki yerdeğiştirme hataları halihazırda mevcut değildir ve veri noktaları basitçe karşılık geldikleri alandaki piksel sayısı ile orantılı olarak ağırlıklandırılmıştır. Yani veri

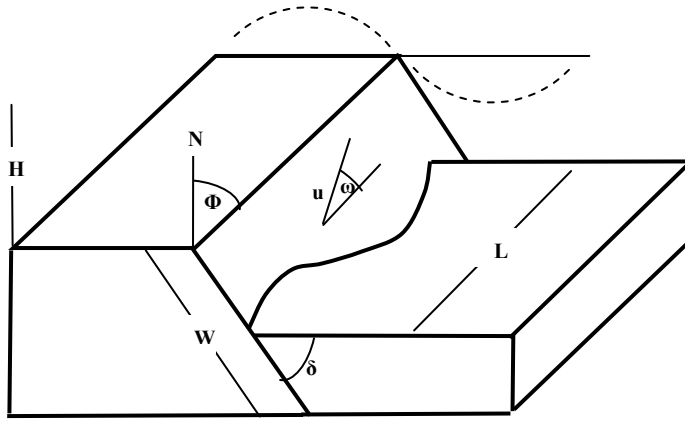
indirgenirken, indirgenen verinin her bir noktası asıl veri kümesinde kaç noktayı temsil ediyorsa ona göre ağırlıklandırılmaktadır. w_i ağırlıklandırması her bir örneklenmiş i noktası için uygulanmıştır.

n_i , i verisinin değerinin elde edildiği piksel sayısı ve n_j ise N hücredeki her bir nokta sayısıdır.

4.8 Çok Katmanlı Yarı Uzay İçin Ters Modelleme

4.8.1 Fay parametreleri

Faya ait parametreler Şekil 4.24’de verilmiştir.



Şekil 4.24: Fay parametreleri

ϕ = Fay doğrultusunun azimutu (strike)

ω = Kayma vektörünün yönü (rake açısı) (strike açısı ile kayma doğrultusu arasındaki açıdır ; $-\pi < \omega \leq \pi$)

δ = Eğim açısı (dip) (yataydan itibaren ölçülür ; $0 \leq \delta \leq \pi/2$)

u = Kayma vektörü

L = Fay uzunluğu

W = Fay düzlemi genişliği

H = Fay düzlemi derinliği

X_0 = Fay segmentinin başlangıç boylamı

Y_0 = Fay segmentinin başlangıç enlemi

Kayma vektörünün yönü, fay düzlemi içerisinde ölçülür. Fayın iki yüzü vardır. Şekil 4.24'de sol tarafta alttaki kısım taban blok (foot wall) olarak isimlendirilir, sağ taraftaki üstteki yüz ise tavan blok (hanging wall) olarak isimlendirilir. u kayması tavan bloğun taban bloğa olan doğrultusuna göre tanımlanır. Kayma vektörünün yönü, fay doğrultusunun azimutu ile kayma doğrultusu arasındaki açıdır.

4.8.2 Ters modelleme

Ters modelleme, fay boyunca konumsal kayma değişimlerinin kestirimi için gereklidir. Deprem jeodezisinin birincil görevi fay düzlemi boyunca kayma dağılımının belirlenebilmesi için ölçülerin ters modellenmesidir (Pritchard ve diğ., 2002). Verilen fay parametreleri için (konum, fay uzunluğu, derinlik, kayma, fay doğrultusunun azimutu, eğim açısı ve kayma vektörünün yönü) deformasyon hesabı kolay olan düz (forward) bir işlemdir. Ters problem yani ölçülen deformasyon yardımıyla fay parametrelerinin hesaplanması zor bir işlemdir. Çünkü hesaplanan yer değiştirmeleri fay kayma miktarı hariç fay parametrelerine lineer olarak bağlı değildir. Yeryüzündeki deformasyon, fay parametreleriyle Eşitlik: 4.5 ile ilişkilendirilebilir (Jonsson ve diğ.,2002). Buna göre;

$$d = g(m) + \varepsilon_1 \quad (4.5)$$

olur. Burada: d, ölçülen yer değiştirme vektörleri, m ise kaynak geometri vektörüdür yani fay parametreleridir. m kaynak vektörü içerisinde fayın kayma miktarı, uzunluğu, derinliği, eğim açısı, konumu gibi parametreler vardır. g , parametreler ile ölçüler arasındaki ilişkiyi tanımlayan fonksiyondur (Cervellive diğ., 2001). g fonksiyonu, tek katmanlı veya çok katmanlı analitik modelleri ifade etmektedir.

Tek katmanlı modeller, yer kabuğunun tek katmandan, çok katmanlı modeller ise yer kabuğunun birden fazla katmandan oluştuğunu kabul etmektedir.

ε ölçü hatalarına karşılık gelmektedir. Yer değiştirme vektörleri, kaynak geometri parametrelerini nonlineer olarak bağlıdır. Yer değiştirme vektörleri yardımıyla, kaynak geometri parametleri kestirimi bir doğrusal olmayan optimizasyon problemidir.

4.5 denklemi bir ters modelleme problemi olarak alınır, m fay parametreleri GPS veya InSAR ölçüleriyle tespit edilen yüzey deformasyonları yardımıyla belirlenebilir. Yapılmak istenen, ölçülere en uygun modelin oluşturulmasıdır yani 5.2 denleminde verilen veri düzeltmelerinin L2 normunu minimize eden modelin belirlenmesidir (Resor ve diğ., 2005).

$$\min \|g(m) - d\|_2 \quad (4.6)$$

Bu doğrusal olmayan optimizasyonun çözümü için farklı yöntemler mevcuttur. Yapay yaşlandırma (simulated annealing) bunlardan bir tanesidir. Bu yöntemin detayları Cervelli tarafından ifade edilmiştir (Cervelli ve diğ., 2001). Bu yöntem değişik “ısı”larda bir çok iterasyon yaparak global minimumu yakalamaya çalışmaktadır. “Isı” araştırmada rasgeleliğin derecesini belirlemektedir. Yüksek “ısı”larda araştırma tamamen rasgeledir. Düşük “ısı”larda ise lokal olasılık dağılımına göre yüksek derecede yönlendirilmiştir. Soğutma programı uygulanarak neredeyse bütün olasılıkların denendiği rasgele araştırmadan, çok daha sınırlanmış global minimum çevresindeki olasılıkların denendiği bir düzeye inilmektedir. Zamanın büyük kısmı global minimumun yakınındaki kritik “ısı” civarında harcanmaktadır. Annealing metodu kullanılarak bulunan global minimum yakınında mutlak minimum türev bazlı yöntemlerle bulunarak model iyileştirilir. Kozani-Grevena depremi Resor tarafından bu yöntemle modellenmiştir (Resor ve diğ., 2005).

Diğer bir yöntem downhill simplex yöntemidir (Wright ve Parsons, 2001a). Bu yöntem modelden hesaplanan yer değiştirmeler ile ölçülen yer değiştirmeler arasındaki farkı en küçük kareler ile minimize etmeye çalışmaktadır. Fakat ters modelleme bir çok parametre içerdiği için global minimum yerine lokal minimuma erişilebilir. Bunun önlenmesi için Monte-Carlo yaklaşımı bu yöntemle birlikte kullanılmaktadır (Clarke ve diğ., 1997). Bu melez yöntemde ters modelleme defalarca rastgele seçilmiş başlangıç parametrelerine göre tekrarlanmaktadır. Tekrar başlangıçların sayısı modellenmenin karmaşıklığına bağlıdır.

Diğer bir yöntem ise rasgele maliyettir (random cost). Ölçülen ile hesaplan değerler arasındaki farktan oluşan uyuşumsuzluk uzayında basit stokastik model kullanarak rasgele yürüyüşler yaparak global minimum değerini yakalamaya çalışan monte carlo yönteminin farklı bir yaklaşımıdır. Monte Carlo yönteminin diğer uygulamalarından daha az etkili olmasına rağmen daha basit bir yöntemdir (Cervelli ve diğ., 2001).

