

# Uzun sürede ve sabit hızda oluşan yer hareketlerinin uydu radar interferometrisiyle ölçülmesi: Avcılar örneği

**Samuray AKARVARDAR\***, Cankut ÖRMECİ, Kurt FEIGL

*İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul*

## Özet

*Radar interferometrisi (InSAR), birbirine çok yakın görüntüleme geometrileriyle elde edilmiş iki farklı radar görüntüsü arasında oluşan faz farkını hesaplayan bir tekniktir. Faz farkı, uydu platformunda bulunan radar ile yeryüzünde görüntülenen nokta arasındaki uzaklığa karşılık gelmektedir. Günümüzde InSAR, yüzey deformasyonunun ölçülmesinde etkili bir teknik olarak kabul edilmektedir. Diğer yandan, tekniğin uygulanabilirliği radar sinyalinin korelasyonu ve atmosferik etkilerle sınırlıdır. Bu çalışmada, uzun zamanda oluşan yüzey deformasyonunu ölçmek için, ERS-1 ve ERS-2 uydularından elde edilen radar görüntüleri kullanılarak bir strateji geliştirilmiştir. Yöntem, ham SAR verilerinin seçimi, SAR veri-işleme ve post-veri-işleme adımlarını içermektedir. Veri-işleme adımları, 2000'lerin başından beri geliştirilen çeşitli yöntemlerden oluşmaktadır. InSAR tekniğiyle yer hareketlerinin ölçülmesi çalışmaları için İstanbul'un Avcılar semti seçilmiştir. Çalışmada, Avrupa Uzay Ajansı'nın (ESA) 1992-2002 yılları arasında ERS uydularıyla elde ettiği radar görüntüleri kullanılmıştır. Radar görüntü çiftleri, çeşitli veri-seçimi kriterleriyle belirlenmiştir. Radar görüntülerindeki faz ölçmelerinin yoğunluğu, "permanent saçıcılar" (PS) tekniği kullanılarak azaltılmıştır. 1992 ve 1999 yılları arasındaki maksimum yerdeğiştirme hızı, Avcılar'ın batısında bir noktada -7 mm/yıl olarak belirlenmiştir. Birinci yazarın diğer çalışmalarında detaylı olarak belirtildiği üzere; Avcılar'da uzun zamandır sabit hızda oluşan yer hareketleri, bölgede var olduğu bilinen toprak kaymalarıyla ilişkilidir. Yerdeğiştirme hızlarının dağılımı, yağışlı mevsimde süresiz olarak oluşan toprak kaymalarının, kayma ve oturma şeklinde bütün sene boyunca sürdüğünü göstermektedir.*

**Anahtar Kelimeler:** *Uydu radar interferometrisi, yüzey deformasyonu, jeodezi, uzaktan algılama.*

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Samuray AKARVARDAR. sam@ntp.obs-mip.fr; Tel: +33 561333004.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "İstanbul civarında oluşan yer hareketinin uydu radar interferometrisi ile ölçülmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 23.11.2007 tarihinde dergiye ulaştırılmış, 05.05.2008 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.09.2009 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Measuring long-term and constant rate ground motion by satellite radar interferometry: Avcılar case

### Extended abstract

Radar interferometry (InSAR) is a technique that calculates the phase difference between two radar images acquired by slightly different viewing geometries (Massonnet and Feigl, 1998; Hanssen, 2001; Madsen and Zebker, 1998; Burgmann et al., 2000; Rosen et al., 2000; Gens and van Genderen, 1996). The resultant interference pattern is called an “interferogram”. If certain conditions are met, the phase differences form spatially coherent fringes. Each fringe represents a difference of one cycle of the two-way travel time between the radar aboard the satellite and the target on the ground. Interpreted in units of distance, each fringe represents half the radar wavelength in change of distance, or 28 mm for C-band radars aboard ERS and ENVISAT satellites. While conventional InSAR has been proven to be a very effective technique to measure ground motion, its applicability is limited mainly by radar signal correlation and atmospheric effects. Therefore, to measure slow ground motion occurring over long times requires a challenging effort if conventional InSAR techniques are to be used.

If one of the scatterers contributing to the pixel is much more stable than the others, then its contribution to the phase and amplitude measurements will dominate those from the other scatterers. If we can identify these pixels represented by a single strong scatterer, then we can simplify the process of interpreting the interferograms. These persistent scatterers (hence called “PS pixels”) are more reliable because they are less susceptible to all processes causing decorrelation. Accordingly, they have less noise than other pixels. Once the data set has been reduced in size by several orders of magnitude by selecting only the reliable PS pixels in the interferograms, the subsequent interpretation and analysis involving unwrapping and modeling are considerably simpler. Several approaches have been proposed for identifying PS pixels since 2000 (e.g. Hanssen and Usai, 1997; Ferretti et al., 2000, 2001; Colesanti et al., 2003a, 2003b; Lyons and Sandwell, 2003; Hooper et al., 2004; Hooper, 2006).

In this study, we establish a radar data selection and processing flow for measuring slow ground motion occurring over long times. We combine different

methodologies in raw radar data processing and post-processing. All the steps presented in the study are repeatable and applicable to ERS SAR data for measuring slow motion deformation.

We use the entire radar data set of ERS-1 and ERS-2 satellites for the data frame titled as Track 336 and Frame 2783 (T336/F2783). This frame covers all Istanbul metropolitan area and contains 48 epochs between 1992 and 2000. For the deformation analysis, we choose a data frame of 4x5 km<sup>2</sup> that covers the Avcılar vicinity of Istanbul.