Eşlenik gradyent gibi türev bazlı algoritmalar bu problemin çözümü için açık, basit ve etkili yaklaşımlar sunarlar. Bu algoritmalar, türev tabanlı ve yüksek dereceli türevlere bağlı oldukları için, global minimum yerine lokal bir minimuma yakınsayabilirler. Bu algoritmalar genelde başlangıç değerleri global minimuma yakın olduğunda iyi sonuçlar vermektedirler. Eğer ters modellemede kullanılacaksa jeolojik ve sismolojik verilerden başlangıç değerleri için iyi bir ön bilgiye ihtiyaç vardır.

Yapılan bu çalışmada Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmıştır. Bu algoritmayla ilgili detaylı bilgi verilecektir.

4.8.3 Levenberg-Marquardt algoritması

Levenberg-Marquardt algoritması (LMA) matematikte genellikle lineer olmayan ve bir çok parametresi olan bir fonksiyonun minimize edilebilmesi için sayısal çözümler sağlar.

LMA, Gauss –Newton algoritması (GMA) ile türev azalması algoritmasının karışımıdır. LMA, GMA'dan çok daha fazla güvenilirdir. Yani sonuç değerden çok uzakta iterasyona başlasa da doğru çözümü bulunabilmektedir. Fakat diğer taraftan, iyi başlangıç değerleri için LMA GMA'dan daha yavaş çalışmaktadır.

Eşitlik 4.7'e göre ampirik (t_i, y_i) veri çiftleri için $f(t|\mathbf{p})$ model eğrisinin p parametreleri optimize edilecekse, model ile hesaplanan değer ile veri çiftinden gelen değer arasındaki sapmaların karelerinin toplamının minimum olması gerekir.

$$S(p) = \sum_{i=1}^m \langle y_i - f(t_i | p) \rangle^2 \quad (4.7)$$

Diğer minimizasyon problemleri gibi, Levenberg-Marquardt yöntemi iteratif bir işlemdir. Minimizasyona başlamak için, kullanıcı p parametrelerinin başlangıç değerlerini tahmin etmesi gerekmektedir. Bu yöntemde çoğu durumda hiçbir ön bilgisiz gerçekleştirilen ön parametre tahmini sonucunda doğru sonucu ulaşmak mümkün olabilmektedir.

Her iterasyonda, parametre vektörü p yeni kestirim olan $p+q$ ile değiştirilir. q nun belirlenebilmesi için ;

$$f(p+q) \approx f(p) + Jq \quad (4.8)$$

olarak kabul edilir J, f fonksiyonunun p noktasındaki Jakobyenidir.

Karelerin toplamının minimumum olduğu S’de Jakobyenin q ‘ya göre gradyenti 0’dır. Yukarıdaki denklemin sağ tarafının karesinin diferansiyeli 0’a eşitlenirse;

$$(J^T J)q = -J^T f \quad (4.9)$$

q , $J^T J$ ‘nın tersi ile elde edilebilir.

LMA’nın en kilit özelliği bu eşitliğin indirgenmiş versiyonu ile değiştirilmesidir.

$$(J^T J + \lambda J)q = -J^T f \quad (4.10)$$

I birim matristir. Negatif olmayan indirgeme faktörü λ , her bir iterasyonda tekrar hesaplanır. Eğer S’nin azalması hızlı ise λ değeri için küçük değerler verilerek algoritma GNA’ya yaklaştırılır. Aksi durumda; λ değeri büyütülerek aralıkları gradyent azaltma yönüne kaydırılır. Bulunan p değerleri ile hesaplanan hataların karelerinin toplamı önceden belirlenen değerden daha düşük olduğu yerde iterasyona son verilir ve bulunan değerler sonuç p değerleri olarak kaydedilir.

4.8.4 İzmit depremi için çok katmanlı modelle ağırlıklandırma yapılarak ters modelleme

İzmit Depremi için tek katmanlı elastik yarı uzayda ters modelleme farklı çalışmalarda gerçekleştirilmiştir (Cakir ve diğ., 2003; Wright ve Parsons,2001a; Reilinger ve diğ., 2000). Tek katmanlı yarı uzay için düz modelleme en genel haliyle ifade edilmiştir (Okada, 1985; Okada, 1992). Wright ve Parsons (2001a) tarafından İzmit Depremi fay parametrelerinin hesabı için gerçekleştirilen çalışmada, InSAR ölçüleriyle ters modelleme tek katmanlı yer kabuğu için gerçekleştirilmiştir. Bu modelleme sonucunda bulunan fay parametreler Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Bu tez çalışmasında, şimdiye kadar yapılan çalışmalardan farklı olarak, yer kabuğu çok katmanlı kabul edilerek ters modelleme gerçekleştirilmiştir. Ayrıca; InSAR ölçüleri yeni bir yöntemle seyrekleştirilmiş, GPS ve InSAR ölçüleri birlikte kullanılabilir şekilde ağırlıklandırma yapılarak modellemeye sokulmuştur. Çok katmanlı yer kabuğu için düz modellemenin detayları Wang (2003) tarafından verilmiştir. Wang’in verdiği analitik modeller Matlab programına aktarılmıştır.

Modelleme çalışmasında ilk olarak deformasyonun kapladığı alan ve çok katmanlı modelleme için Green fonksiyonları oluşturulmuştur. Bu işlem UNIX platformda gerçekleştirilmiştir. Çok katmanlı model parametreleri TÜBİTAK-MAM'dan alınmıştır.

Green fonksiyonları oluşturulduktan sonra bu fonksiyonları kullanan analitik model Matlab'de programlanmıştır. Oluşturulan bu düz modelle birlikte 4.11 eşitliğine göre ters modelleme gerçekleştirilmiştir. Ters modelleme için Levenberg- Marquardt algoritması uygulanmıştır. Modellemede Minimize edilen büyüklük 4.11 eşitliğinde verilmiştir.

$$\sum_{i=1}^M [\beta w_i (o_i - c_i)]^2 + \sum_{i=1}^N \beta [w_i (o_i - c_i)]^2 \quad (4.11)$$

M, GPS ölçü sayısı, N InSAR ölçü sayıdır (hücre sayısı) o değişkeni ölçülen değer ve c değeri hesaplanan değere karşılık gelmektedir. β , görelî ağırlıklandırma faktörü 1 olarak atanmıştır.

Bu modelleme için başlangıç değerleri olarak Çizelge 4.8'de verilen Wright ve Parsons (2001a) tarafından hesaplanan parametreler kullanılmıştır. Wright ve Parsons tarafından hesaplanan parametreler tezin bundan sonraki kısımlarında eski parametreler olarak ifade edilecektir. Bu çalışmada yapılan modelleme sonucunda elde edilen fay parametreleri Çizelge 4.9'da verilmiştir.