We process the raw SAR data using DIAPASON software (Differential Interferometric Automated Process Applied to Survey of Nature) (version 4.1) developed at the French Space Agency (Massonnet et al., 1994; CNES, 1998; CNES, 2003a). The PS pixels persistent to phase decorrelation are selected through their “amplitude dispersion index”  $D_A$ , as defined by Ferretti et al. (2000, 2001) and multi-coherence  $\gamma$ , as described by Colesanti (2003). We use “General Inversion for Phase Technique” (GIPhT) developed by Feigl and Thurber (2009) for modeling interferograms. GIPhT defines a misfit cost  $C$  between the model and the phase observations. By minimizing the cost  $C$ , this approach can solve simultaneously for both linear and non-linear parameters.

Analysis of 14 image epochs between 1992 and 1999 has revealed downward ground motion around the Avcılar district of Istanbul. We have analyzed a set of 24 interferometric pairs with PS coverage of 7 PS/km<sup>2</sup>. The PS coverage corresponds to 1% of the image pixels. Three subsidence sources with a constant subsiding rate have been modeled by using a simple 4-parameter Mogi source (easting, northing, volume, depth). Also, a tropospheric parameter (vertical gradient) for each epoch has been included to the parameter set. The final model fits the phase data significantly better than the prior model based on F-test with 95 % confidence. We find a maximum displacement rate of -7 mm/yr at a point located at latitude 40.98°N and longitude 28.71°E. Akarvardar et al. (2007) and Akarvardar (2007) suggest that most of the downward ground motion occurs in the landslide areas. It seems likely that the soils once displaced after landslides have continued to slide and settle down with a constant rate between 1992 and 1999.

**Keywords:** Satellite radar interferometry, ground motion, geodesy, remote sensing.

## Giriş

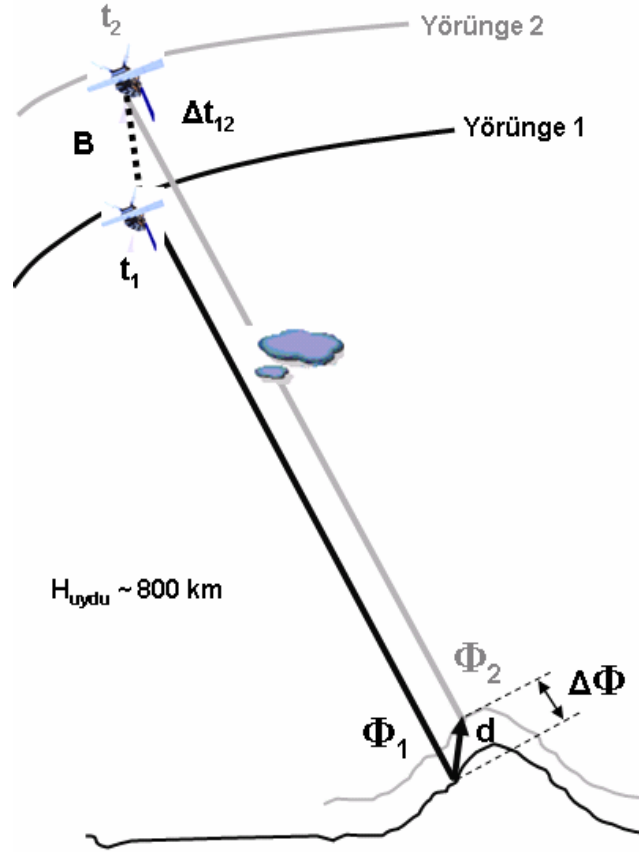
Radar interferometrisi (InSAR), birbirine çok yakın görüntüleme geometrileriyle elde edilmiş iki farklı radar görüntüsü arasında oluşan faz farkını hesaplayan bir tekniktir (Massonnet ve Feigl, 1998; Hanssen, 2001; Madsen ve Zebker, 1998; Burgmann vd., 2000; Rosen vd., 2000; Gens ve van Genderen, 1996). Faz farkından ortaya çıkan enterferans dokusuna “interferogram” denmektedir. Eğer belirli şartlar sağlanırsa, faz farkları tutarlı ve sürekli bir yapıda elde edilebilir. Bu şekilde ortaya çıkan ortak faz farkı konturları renk döngüsüyle gösterilmekte ve her döngüye “faz döngüsü” (“phase cycle” ya da “fringe”) denilmektedir. Diğer bir deyişle; bir faz döngüsü uydu platformundaki radarla yer yüzündeki bir nokta arasındaki iki-yönlü uzaklık farklarını temsil etmektedir. Her faz döngüsü radar dalga boyunun yarısı kadardır; bu değer ERS ve ENVISAT gibi C bandı radar taşıyan uydularda 28 mm’ye karşılık gelmektedir.

Şekil 1 “tekrar geçişli” uydu interferometrisini göstermektedir. Bu teknikle interferometri, uydunun ikinci geçişliyle ortaya çıkan yörünge farkı (B) ve zaman farkından ( $t_2 - t_1 = \Delta t$ ) oluşur ( $\Phi_2 - \Phi_1 = \Delta\Phi_{12}$ ). Yörünge farkı B 10 m ile birkaç bin metre arasında değişebilir. İki görüntü arasındaki zaman farkı uydunun tekrar geçiş özelliklerine bağlıdır.

InSAR, yüzey deformasyonunun ölçülmesinde etkili bir yöntem olarak kabul edilse de uygulanabilirliği radar sinyalinin korelasyonu ve atmosferik etkilerle sınırlıdır. Bu nedenle, uzun sürede ve yavaş hızla oluşan yüzey hareketlerinin; geleneksel InSAR yöntemleri kullanılarak ölçülmesi son derece zor olabilir.

Eğer bir piksel içindeki bir saçıcı, diğer saçıcılardan daha stabil ise, bu saçıcının faz ve genlik ölçmelerine katkısı diğer saçıcılardan çok daha fazla olacaktır. Eğer, bu tür saçıcılar tarafından tanımlanan pikseller belirlenebilirse, interferogramları yorumlamak ve analiz etmek kolaylaşır. “Permanent saçıcıları”ı (kısaca, PS) belirlemek için çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır (Hanssen ve Usai, 1997; Ferretti vd., 2000, 2001; Colesanti vd., 2003a, 2003b; Lyons ve

Sandwell, 2003; Hooper vd., 2004; Hooper, 2006). Kentsel alanları oluşturan binalar ve çeşitli yapılar, zaman içerisinde bir değişime uğramadığından; bu alanlar zamansal dekorelasyona kırsal alanlardan daha dayanıklıdır (Usai, 2000).



Şekil 1. Uydu radar interferometrisi

Bu çalışmada, uzun zamanda ve yavaş oluşan yer hareketini radar interferometrisiyle ölçmek için bir strateji geliştirilmiştir. Veri-işleme adımları, 2000'lerin başından beri geliştirilen çeşitli yöntemlerin birbirine entegrasyonundan oluşmaktadır. Çalışmada, Avrupa Uzay Ajansı'nın (ESA) 1992-2002 yılları arasında ERS uydularıyla kayıt ettiği 336 yörünge ve 2783 çerçeve numaralı (T336/F2783) radar görüntüleri kullanılmıştır. Tüm İstanbul metropolitan alanını kapsayan T336/F2783 başlıklı görüntü seti, 48 farklı zamanda algılanmış görüntülerden oluşmaktadır (Şekil 2). Yer hareketlerinin ölçülmesi uygulaması için, İstanbul'un Avcılar semtini içine alan 4x5 km<sup>2</sup>'lik bir çerçeve çalışma alanı olarak seçilmiştir.

## Çalışma alanı

Yer hareketlerinin interferometrik yöntemlerle ölçülmesi çalışması için Avcılar çevresinin seçilmesinin ana sebepleri şöyle sıralanabilir:

(a) Avcılar zemininin ve binalarının, olası bir depreme dayanıksız olduğu bilinmektedir (Tezcan vd., 2002; Ergin vd., 2004; Çağatay, 2005).

(b) Bölgede çok uzun zamandır toprak kaymaları gözlenmektedir. (Örmeci, 1972, Duman vd.,

2004; Duman vd., 2005a; Duman vd., 2005b; Alparslan vd., 2006, Tüysüz, 2007).

(c) Avcılar, İstanbul'da en hızlı gelişen ve kalabalık yerleşim bölgelerinden biridir.

(d) Bir Avrupa Uzay Ajansı (ESA) girişimi olan TerraFirma'nın hazırladığı haritada, Avcılar'da belirli bir bölgenin yılda 5 mm'den fazla çöktüğü görülmektedir. (UKNERC, 2004; Aktar ve Browitt, 2006).



Şekil 2. Çalışma bölgesi. Çerçeve, ERS uydusu görüntü çerçevesini (T336/F2783) göstermektedir. Topografik yükseklikler, SRTM sayısal yükseklik verisinden elde edilmiştir. Faylar, Barka ve Kadinsky-Cade (1988)'in çalışmasına dayanmaktadır. Interferogramlar T336/F2783 çerçevesi dahilinde oluşturulmuştur. PS piksellerinin belirlenmesi ve faz istatistikleri Çerçeve-1 dahilinde yapılmıştır. Yerdeğiştirme hızları, Çerçeve-2 dahilinde hesaplanmıştır.

## Radar görüntüleri

ERS-1 ve ERS-2 uydu görüntülerinin seçilmesinde dört kriter göz önüne alınmıştır:

- En fazla görüntü sağlayan yörünge geçişi tercih edilmiştir. Ferretti ve diğerleri (2001) PS piksellerinin belirlenmesinde yaklaşık olarak 30 SAR görüntüsünün kullanılmasını önermektedir. Sadece güney yönünde olan yörünge geçişleri bu kriteri sağlamaktadır.
- Radar veri setinin, 1999 İzmit depreminden önce mümkün olan en uzun dönemi kapsamasına özen gösterilmiştir. Bu kriter, depremden zarar görmeyen dayanıklı PS piksellerinin belirlenmesi için önemlidir.
- Görüntülerin hangi mevsimde alındıkları göz önüne alınmamıştır.
- ERS-2 uydusunun Şubat 2000’de iki jiroskopunu kaybetmesinin ardından alınan görüntüler veri setine kabul edilmemiştir.

ESA arşivinde, 48 ERS radar uydu görüntüsünün bu kriterleri sağladığı belirlenmiştir. Böylece, radar veri seti, ERS-1 ve ERS-2 uydularının birlikte kayıt ettiği bu görüntülerden oluşturulmuştur.

## İnterferometrik SAR verilerinin işlenmesi

İnterferometrik veri işleme, radar verilerinin seçimi, veri-işleme ve post-veri-işleme adımlarından oluşmaktadır (Şekil 3). İnterferometrik verilerin belirlenmesi, radar görüntülerinin önce teker teker sonra çiftler şeklinde seçimini içermektedir.

Ham SAR verileri, Fransa Uzay Ajansı (CNES) tarafından geliştirilen DIAPASON (“Differential Interferometric Automated Process Applied to Survey of Nature” - versiyon 4.1) yazılımı kullanılarak işlenmiştir (Massonnet vd., 1994, CNES, 1998, CNES, 2003). DIAPASON yazılımının en önemli özelliği diferansiyel interferometri yapmak için var olan bir Sayısal Yükseklik modelini (SYM) kullanmasıdır. DIAPASON, var olan SYM’i simule

ederek yeni bir interferogram yaratmakta ve bu interferogramı gözlemlenen interferogramdan çıkarmaktadır. Sonuç görüntüye, diferansiyel interferogram denmektedir. Bu interferogram, yüzey hareketlerinin yanısıra çeşitli etkenlerin (örneğin, baz dekorelasyonu, zamansal dekorelasyon, yörüngesel ve atmosferik etkiler) sebep olduğu faz ötelenmesini de içermektedir. Bu yaklaşımın en önemli avantajı; faz, genlik ve koherans görüntülerinin koordinat sistemine göre oluşturulmasıdır.