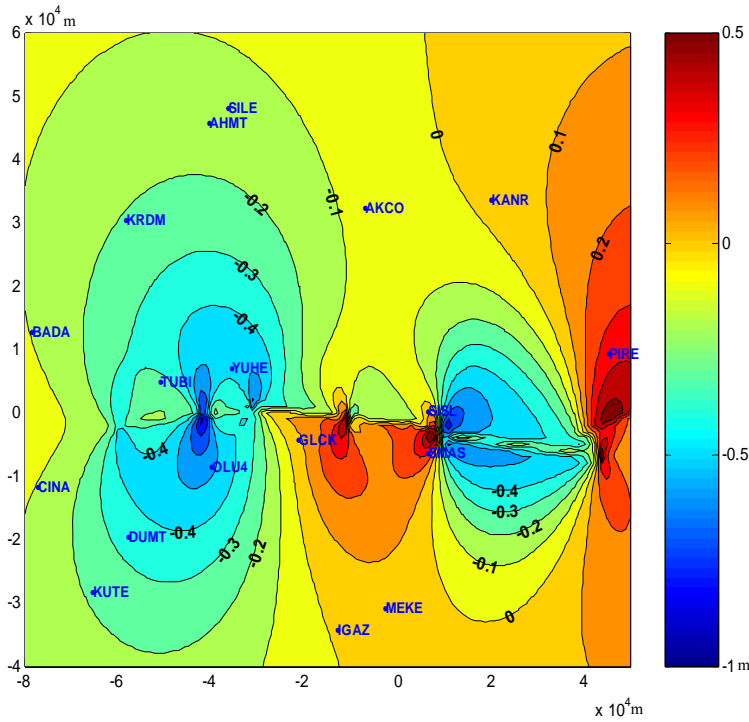
Çizelge 4.8: İzmit Depremi için hesaplanan fay parametreleri

Kayma	Yukarı Değer	Sağa Değer	Derinlik	Uzunluk	Fayın derinliği	Azimut	Eğim Açısı	Rake
1.70	-2.4d+03	-61.0d+03	0.0d+00	20.1d+03	20.0d+03	84.0	88.0	174.0
2.50	0.5d+03	-41.1d+03	0.0d+00	10.5d+03	20.0d+03	91.0	86.0	171.0
4.90	1.1d+03	-30.6d+03	0.0d+00	20.3d+03	20.0d+03	96.0	86.0	178.0
4.60	-2.3d+03	7.6d+03	0.0d+00	18.2d+03	20.0d+03	277.0	88.0	-178.0
2.10	-4.5d+03	41.6d+03	0.0d+00	34.2d+03	20.0d+03	276.0	81.0	-164.0
1.70	6.5d+03	79.0d+03	0.0d+00	32.8d+03	20.0d+03	249.0	61.0	-168.0

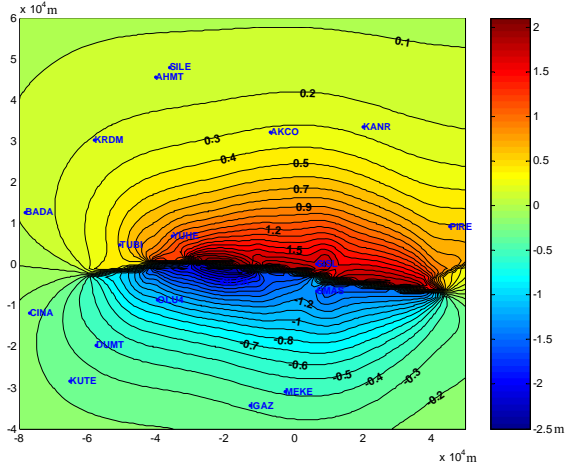
Bu yeni fay parametrelerine göre hesaplanan yer değiştirme byklklri, Kuzey-güney bileşeni için Şekil 4.25’de, doğu-batı bileşeni için Şekil-4.26’de, yükseklik bileşeni için Şekil 4.27’de verilmiştir. InSAR llerinin değerlendirilmesi için uydu bakış doğrultusundaki bileşen ise Şekil 4.28’de verilmiştir. Őekillerdeki büyüklükler metre biriminden verilmiştir. Şekillerde, alışma alanının ortasına göre lokal izdüşüm koordinat sistemi tanımlanmıştır.

Çizelge 4.9: İzmit Depremi için hesaplanan yeni fay parametreleri

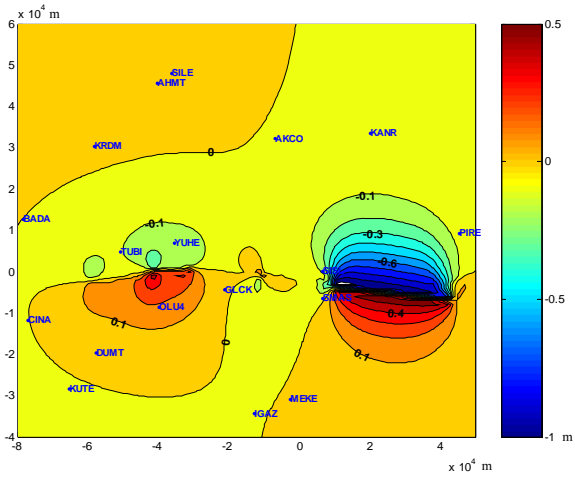
Kayma	Yukarı Değer	Sağa Değer	Derinlik	Uzunluk	Fayın derinliği	Azimet	Eğim Açısı	Rake
1.38	-2.3d+03	-59.6d+03	0.0d+00	20.5d+03	19.7d+03	84.4	89.4	172.1
3.14	0.4d+03	-41.7d+03	0.0d+00	10.6d+03	19.8d+03	90.5	87.8	171.6
4.61	0.9d+03	-30.9d+03	0.0d+00	19.9d+03	19.7d+03	95.4	87.5	179.3
3.63	-2.5d+03	7.6d+03	0.0d+00	17.8d+03	19.8d+03	276.3	89.0	-179.0
3.84	-6.9d+03	43.8d+03	0.0d+00	33.8d+03	20.6d+03	275.3	76.1	-153.6
0.50	8.0d+03	72.0d+03	0.0d+00	35.9d+03	21.0d+03	249.8	54.2	-159.7



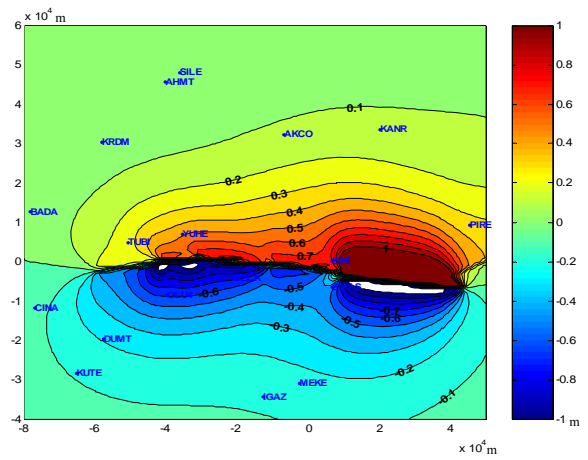
Şekil 4.25: Kuzey-Güney bileşeni için hesaplanan yer değiştirme miktarları



Şekil 4.26: Doğu-Batı bileşeni için hesaplanan yer değiştirme miktarları



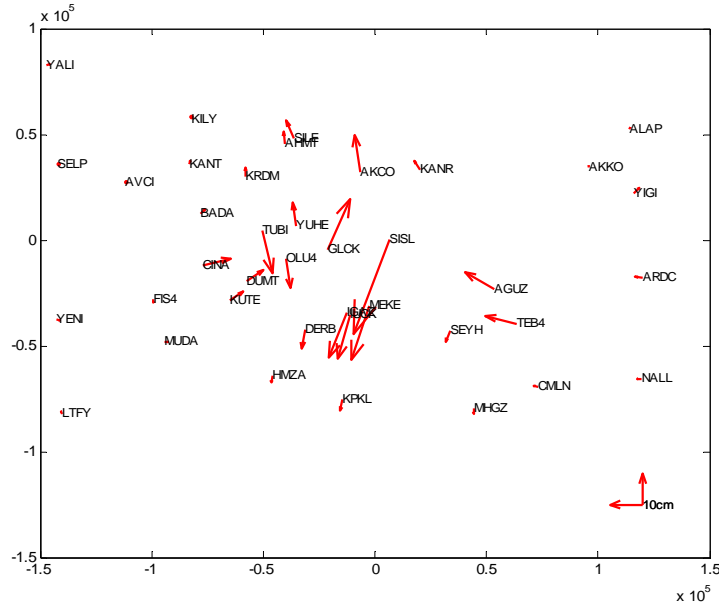
Şekil 4.27: Yükseklik bileşeni için hesaplanan yer değiştirme miktarları