İnterferometrik analizlerde, “Shuttle Radar Topography Mission”, kısaca SRTM’den elde edilen SYM verileri sıkça kullanılmaktadır. SRTM verisindeki yükseklik değerleri 3 saniye aralıklı enlem ve boylamlar üzerine yerleştirilmiştir. Bu düzen, yeryüzünde yaklaşık olarak 90 x 90 m genişliğindeki piksellere karşılık gelmektedir. Piksellerin yataydaki doğruluğu  $\pm 20$  m’dir (Rodriguez vd. 2005). Avcılar bölgesi için ise, piksel genişliği 40 m ve düşey doğruluğu  $\sim 5$  m olan yükseklik verisi kullanılmıştır (JICA-IMM, 2002). ERS uydusu yörüngelerinin radial doğruluğu  $\pm 5-7$  cm’dir (Scharroo ve Viser, 1998). DIAPASON’la interferometrik veri işleme, altı ayrı adımda yapılmaktadır. Bu veri işleme adımları, DTOOLS olarak anılan programlar dizisiyle gerçekleştirilmektedir (Akarvardar, 2007; Gasperi, 1999).

## İnterferogramların oluşturulması

İnterferogramlar ilk adımda tek tek ele alınmıştır. Bu aşamada; interferometrik veri çiftleri, Massonnet ve Rabaute (1993) tarafından tanımlanan “belirsizlik yüksekliği”ne göre seçilmiştir. Belirsizlik yüksekliği, 100 m’den az olan interferometrik veri çiftlerinde topografyaya bağlı olarak faz farkı olacağından; bu veri çiftleri göz önüne alınmamıştır. İkinci adımda, interferometrik veri çiftleri aşağıdaki kriterlere göre elenmiştir:

- Doppler farkı 0.4 PRF’den fazla olan veri çiftleri göz önüne alınmamıştır.
- Atmosferden ve uydu yörüngelerindeki belirsizliklerden etkilenen interferogramlar, Massonnet ve Feigl (1995) tarafından önerilen

yaklaş ımla belirlenmiştir. Bu sebeplerden fazla- ca etkilenmiş interferogramlar elimine edilmiştir.

- İstanbul metropolitan bölgesini “gürültülü” gösteren interferogramlar elenmiştir.
- 1999 İzmit depremini kapsayan interferogramlar dahil edilmemistir. Avcılar’ın, depremin merkez üssünden 120 km uzakta olmasına rağmen hasar gördüğü bilinmekte ve yüzey deformasyonuna maruz kaldığı kabul edilmektedir.
- Görüntü çiftleri arasındaki mevsimsel uyumsuzluklar ve zaman farkları göz önüne alınmamıştır.

İkinci adımda ise farklı zaman aralıklarını kapsayan veri çiftlerinin birbiriyle ilişkileri göz önüne alınmıştır. Feigl ve Thurber (2009), birbiriyle ilişki içinde bulunan “yararlı” radar görüntüsü gruplarını “tür” olarak adlandırmaktadır. Buna bağlı olarak, tek başına kalan ya da yeterli sayıda görüntüyle interferogram oluşturamayan görüntüler elimine edilmiştir.

Sonuç olarak, 1992 ve 1999 yılları arasında 14 farklı zamanda alınan radar görüntüsü ve bu görüntülerden oluşan 24 interferogramın deformasyon analizlerinde kullanılmasına karar verilmiştir. Kısacası, olası 1128 veri çiftinden ( $C_2^{48} = 48 \times 47 / 2$ ) geriye sadece 24 veri çifti kalmıştır. İnterferometrik veri işleme akışı bazı durumlarda aksamıştır. Bunun iki önemli sebebi bulunmaktadır. Öncelikle, bazı ham radar verilerinin olması gereken formatta bulunmadığı anlaşılmıştır. İkinci durumda ise, bazı gürültülü görüntü çiftleri arasında korelasyonun sağlanamadığı gözlenmiştir. Bu tür aksaklıklar, SAR görüntülerinin tek tek ele alınıp işlenmesinden sonra giderilmiştir. İnterferogramlar, “power spectral filtering” (Goldstein ve Werner, 1998) kullanılarak filtrelenmiştir. İnterferogramlara topografik eğim filtresi uygulanmamıştır (Massonnet vd., 1994).

### Permanent saçıcıların belirlenmesi

Faz dekorelasyonuna dayanıklı permanent saçıcılar, Ferretti vd. (2000, 2001) tarafından tanımlanan “genlik dağılım indeksi”ne ( $D_A$ ), ve Colesanti ve diğ erleri (2003a) tarafından tanımlanan “multi-koherans”a ( $\gamma$ ) göre seçilmiştir.

lanan “genlik dağılım indeksi”ne ( $D_A$ ), ve Colesanti ve diğ erleri (2003a) tarafından tanımlanan “multi-koherans”a ( $\gamma$ ) göre seçilmiştir.