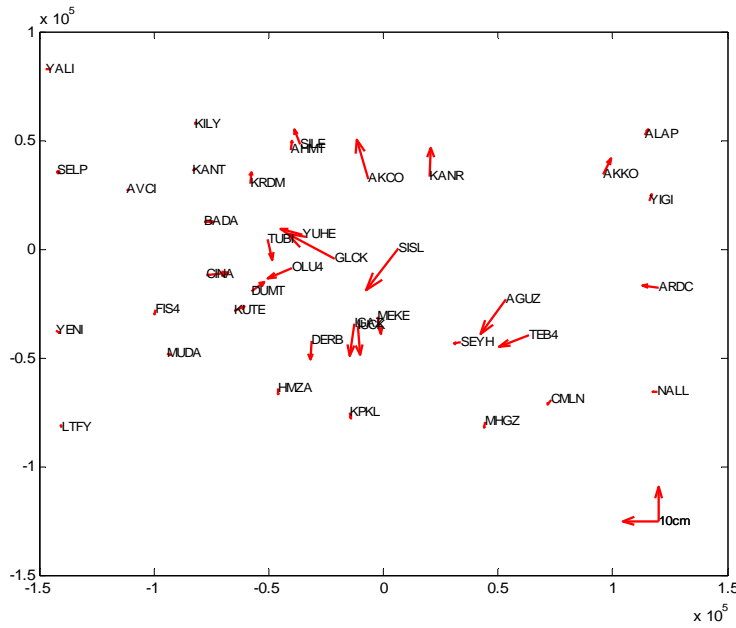
Şekil 4.28: Uydu Bakış Doğrultusu için hesaplanan yer değiştirme miktarları

4.8.5 Yeni parametrelerin eski parametrelerle karşılaştırılması

Eski parametrelerle GPS noktalarında hesaplanan yer değiştirmeler ile aynı noktalardaki ölçümler arasındaki farklar yatay koordinatlar için Şekil 4.29'da, yeni parametreler için Şekil 4.30'da verilmiştir.

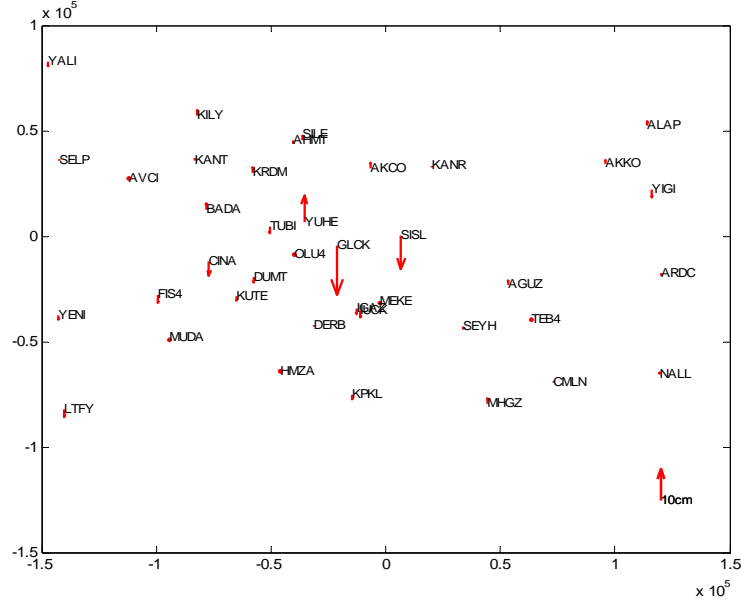


Şekil 4.29: GPS yatay koordinatlarında eski parametrelerle hesaplanan deformasyon ile ölçülen deformasyon arasındaki fark

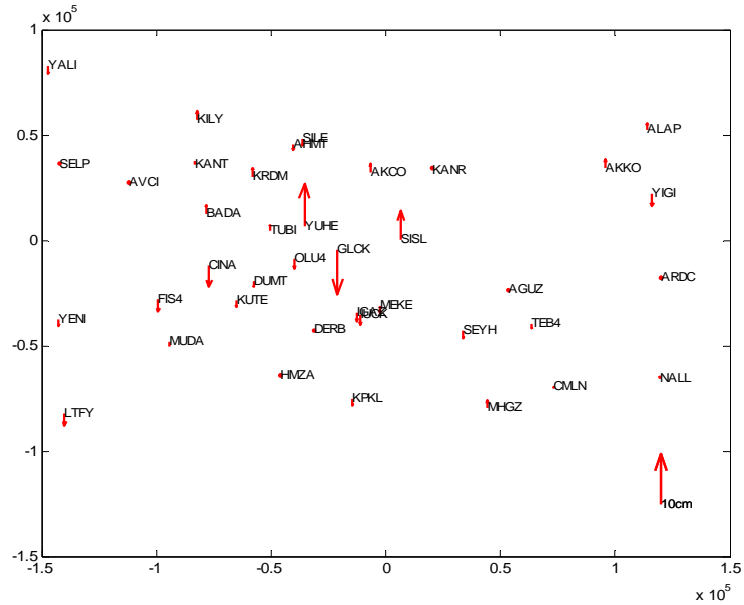


Şekil 4.30: GPS yatay koordinatlarında yeni parametrelerle hesaplanan deformasyon ile ölçülen deformasyon arasındaki fark

Eski parametrelerle GPS noktalarında hesaplanan yer değiştirmeler ile aynı noktalardaki ölçümler arasındaki farklar düşey koordinatlar için Şekil 4.31’de, yeni parametreler için Şekil 4.32’de verilmiştir

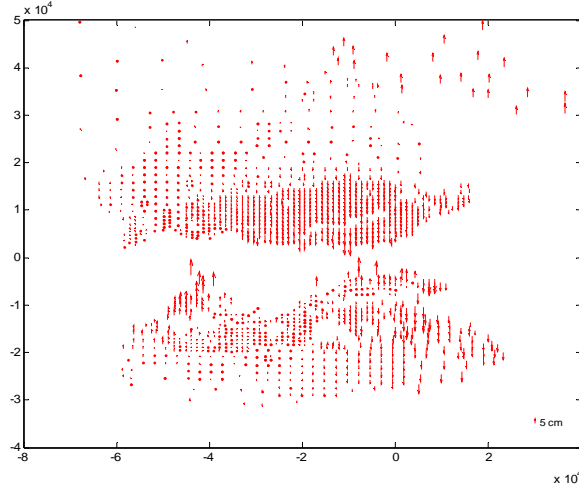


Şekil 4.31: GPS düşey koordinatlarında eski parametrelerle hesaplanan deformasyon ile ölçülen deformasyon arasındaki fark

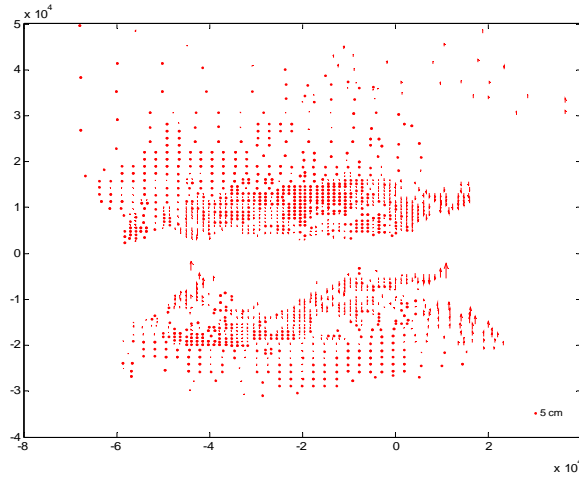


Şekil 4.32: GPS düşey koordinatlarında yeni parametrelerle hesaplanan deformasyon ile ölçülen deformasyon arasındaki fark

Eski parametrelerle InSAR noktalarında hesaplanan yer değiştirmeler ile aynı noktalardaki ölçümler arasındaki farklar uydu bakış doğrultusu için Şekil 4.33’de, yeni parametreler için Şekil 4.34’de verilmiştir



Şekil 4.33: InSAR ölçü noktalarında eski parametrelerle hesaplanan deformasyon ile ölçülen deformasyon arasındaki fark



Şekil 4.34: InSAR ölçü noktalarında yeni parametrelerle hesaplanan deformasyon ile ölçülen deformasyon arasındaki fark

Eski ve yeni parametrelere göre hesaplanan değerlerin, ölçülen değerler ile karşılaştırılmasına ait özet bilgi Çizelge 4.10’de verilmiştir. Çizelgedeki ortalama sütunu farkların ortalamasını ifade etmekte, mutlak değer ortalaması ise farkların mutlak değerinin ortalamasına karşılık gelmektedir.