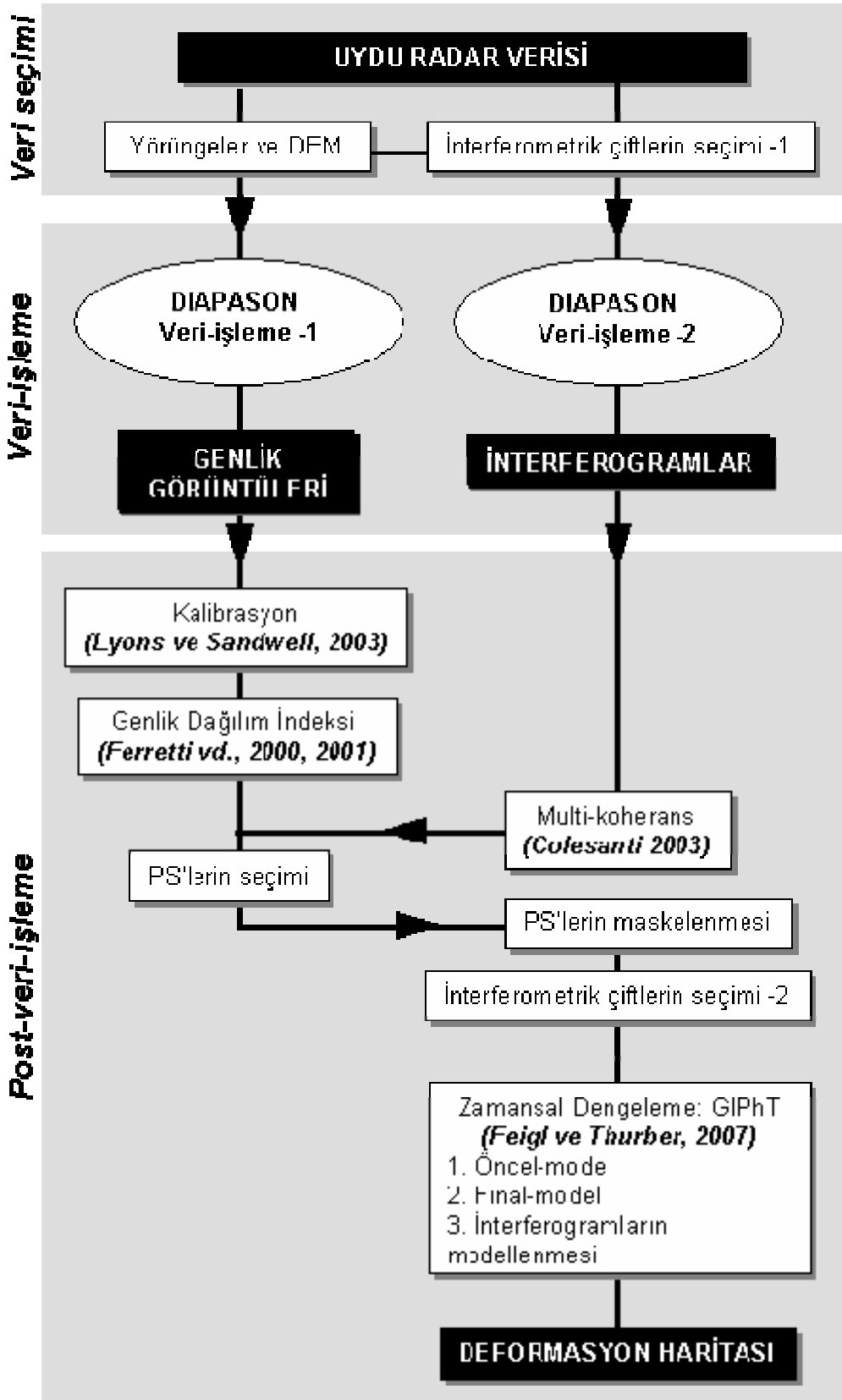
1992 ve 1999 yılları arasında elde edilmiş olan 48 ERS SAR genlik görüntüsü DIAPASON kullanılarak işlenmiş ve koordinatlandırılmıştır. ERS-1 ve ERS-2 genlik görüntüleri oluşturulduktan sonra; Lyons ve Sandwell’in (2003) önerdiği yöntemle kalibre edilmişlerdir. Histogram eşitlemeye benzeyen bu yöntemle göre; her genlik görüntüsü “ortalama kalibrasyon katsayısı”yla çarpılmaktadır. Bu rölatif kalibrasyon yöntemi, hiçbir radar parametresine gerek duymamakta ve kullanılan radar veri-işleme yazılımdan bağımsız uygulanabilmektedir.

Genlik dağılım indeksi  $D_A$ ’nin hesaplanmasında; 1992 ve 2002 arasında alınan 47 ERS SAR görüntüsünden oluşan genlik seti kullanılmıştır. Tanıma göre, 0.25’den küçük  $D_A$  değerleri, yüksek sinyal-gürültü oranına ( $SNR > 4$ ) karşılık gelmektedir. Atmosferik şartlardan kısmen daha az etkilenmiş 15 interferogram “multi-koherans”ın hesaplanmasında kullanılmıştır. PS pikselleri,  $D_A$  eşiği 0.25 ve  $\gamma$  eşiği 0.50’e göre belirlenmiştir. Deniz yüzeyi, istatistikleri etkileyebilir gerekçesiyle tüm hesaplamalarda maskelenmiştir. PS yoğunluğu  $\sim 4$  PS/km<sup>2</sup> olarak bulunmuştur. Bu değer, Ferretti ve diğ erleri (2000, 2001) ve Hooper’in (2006) sonuçlarına yakındır.

Deformasyon analizleri için iki ayrı PS kümesi hazırlanmıştır. İlk kümenin oluşturulmasında, hem  $D_A$  hem de  $\gamma$  göz önüne alınmıştır. İkinci kümenin oluşturulmasında ise sadece  $\gamma$  eşiği kullanılmıştır. Bu iki PS kümesinin yoğunlukları, sırasıyla 4 PS/km<sup>2</sup> ve 7 PS/km<sup>2</sup> dir.

### İnterferogramların modellenmesi

İnterferogramların analiz edilmesinde; Feigl ve Thurber’in (2009) geliştirdiği “Faz Tekniği için Genel Dönüşüm” (GIPhT) yöntemi kullanılmıştır. GIPhT yöntemi, tanımlanan model ve faz ölçmeleri arasındaki farkı bularak maliyet hesabı yapmakta ve maliyeti minimuma indirerek lineer ve lineer-olmayan parametreleri çözmektedir. GIPhT, interferometride birçok yönden avantaj sağlamaktadır. Öncelikle, GIPhT ile



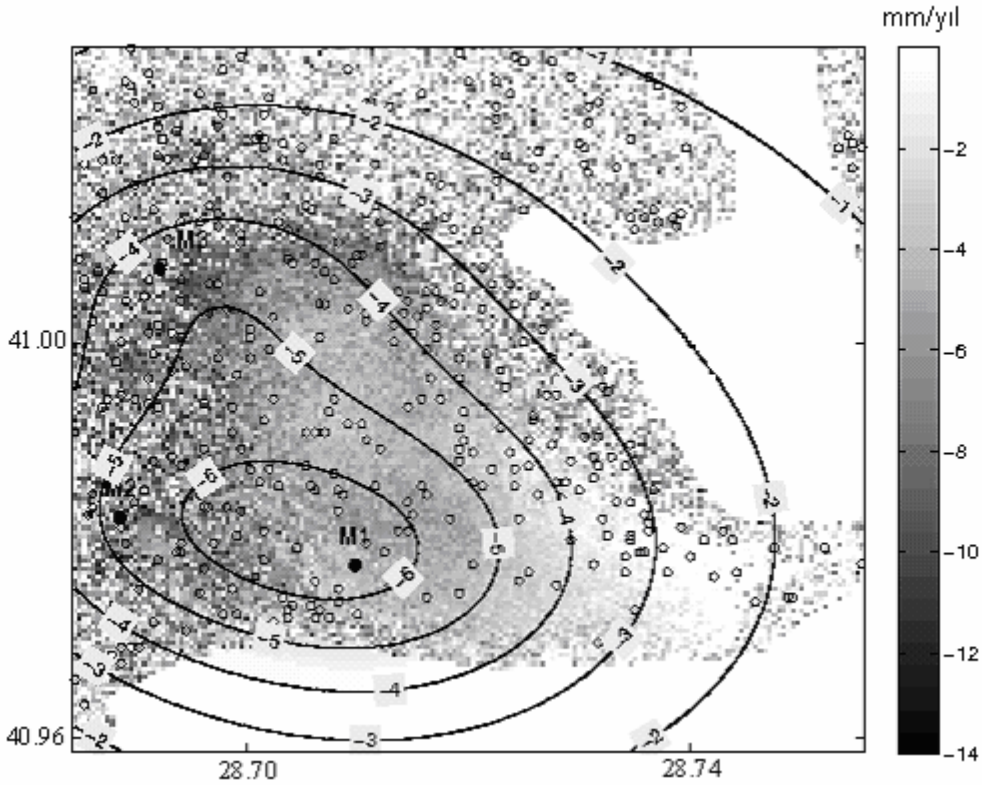
Şekil 3. Uzun sürede ve yavaş hızda oluşan yer hareketlerinin uydu radar interferometriyle belirlenmesinde veri-işleme akışı

mutlak fazın hesaplanmasına gerek yoktur, faz ölçmeleri hesaplarda dö ngüler şeklinde ele alınmaktadır. Diğ er yandan GIPhT, pikselleri ayrı ayrı dengeleyeceğ ine, sadece model parametrelerini dengelemektedir. Böylece, çok daha az parametreyle hesap yapılmaktadır.

Dönüşüm problemi, model parametrelerinin faz ölçmelerinden tahmin edilmesini iç ermektedir. Bu çalışmada, sabit hızlı bir çökme kaynağı, 4-parametrelili bir Mogi kaynağıyla (konum, hacim ve derinlik) modellenmiştir. Diğ er yandan, her görüntü anına ait bir troposferik parametre sisteme dahil edilmiştir. İnterferogramlardaki faz dö ngülerinin ortak özellikleri göz önüne alınarak, 3 ayrı Mogi çökme kaynağı belirlenmiştir. Veri çerçevesi  $4 \times 5 \text{ km}^2$ 'ye indirgenerek, önceden yer hareketleri olduğu bilinen bölgeye konsantre olunmuştur. İlk-model, mümkün olabilecek en düşük maliyeti veren final-modelin bulunması için kullanılmıştır. Final-model, sabit

hızlı bir çökme kaynağını ve her görüntü alım anında ortaya çıkan troposferik etkileri birer dikey gradyentle tanımlamaktadır (Ş ekil 4).

Bu çalışmada, 1992 ve 1999 yılları arasında alınan 14 farklı zamana ait SAR görüntüsü, Avcılar civarında belirli bir bölgenin radar yönü doğrultusundan sabit bir hızla uzaklaştığını göstermektedir. Radarın bakış doğrultusunun dikeye yakın olduğunu varsayarsak, hareketin salt dikey doğrultuda “çökme” şeklinde olduğu sonucuna varırız. Oysaki, yerdeğ iştirmelerin uzaysal dağılımı, hareketin büyük bir kısmının eğimli topraklarda olduğunu göstermektedir (Akarvardar vd., 2007). Kısmen doymun ve gözenekli olan bu topraklarda çok uzun zamandır toprak kaymaları gözlenmektedir (Örmeci, 1972; Duman vd, 2004; 2005a, 2005b; Alparslan vd., 2006). Bu bağlamda, yamaçlarda sabit hızda “çökme” şeklinde ortaya çıkan toprak hareketlerinin yağışlı mevsimde süreksiz bir şekilde



Ş ekil 4. Avcılar bölgesinde düşey yerdeğ iştirme hızı. Küçük daireler,  $7 \text{ PS/km}^2$  yoğunluğ a sahip olan PS piksellerini göstermektedir. M harfi, GIPhT ile (Feigl ve Thurber, 2009) modellemede kullanılan Mogi kaynaklarının yerini göstermektedir. Konturlar, final-modelle ortaya çıkan yerdeğ iştirme hızlarına aittir. Maksimum yerdeğ iştirme hızı,  $40.98^\circ\text{N}$  enleminde ve  $28.71^\circ\text{E}$  boylamında  $-7 \text{ mm/yıl}$  olarak bulunmuştur (Akarvardar, 2007; Akarvardar vd., 2007).



oluşan toprak kaymalarının bir devamı olduğu ve toprağın bütün sene boyunca kaymaya ve oturmaya devam ettiği sonucuna varılmaktadır (Tüysüz, 2007; Ergintav, 2006).