Çizelge 4.10: Eski ve yeni fay parametrelerinin karşılaştırması

	Eski Parametre			Yeni Parametre		
	Ortalama (cm)	Mutlak Değer Ortalaması (cm)	Standart Sapma (cm)	Ortalama (cm)	Mutlak Değer Ortalaması (cm)	Standart Sapma (cm)
GPS (kuzey)	-1.1	4.9	8.1	-0.4	3.3	4.8
GPS (doğu)	0.6	2.5	3.8	-0.9	2.4	3.8
GPS (Yükseklik)	0.8	2.1	3.7	-0.3	1.8	2.7
InSAR	-2.1	3.8	4.20	-1.8	4.2	4.0

Çizelge 4.10 incelendiğinde, GPS ölçüleri ağırlıklandırılarak yeni parametrelerin hesaplamasına katıldığı için, GPS noktalarındaki hesaplanan ile ölçülen değer arasındaki farkta iyileşme, InSAR ölçülerinde ise nokta seyrekletmesi ve ağırlıklandırma ile baskın olma özelliği azaltıldığı için, mutlak değer ortalamasında artma görülmüştür.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; InSAR uygulaması için İzmit Depremine ait ERS uydusunun SAR görüntülerinden yararlanılmıştır. İzmit depremi ve bölgesine ait deprem öncesi ve deprem sonrası SAR görüntüleriyle birlikte, sayısal yükseklik modeli olarak bölgeye ait SRTM verisi ve Delft Üniversitesi tarafından hesaplanan yörünge bilgileri kullanılarak İzmit Depremine ait interferogram Bölüm 4.4 açıklandığı şekilde oluşturulmuştur.

InSAR ölçülerinin doğruluğu, GPS ölçüleri yardımıyla değerlendirilmeye çalışılmıştır. İzmit depremi öncesinde ve sonrasında yapılan GPS ölçülerinden hesaplanan deprem anı yer değiştirme miktarları Rob Reilinger ve diğ. (2000) tarafından yayınlanmıştır. Bu noktalardan 11 tanesi oluşturulan interferogram üzerine düşmektedir.

GPS ve InSAR ölçüleri karşılaştırılırken fayın kuzeyi ve güneyindeki farkları birbirinden ayrı olarak değerlendirilmiştir. Fayın kuzeyindeki GPS noktaları ile aynı konumdaki InSAR ölçüleri karşılaştırıldığında farkların ortalaması Bölüm 4.5’de detayları açıklandığı gibi 38 mm’dir. Seçilen başlangıç noktasındaki kayıklığı gidereceği ve doğruluk araştırması açısından daha iyi sonuç vereceği değerlendirildiği için GPS noktaları arasındaki görelî koordinat farklarıyla aynı noktalardaki InSAR ölçülerinin görelî farkları birbirleriyle karşılaştırılmıştır. GPS ile InSAR ölçüleri arasındaki farkların ortalaması 20 mm ve standart sapması ± 7 mm’dir.

InSAR ile GPS ölçüleri arasındaki özellikle görelî farklar incelendiğinde InSAR ölçüleriyle uyumlu olduğu, aradaki farkların ortalamasının 20 mm olduğu belirlenmiştir. Mevcut farkın olası nedenleri şunlardır: Deprem sonrası hareketin InSAR ölçülerinin içerisinde olması, GPS ölçüleri içerisinde olmaması etkenlerden birisidir. Ayrıca GPS ölçülerinin özellikle pilye üzerinde yapılmayanlarının yükseklik bileşeni, hem GPS’in sistem olarak yükseklik belirsizliğinin fazla olması,

hem de anten yükseklik ölçüm problemleri nedeniyle yatay bileşeni kadar doğru olmadığı koordinat belirsizlikleri incelendiğinde görülmektedir. InSAR tekniği, uydu bakış doğrultusundaki yer değiştirmeleri ölçtüğü ve uydu bakış doğrultusu bu çalışmada ERS uyduları için düşeyle yaklaşık 23^0 derece yaptığı için uydu bakış doğrultusuna asıl katkı GPS ile karşılaştırıldığında düşey bileşenden gelmektedir. Aradaki farkın bir nedeninin de bu olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca InSAR için uydu yörünge bilgisi ve atmosferik değişkenlik aradaki farkın diğer nedeni olduğu düşünülmektedir. Kullanılan sayısal yükseklik modelinin çözünürlüğünün yüksek olması, aynı zamanda yükseklik belirsizliğinin de fazla olması nedeniyle sayısal yükseklik modeli kaynaklı bir hatanın sonuç interferograma katkısı olmadığı değerlendirilmektedir.

Fayın güneyindeki 3 nokta için de farkların hepsi aynı yönlüdür ve ortalaması 94 mm'dir. Fayın kuzeyi için belirtilen nedenlerin yanında asıl sebebin faz çözüm başlangıç noktasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Bu noktada deformasyon 0 olarak kabul edilmesine rağmen, bu noktanın hemen güneyindeki IGAZ GPS noktasındaki deformasyonun uydu bakış doğrultusundaki bileşeni 91 mm'dir. Bu deformasyonla, GPS InSAR ölçüleri arasındaki fark birbirine çok yakındır. Buna göre GPS ile InSAR ölçüleri tutarlıdır denilebilir.

InSAR ölçüleri sayı olarak çok fazla olduğu için üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadan önce hesaplama kolaylığı sağlaması açısından seyrekleştirilmesine ihtiyaç vardır. Quadtree algoritması her seferinde veriyi düzgün şekillerle dörde bölerek veri indirgemesine gittiği için normalde veri içerisinde olan desenleri dikkate almamaktadır. Ayrıca her bir çeyreğin sınırında da problem olabilmektedir. Bu nedenle veri seyreltmesiyle ilgili Bölüm 4.6.3'de açıklanan yeni bir algoritma geliştirilmiştir.

Geliştirilen algoritma; veri içerisine belli aralıklarla kontur çizgilerinin geçirilmesine, bu çizgilerin basitleştirilmesine ve basitleştirilen çizgilerin kırıklık noktalarının noktaya çevrilip daha sonra ağırlıklandırmada kullanılmak üzere her bir noktanın temsil ettiği nokta sayısının hesaplanmasına dayanmaktadır. Bu algoritma ve quadtree algoritması İzmit depremi için oluşturulan InSAR verisiyle test edilmiştir. Geliştirilen algoritma; quadtree'ye göre veriyi 2/3 oranında daha az sayıda nokta ile

daha doğru bir şekilde ifade etmiştir. Bu algoritmanın bundan sonraki çalışmalarda kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

InSAR verisi seyrekleştirilmesine rağmen veriyi temsil edebilecek sayıdaki nokta GPS nokta sayısına göre çok fazladır. İki farklı veri setinin yani GPS ölçüleriyle InSAR ölçülerinin birlikte kullanılabilmesi için ve InSAR ölçülerinin sayı olarak daha fazla olması nedeniyle baskın olmaması için ağırlıklandırmaya ihtiyaç olduğu Bölüm 4.7’de ifade edilmiştir. Ağırlıklandırmada ilk önce iki farklı veri setinin eşit katkısını sağlamaya çalışılmış, daha sonra eğer bir veri setinin daha etkin olması isteniyorsa onun görece ağırlığı bir çarpanla artırılması yoluna gidilmiştir.

GPS veri setinin ağırlıklandırmasında GPS koordinatlarının hatalarından yararlanılmış, InSAR veri setinin ağırlıklandırmasında ise InSAR ölçülerinin doğruluğuyla ilgili bir bilgi olmadığı için ve her bir noktanın doğruluğu yaklaşık olarak aynı olduğu için seyrekleştirme sonrası her bir noktanın temsil ettiği nokta sayısına göre ağırlıklandırma yapılmıştır. Her bir veri setinin eşit katkısını sağlayabilmek için ağırlıklar normalize edilmiş bu şekilde veri setlerinin her birinin toplam ağırlığı 1 olmuştur. Her hangi bir veri setinin ağırlığının görece olarak daha fazla olması istenilmesi durumunda bir çarpan ile o veri setinin ağırlığı artırılabilir.

İzmit Depremi için şimdiye kadar yapılan çalışmaların hepsi tek katmanlı yarı uzaydaki ters modellemelere dayanmakta idi. Çok katmanlı yarı uzayda, geliştirilen nokta seyrekleştirme yöntemi ve ağırlıklandırma stratejisi ile ters modelleme gerçekleştirilmiştir. Bulunan fay parametreleri Çizelge 4.9’da verilmiştir. Bulunan bu yeni fay parametrelerine ile İzmit Depremiyle ilgili yapılan çalışmalardan birine ait fay parametrelerinin karşılaştırılması sonucunda yeni fay parametreleriyle hesaplanan deformasyonlarla GPS ve InSAR ile ölçülen deformasyon arasındaki farkın eski parametrelere göre daha az olduğu hesaplanmıştır. Özet bilgi Çizelge 4.10’da verilmiştir.

Yapılan çalışma sonucunda uygun geometri, uygun sayısal yükseklik verisi ve uygun atmosferik koşullarda oluşturulacak interferogramların jeodezik çalışmalarda diğer veri kümeleriyle birlikte kullanılabileceği görülmüştür. Hesaplama kolaylığı açısından InSAR verisinin seyrekleştirilmesine ve diğer veri kümeleriyle birlikte

ağırlıklandırılmasına ihtiyaç vardır. Veri seyrekleştirilmesi için bu çalışmada geliştirilen algoritmanın kullanılabilmesi değerlendirilmektedir. Veri ağırlıklandırmasında InSAR ölçülerinin nokta sayısının yanında hatasının tespit edilip, ağırlıklandırma işlemine nasıl katılabileceği konusunda çalışılmasına ihtiyaç vardır.

InSAR'da; GPS gibi otomatize edilebilecek analitik bir algoritmalar süreci henüz geliştirilme aşamasındadır. Bazı durumlarda; olana, bilinene veya kıyaslamaya dayalı ara işlemler mevcuttur. Bunların sonuçlara etkileri gelecekteki çalışma konuları olmalıdır.

Çok katmanlı yarı uzay için yapılan modelleme esnasında kullanılan programların çalışma zamanları çok uzundur. Bununla ilgili optimizasyon çalışması gerekmektedir. Ayrıca doğrusal olmayan problemlerin çözümünde farklı yöntemlerin denenmesine ve geliştirilmesine ihtiyaç olduğu değerlendirilmektedir.

InSAR ile yapılacak çalışmalarda; görüntü eşleme, koordinatlandırma ve diğer aşamaların doğruluğunu arttırmak için, koordinatı bilinen noktalarda SAR görüntülerinde fark edilebilecek sabit yansıtıcıların yerleştirilmesinin faydalı olacağı değerlendirilmiştir.

Çok katmanlı yarı uzay için yapılan ters modellemede bulunan fay parametrelerinin doğruluğu test edilmesine rağmen bu parametrelerin fiziksel olarak yorumlanması jeofizikçiler tarafından tekrar gerçekleştirilmelidir.

KAYNAKLAR

- Amelung, F., Galloway, D. L., Bell, J. W., Zebker, H. A. ve Lacznik, R. J., 1999.** Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation, *Geology*, v. 27, no. 6, p. 483–486.
- Amelung, F., Oppenheimer, C., Segall, P. ve Zebker, H., 2000.** Ground deformation near Gada 'Ale volcano, Afar, observed by radar interferometry, *Geophysical Research Letters*, **27**(19):3093-3097,
- Amelung, F. ve Bell, J. W., 2003.** Interferometric synthetic aperture radar observations of the 1994 Double Spring Flat, Nevada earthquake (M5.9): Mainshock accompanied by triggered slip on a conjugate fault, *Journal of Geophysical Research*, **108**, no. B9, p. ETG 10-1 - 10-11.
- Askne, J., Dammert, P., Ulander, L. M. H. ve Smith, G., 1997.** C-band repeat-pass interferometric SAR observations of forest, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **35**, 25–35
- Barbieri, M., Lichtenegger, J., Calabresi, G., 1999.** The İzmit Earthquake : A quick post-seismic analysis with satellite observations, *ESA Bulletin*, **100**, 107-110
- Barka, A. A., 1992,** The North Anatolian fault zone, *Annales Tectonicae*, **6**, 164-195
- Barka, A., Akyüz, H. S., Altunel, E., Sunal, G., Çakır, Z., Dikbaş, A., Yerli, B., Armijo, R., Meyer, B., Chabaliier, J. B., Rockwell, T., Dolan, J. R., Hartleb, R., Dawson, T., Christofferson, S., Tucker, A., Fumal, T., Langridge, R., Stenner, H., Lettis, W., Bachhuber, J. ve Page, W., 2002.** The surface rupture and slip distribution of the August 17, 1999 İzmit earthquake, M=7.4, North Anatolian Fault, *BSSA*, **92**, 43-60.
- Biggs, J., Wright, T., Lu, Z. ve Parsons, B., 2007.** Multi-interferogram method for measuring interseismic deformation: Denali Fault, Alaska, *Geophysical Journal International*, **170** 1165-1179
- Bonforte, A., Ferretti, A., Prati, C., Puglisi, G. Ve Rocca, F., 2001.** Calibration of Atmospheric Effects on SAR Interferograms by GPS and Local Atmosphere Models : First results, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **63**, 1343-1357
- Bos, A. G., Usai, S., Spakman, W., 2004.** A joint analysis of GPS motions and InSAR to infer the coseismic surface deformation of the İzmit, Turkey earthquake, *Geophys. J. Int.*, **158** (3), 849-863
- Briole, P., Massonnet, D. ve Delacourt, C., 1997.** Postruptive deformation associated with the 1986-87 and 1989 lava flows of Etna detected by radar interferometry, *Geophysical Research Letters*, **24**, 37-40.

- Buckley, S. M.**, 2000. Radar Interferometry Measurement of Land Subsidence, *Ph.D. dissertation*, The University of Texas at Austin
- Burgmann, R., Rosen, P., Fielding, E.**, 2000. Synthetic Aperture Radar Interferometry To Measure Earth's Surface Topography And Its Deformation, *Annu.Rev.Earth Planet*, **28**, 169-209
- Burgmann, R., S. Ergintav, P. Segall, E.H. Hearn, S. McClusky, R.E. Reilinger, H. Woith, and J. Zschau**, 2002, Time-space Variable Afterslip on and Deep Below the Izmit Earthquake Rupture, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **92**, 126-137
- Cakir, Z., Chabalier, J. B., Armijo, R., Meyer, B., Barka, A., Peltzer, G.**, 2003. Coseismic and early postseismic slip associated with the 1999 Izmit earthquake (Turkey), from SAR interferometry and tectonic field observations, *Geophys. J. Int.*, **155**, 93-110.
- Cervelli, P., Murray, M., Segall, P., Aoki, Y. ve Kato, T.**, 2001. Estimating source parameters from deformation data, with an application to the March 1997 earthquake swarm off the Izu Peninsula, Japan, *Journal of Geophysical Research*, **106**, No.B6, p. 11 217–11 238
- Chen, C. W., Zebker, H. A.**, 2000. Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms, *Journal of the Optical Society of America*, **17**, 401-414
- Clarke, P., Paradissis, D., Briole, P., England, P., Parsons, B., Billiris, H., Veis, G., Ruegg, J.**, 1997. Geodetic investigation of the 13 May 1995 Kozani-Grevena (greece) earthquake, *Geophys.Res.Lett.*, **24(6)**, 707-710
- Delacourt, C., Briole, P., Achache, J.**, 1998. Tropospheric corrections of SAR interferograms with strong topography. Application to Etna, *Geophys. Res. Lett.*, **25(15)**, 2, 849-852.
- Douglas, D. H., Peucker, T. K.**, 1973. Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Line or its Caricature, *The Canadian Cartographer*, **10**, 112-122.
- Ergintav, S., Burgmann, R., McClusky, S., Hearn, L., Reilinger, R. E., Meteris, H., Aktuğ, B., Gurkan, O., Ozener, H., Cakmak, R. ve N. Yalcin**, 2002. Postseismic deformation following Izmit Earthquake, 17 August 1999, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **92**, 194-207
- Franceschetti, G., Lanari, R.**, 1999. Synthetic Aperture Radar Processing, CRS Pres, New York, USA, 307p.
- Feigl, K. L., Sarti, F., Vadon, H., Durand, P., Mclusky, S., Ergintav, S., Burgmann, R., Rigo, A., Massonnet, D. ve Reilinger, R.**, 2002. Estimating slip distribution for the Izmit mainshock from coseismic GPS, ERS-1, RADARSAT and SPOT measurements, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **92**, n.1, 138-160
- Ferretti, A., Prati, C., Rotta, F.**, 2000. Nonlinear subsidences rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry, *IEEE Trans.Geoscience Remote Sensing*, **38(5)**, 2202-2212