Yerdeğiştirme hızlarının bulunmasında; 24 interferometrik görüntü çifti kullanılmış ve 2 ayrı PS seti göz önüne alınmıştır. Yoğunluğu 7 PS/km<sup>2</sup> olan faz ölçmeleriyle model arasında yapılan yakınlık değerlendirmeleri, 18 serbest parametre için %95 güvenilirlik sınırları içinde kalmıştır. Maksimum yerdeğiştirme hızı, 40.98° enlemi 28.71° boylamında -7 mm/yıl olarak ortaya çıkmaktadır (Akarvardar vd., 2007). Diğer yandan, yoğunluğu 3 PS/km<sup>2</sup> olan PS setindeki faz ölçmeleriyle yeterli yaklaşım sağlanamamıştır.

## Sonuçlar

Bu çalışmada, uzun zamanda ve sabit bir hızla oluşan yer hareketlerini ölçmek için ERS uydu radar verilerine dayanan bir ölçme stratejisi geliştirilmiştir. Yöntem, ham SAR verilerinin seçimi, SAR veri-işleme ve post-veri-işleme adımlarını içermektedir. Veri-işleme adımları, 2000'lerin başından beri geliştirilen çeşitli yöntemlerden oluşmaktadır. Uygulanan her adım, uzun sürede ve sabit hızda oluşan yer hareketlerini belirlemek amacıyla tekrarlanabilir ve farklı coğrafi bölgeleri kaplayan ERS radar verilerine uygulanabilir.

Uzun zamanda ve yavaş hızda gelişen yer hareketlerinin ölçülebilmesi, yüksek kaliteli interferometrik veri çiftlerinin bulunabilmesine bağlıdır. Bu çalışmada, yüksek kaliteli ERS SAR görüntülerini ve interferometrik çiftleri bulabilmek için ESA ERS veri arşivi detaylıca gözden geçirilmiştir. Avcılar'ın 1999 İzmit depreminden etkilendiği göz önüne alınarak deprem sonrasını kapsayan tüm SAR görüntüleri elenmiştir. Diğer yandan, ERS-2 uydusunun jiroskopunu yitirdikten sonraki görüntülerin kalitesi gözden geçirilmiştir. Böylece, ERS SAR veri arşivinde bulunan ~ 50 SAR görüntüsünden, sadece 1992 ve 1999 yılları arasındaki 24 yüksek kaliteli SAR görüntüsü seçilmiştir. Bu SAR görüntülerinin interferometrik özellikleri göz önüne alındığında sadece 14 SAR görüntüsünün de-

formasyon analizlerinde kullanılabileceğine karar verilmiştir. Kısaca, ERS veri arşivindeki radar görüntülerinin %30'u deformasyon analizlerinde kullanılmak üzere seçilmiştir. Diğer yandan, olası interferometrik çiftlerden sadece %2'sinin gerekli teknik özelliklere sahip olduğu anlaşılmıştır. Bu görüntülerin birçoğunun gürültülü olduğu ve görüntü piksellerinin sadece %1'nin güvenilir faz ölçümü sağladığı göz önüne alındığında, InSAR tekniği kullanılarak yapılacak uzun zamanda ve yavaş hızla oluşan yer hareketlerinin belirlenmesinde veri seçiminin ne kadar önemli olduğu anlaşılmaktadır.

ERS-1 ve ERS-2 uyduları tarafından 1992 ve 1999 yılları arasında elde edilen 14 SAR görüntüsü ve bu görüntü çiftlerinden oluşan 24 interferogram, Avcılar çevresinde sabit hızda oluşan oturma ve kaymalar göstermektedir. Maksimum yerdeğiştirme hızı, 40.98° enlemi 28.71° boylamında -7 mm/yıl olarak belirlenmiştir (Akarvardar vd., 2007).

## Sonsöz

Bu çalışma, Avrupa Birliği (FORESIGHT 511139) ve Fransız hükümeti ("Agence National de Recherche" HYDRO-SEISMO) tarafından sağlanan desteklerle, Midi-Pyrénées Gözlemevi DTP laboratuvarında (CNRS UMR5562, France) gerçekleştirilmiştir. Tüm SAR verileri, telif hakkını elinde tutan Avrupa Uzay Ajansı tarafından sağlanmıştır (Category-I projesi numara 3245).

## Kaynaklar

- Akarvardar, S.E., (2007). Ground Motion around Istanbul, Turkey measured by satellite radar interferometry, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi ve Université Paul Sabatier (Fransa).
- Akarvardar, S.E., Feigl, K., Ergintav, S., (2007). Ground Motion in the Avcılar district of Istanbul, Turkey measured by satellite radar interferometry 1992-1999, *Geophysical Journal International*.
- Aktar, M. ve Browitt, C., (2006). Vulnerability Mapping Istanbul. *GMES Terrafirma Workshop 3. ESRIN*, Frascati, Italy.
- Akyüz, H., S., Hartleb, R., Barka, A., Altunel, E., Sunal, G., Meyer, B. ve Armijo, R., (2002). Surface rupture and slip distribution of the 12 November 1999 Düzce Earthquake (M 7.1) North