- Ferretti, A., Prati, C., Rotta, F.,** 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry, *IEEE Trans.Geoscience Remote Sensing*, **39(1)**, 8-20
- Fialko, Y.,** 2004. Probing the mechanical properties of seismically active crust with space geodesy: Study of the co-seismic deformation due to the 1992 Mw7.3 Landers (southern California) earthquake, *J. Geophys Res.*, **109**, B03307, 1-23
- Fruneau, F., Achache, J., Delacourt, C.,** 1996. Observation and modelling of the Sant-Etienne-de-Tine'e landslide using SAR interferometry. FRINGE 96-ESA Workshop on Applications of ESR SAR Interferometry, Zurich,Switzerland, 30 Eylül, 2 Kasım 1996 <http://www.geo.unizh.ch/rsl/fringe96/papers/fruneau>
- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M.,** 1988, Crossed Orbit Interferometr: theory and experimental results from SIR-B, *Int.J.Remote Sensing*, **9(5)**, 857-872
- Gabriel, A. K., Goldstein, M., Zebker, H.,** 1989. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry, *Journal of Geophysical Research*, **94(B7)**, 9183-9191
- Ghiglia, D. C. ve Romero, L. A.,** 1994, Robust Two-Dimensional Weighted and Unweighted Phase Unwrapping Using Fast Transforms and Iterative Methods, *Journal of the Optical Society of America A*, **11**, 107-117.
- Ghiglia, D. C., Romero, L. A.,** 1996. Minimum Lp-norm two-dimensional phase unwrapping, *Journal of the Optical Society of America*, **13**, 1999–2013.
- Goldstein, R. M., Enelhardt, H., Kamp, B., Frolisch, R. M.,** 1993. Satellite Radar Interferometry for Monitoring Ice Sheet Motion:Application to an Antarctic Ice Stream, *Science*, **141**, 1171-1172
- Goldstein, R. M., Werner C. L.,** 1998. Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications, *Geophysical Research Letters*, **25(21)**, 4035-4038.
- Haarpainter, J., Kergomard, C., Gascard, J. C., Haugan, P. M.,** 2000. Sea Ice Dynamics Observed by ERS-2 SAR Imagery and ARGOS Buoys in Storfjorden,Svalbard, *Proceedings of IGARS'00,Hawaii, USA*, 467-469
- Hanssen,R.,** 2001. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis, *Kluwer Academic Publishers Dordrecht*, ISBN-10:0792369459, 328 p
- Jonsson, S.,** 1999. A Shallow-Dipping Dike Fed the 1995 Flank Eruption at Fernandina Volcano, Galapagos, Observed by Satellite Radar Interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, No. 8, 1077–1080
- Jonsson, S., Zebker, H., Segall, P., Amelung, F.,** 2002. Fault Slip Distribution of the Mw 7.1 Hector Mine, California, Earthquake, Estimated from Satellite Radar and GPS Measurements, *Bull. Seis. Soc. Amer.*, **92**, No. 4, 1377-1389
- Lee, H, Liu, J. G.,** 1999. Spatial decorrelation due to topography in the interferometric SAR coherence imagery, *Proceedings of IGARSS99*, Hamburg, Germany, 485-487

- Lee, J. S., Hoppel, K. W., Mango, S. A., Miller, A. R.,** 1994. Intensity and Phase Statistics of Multilook Polarimetric and Interferometric SAR Imagery, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, **32**, No.5, 1017-1028
- Lu, Z., Fatland, R., Wyss, M., Li, S., Eichelberger, J. ve Freymueller, J.,** 1997. Deformation of New Trident volcano measured by ERS-1 SAR interferometry, Katmai National Park, Alaska, *Geophysical Research Letters*, **24**, no. 6, 695-698.
- Lu, Z., Mann, D., Freymueller, J., Meyer., D.,** 2000. Synthetic aperture radar interferometry of Okmok volcano, Alaska: Radar observations, *Journal of Geophysical Research*, **105(B5)**, 10791-10806,
- Lyons, A., Sandwell, D.,** 2003. Fault Creep along the southern San Andreas from InSAR, permanent scatterers and stacking, *Journal of Geophysical Research*, **108**, B1, 2047
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., Rabaute, T.,** 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, **364(8)**, 138-142
- Massonnet, D., Feigl, K., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F.,** 1994. Radar interferometric mapping of deformation in the year after the Landers Earthquake, *Nature*, **369**, 227-230
- Massonnet, D., Briole, P., Arnaud, A.,** 1995. Deflation of mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry, *Nature*, **375**, 567-570
- Massonnet, D., Thatcher, W. ve Vadon, H.,** 1996. Detection of postseismic fault-zone collapse following the Landers earthquake, *Nature*, **382**, 612-616
- Massonnet, D., Feigl, K. L.,** 1998. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface, *Reviews of Geophysics*, **36**, 441-500.
- McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., Gurkan, O., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, H., Kastens, K., Kekelidze, G., King, R., Kotzev, V., Lenk, O., Mahmoud, S., Mishin, A., Nadariya, M., Ouzounis, A., Paradissis, D., Peter, Y., Prilepin, M., Reilinger, R., Sanli, I., Seeger, H., Tealeb, A., Toksöz, M. N., Veis, G.,** 2000. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus, *Journal of Geophysical Research*, **105**, No B3, 5695-5719.
- Mohr, J. J., Madsen, S. N.,** 1996. Multi-pass interferometry for studies of glacier dynamics, *Proceedings of the 'Fringe 96' Workshop on ERS SAR Interferometry*, Zurich, Switzerland, Vol.1, 345-352
- Motagh, M., Djamour, Y., Walter, T., Zschau, J.,** 2006. Land Subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran, measured by InSAR, leveling and GPS, *AGU Fall Meeting 2006*, San Francisco, USA, 1-9
- Nalbant, S. S., Hubert, A. ve King, G.C.P.,** 1998. Stress coupling between earthquakes in northwest Turkey and the north Aegean Sea, *J. Geophys. Res.*, **103**, 24469-24486
- Okada, Y.,** 1985. Surface Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **75(4)**, 1135-1154.

- Okada, Y.**, 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 1018-1040.
- Peltzer, G. ve Rosen, P.**, 1995. Surface displacement of the 17 May 1993 Eureka Valley, California, earthquake observed by SAR interferometry, *Science*, **268(5215)**, 1333-1336
- Peltzer, G., Rosen, P., Rogez, F., ve Hudnut, K.**, 1996. Postseismic rebound in fault step-overs caused by pore fluid flow, *Science*, **273**, 1202-1204
- Popiolek, E., Hejmanowski, R., Krawczyk, A., Perski, Z.**, 2002. Application of Satellite Radar Interferometry to the Examination of the Areas of Mining Exploitation, *Surface Mining*, **54**, No.1, 74-82
- Pritchard, M. E., Simons, M., Rosen, P. A., Hensley, P., Webb, F. H.**, 2002. Coseismic slip from the July 30, 1995, Mw = 8.1 Antofagasta, Chile, earthquake as constrained by InSAR and GPS observations, *Geophysical Journal International*, **150**, 362-376
- Rees, G.**, 1999, The Remote Sensing Data Book, Cambridge University Pres, Cambridge, UK, 262p
- Refice A., Bovenga, F., Wasowski, J. ve Guerriero, L.**, 2000. Use of InSAR Data for Landslide Monitoring: A Case Study from Southern Italy, *IGARSS 2000*, Hawaii. 3p.
- Reilinger, R., Ergintav, S., Burgmann, R., McClusky, S., Lenk, O., Barka, A., Gürkan, O., Hearn, E., Feigl K. L., Çakmak, R., Aktug, B., Ozener, H., Toksoz, M. N.**, 2000. Coseismic and Postseismic Fault Slip for the 17 August 1999, M=7.5, Izmit, Turkey Earthquake, *Science*, **289**, 1519-1524.
- Resor, P. G., Pollard, D. D., Wright, T., Beroza, G. C.**, 2005. Integrating high-precision aftershock locations and geodetic observations to model coseismic deformation associated with the 1995 Kozani-Grevena earthquake, Greece, *J. Geophys. Res.*, **B09402**, 1-14
- Rodriguez, E. ve Martin, J. M.**, 1992. Theory and design of interferometric synthetic aperture radars, *IEEE Proc. of Radar and Signal Processing*, **139**, no. 2, 147-159.
- Rott, H. ve Siegel, A.**, 1999. Analysis of Mass Movements in Alpine Terrain by Means of SAR Interferometry, *Proc. of IGARSS'99*, IEEE Cat.Nr. 99CH36293, 1933 - 1936.
- Ryder I., Parsons, B. E., Funning, G.**, 2007. Postseismic motion following the 1997 Manyi (Tibet) earthquake: InSAR observations and modeling, *Geophys. J. Int.*, **169**, 1009-1027
- Sandwell, D., Price, E.**, 1998. Phase gradient approach to stacking interferograms, *Journal of Geophysical Research*, **103(B12)**, 30 183-30 204
- Schwabish, M., Lehner, S., Winkel, N.**, 1997. Coastline extraction using ERS SAR interferometry. *Proceedings of the third ERS Symposium*, 1049-1060
- Simons, M., Fialko, Y. ve Rivera, L.**, 2002. Co-seismic static deformation from the 1999 M_w7.1 Hector Mine, California, earthquake, as inferred from InSAR and GPS observations, *Bull. Seis. Soc. Am.*, **92**, 1390-1402

- Singhroy V., Mattar, K. ve Gray, L.,** 1998. Landslide characterization in Canada using interferometric SAR and combined SAR and TM images. *Advances in Space Research*, **2(3)**, 465-476
- Smith, L.,** 2002. Emerging Applications of Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) in Geomorphology and Hydrology, *Annals of the Association of American Geographers*, **92(3)**, 385-398
- Stein, R., Barka, A. ve Dieterich J.,** 1997. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering, *Geophysical Journal International*, **128**, 594-604
- Stramondo, S., Tesauro, M., Briole, P., Sansosti, E., Salvi, S., Lanari, R., Anzidei, M., Baldi, P., Fornaro, G., Avallone, A., Buongiorno, M. F., Franceschetti, G. ve Boschi, E.,** 1999. The September 26, 1997, Colfiorito, Italy, earthquakes: Modeled coseismic surface displacement from SAR interferometry and GPS, *Geophys. Res. Lett.*, **26 (7)**, 883-886
- Tao, L., Jingnan, L., Mingsheng, L., Shaojun, K., Xu, L.,** 2004. Monitoring city subsidence by D-InSAR in Tianjin area, *IEEE International*, **5**, 3333-3336
- Wang, R.,** 1999. A simple orthonormalization method for the stable and efficient computation of Green's function, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **89**, 733-741
- Wang, R., Lorenzo, F. ve Roth, F.,** 2003. Computation of deformation induced by earthquakes in a multi-layered elastic crust - FORTRAN programs EDGRN/EDCMP, *Computer and Geosciences*, **29(2)**, 195-207
- Wang, R., Xia, Y., Grosser, H., Wetzel, H., Kaufmann, H. ve Zschau, J.,** 2004. The 2003 Bam (SE Iran) earthquake: precise source parameters from satellite radar interferometry, *Geophysical Journal International*, **159**, 917-922
- Wegmüller, U.,** 1997. Soil moisture monitoring with ERS SAR interferometry. ESA special publication-414, *Proceedings of 3rd ERS symposium*, 47-52
- Wegmüller, U., Strozzi, T., Werner, C., Wiesmann, A., Benecke, N., Spreckels, V.,** 2000. Monitoring of mining-induced surface deformation in the Ruhregebiet (Germany), *Proceedings of IGARSS'00*, Hawaii, USA, 2771-2773
- Welstead, S. T.,** 1999. Fractal and wavelet image compression techniques, SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington, 232 pp.
- Williams, S., Bock, Y., Fang, P.,** 1998. Integrated Satellite Interferometry: Tropospheric Noise, GPS Estimates and Implications for Interferometric Synthetic Aperture Radar Products, *Journal of Geophysical Research*, **103**, No.B11, 27051-27067
- Wright, P. ve Stow, R.,** 1999. Detecting mining subsidence from space, *International Journal of Remote Sensing*, **20(6)**, 1183-1188.
- Wright, T.,** 2000. Crustal Deformation in Turkey from Synthetic Aperture Radar Interferometry, University of Oxford, *Ph.D. Thesis*

- Wright, T., Fielding, E. ve Parsons, B.**, 2001a. Triggered slip: observations of the 17 August 1999 Izmit (Turkey) earthquake using radar interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 1079–1082.
- Wright, T., Parsons, B. ve Fielding, E.**, 2001b. Measurement of interseismic strain accumulation across the North Anatolian Fault by satellite radar interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, **28(10)**, 2117-2120
- Zebker, H. A. ve Goldstein, R. M.**, 1986. Topographic Mapping From Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations, *J. Geophys. Res.*, **91**, 4993-4999,
- Zebker, H. A., Villasenor, J.**, 1992. Decorrelation in interferometric radar echoes, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **30**, No.5, 950-959
- Zebker, H. A., Rosen, P. A., Goldstein, R. M., Gabriel, A. ve Werner, C. L.**, 1994. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake, *J. Geophys. Res.*, **99**, 19,617-19,643,
- Zebker, H. A., Werner, C. L., Rosen, P. A., Hensley, S.**, 1994. Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar, *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **32**, 823-836
- Zebker, H.**, 2000. Studying the Earth with Interferometric Radar, *Computing in Science and Engineering*, **02**, no. 3, pp. 52-60,
- Zhou, Y., Stein, A., Molenaar, M.**, 2003. Integrating interferometric SAR data with levelling measurements of land subsidence using geostatistics, *International Journal of Remote Sensing*, **24**, No.18, 3547-3563

ÖZGEÇMİŞ

1973 yılında Akçaabat/TRABZON'da doğdu. İlk ve orta okulu Trabzon'da tamamladı. 1992'de Maltepe Askeri Lisesini bitirerek öğrenime başladığı Kara Harp Okulundan 1996 yılında Harita Teğmen rütbesiyle mezun oldu. 1998 yılında Harita Yüksek Teknik Okulundan mezun olarak Harita Mühendis diploması aldı. 2002 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2002 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümünde Doktora öğrenimine başladı. Halen, Harita Genel Komutanlığı Kartoğrafya Dairesinde çalışmaktadır.