- Anatolian Fault, Bolu, Turkey, *The Bulletin of the Seismological Society of America*, **92**, 61-66.
- Alparslan, E., Yüce, H., Erkan, B., Inan, S., Ergintav, S., Saatçılar, R., (2006). Büyükçekmece ve Küçükçekmece gölleri arasındaki bölgede heyelan duyarlılığının uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri ile çok-kıstaslı analizi, 4. CBS Günleri, Fatih Üniversitesi, İstanbul.
- Barka, A., Kadinsky-Cade, K., (1988). Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity, *Tectonics*, **7**, 663-684.
- Burgman, R., Rosen, P.A., ve Fielding, E.J., (2000). Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earths Surface Topography and Its Deformation, *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, **28**, 169-209.
- Çağatay, I.H., (2005). Experimental evaluation of buildings damaged in recent earthquakes in Turkey, *Engineering Failure Analysis*, **12**, 440-452.
- CNES (1998). Philosophy ve Instructions for use of the DIAPASON, Interferometry Software System, CNES.
- CNES (2003). Automated Interferometric Processing Software DIAPASON, User's Guide, Issue 3.1, Toulouse Space Center Sub-Directorate Observation de la Terre, Space Image Quality and Processing Division, Radar Systems Department, French Space Agency (CNES), Distributed by ALTAMIRA INFORMATION, SL.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., (2003b). Monitoring Landslides and Tectonic Motions with Permanent Scatterers Technique, *Engineering Geology*, **68**, 3-14.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F (2003b). SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **41**, 7, 1685-1701.
- Duman, T.Y., Kecer, M., Ates, S., Emre, O., Gedik, I., Karakaya, F., Durmaz, S., Olgun, S., Sahin, H. ve Gokmenoglu, O., (2004). İstanbul Metropolitan bölgesinin batısında kentsel gelişim alanlarının jeolojik verisi (Küçükçekmece – Silivri - Çatalca Yöresi), MTA, Özel rapor, MTA, **3**, 249.
- Duman, T., Y., Can, T., Ulusoy, R., Kecer, M., Emre, O., Ates, S., Gedik, I. (2005a). A geohazard reconnaissance study based on geoscientific information for development needs of the western region of İstanbul (Turkey), *Environmental Geology*, **48**, 871-888.
- Duman, T., Y., Can, T., Gökçeoğ lu, C. and Nefeslioğ lu, H., A., (2005b). Landslide susceptibility mapping of Cekmece area (İstanbul, Turkey) by conditional probability, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, **2**, 155-208.
- Ergin, M., Ozalaybey, S., Aktar, A., Yalcin, M. N., (2004). Site amplification at Avcılar, İstanbul, *Tectonophysics*, **391**, 335-346.
- Ergintav, S., (2006). Kişisel görüşme.
- Feigl, K.L., ve Thurber C.H., (2009). A technique for modeling radar Interferograms without phase unwrapping: Application to the M 5 Fawnskin, California earthquake of 4 December 1992, *Geophysical Journal International*, **176**, 2, 491-504.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., (2000). Non-linear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **38**, 5, 2202- 2212.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., (2001). Permanent Scatterers in SAR Interferometry, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, **39**, 1, 8-20.
- Gasperi, J., (1999). Etude de la deformation lithospherique active par interferometrie radar. Application a la region de Hengill, Islande (fransızca), Toulouse, France, University Paul Sabatier.
- Gens, R. ve van Genderen, J.L., (1996). SAR interferometry: Issues, Techniques, Applications, *International Journal of Remote Sensing*, **17**, 1803-1835.
- Goldstein, R.M. ve Werner, C.L., (1998). Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications, *Geophysical Research Letters*, **25**, 21, 4035-4038.
- Hanssen, R. ve Usai, S., (1997). Interferometric Phase Analysis for Monitoring Slow Deformation Processes, *The 3rd ERS Symposium: Space at the Service of Our Environment*, Florence.
- Hanssen, R.F., (2001). *Radar Interferometry Data Interpretation and Error Analysis*. The Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., Kampes, B., (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers, *Geophysical Research Letters*, **31**, 23, 5, doi:10.1029/2004GL021737.
- Hooper, A.J., (2006). Persistent scatterer radar interferometry for crustal deformation studies and

- modeling of volcanic deformation, *PhD Thesis*, Stanford University. Stanford, CA.
- JICA-IMM, (2002). The study on a disaster prevention, Mitigation basic plan in Istanbul including microzonation in the Republic of Turkey (In Turkish), Final Report, Japan International Cooperation Agency (JICA) ve Istanbul Metropolitan Municipality (IMM), (Volume V).
- Kalkan, Y., Alkan, R., Baykal, M.O., Yanalak, M. Erden, T. ve Yıldırım, H., (2003). Heyelanların jeodezik ve geoteknik yöntemlerle izlenmesi: Ambarlı Liman Bölgesinde bir uygulama. Proceedings of the First National Symposium of Engineering Surveys, Istanbul: 91-105.
- Lyons, S. ve Sandwell, D., (2003). Fault creep along the southern San Andreas from interferometric synthetic aperture radar, permanent scatterers, and stacking, *Journal of Geophysical Research*, **108**, B1, 2047, doi:10.1029/2002JB001831.
- Massonnet, D. ve Rabaute, T., (1993). Radar interferometry: Limits and Potential, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **3**, 2, 455-464.
- Massonnet, D., Adragna, F., Rossi, M., (1994). CNES general-purpose SAR correlator, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **32**, 3, 636 -643.
- Massonnet, D. ve Feigl, K.L., (1998). Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface, *Reviews of Geophysics*, **36**, 4, 441-500.
- Örmeci, C., (1972). Kitle hareketlerinin fotogrametri ile etüdü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İstanbul, Türkiye.
- Rodriguez, E., Morris, C.S., Belz, J.E., Chapin, E.C., Martin, J.M., Daffer, W., Hensley, S., (2005). An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report JPL D-31639, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California.
- Rosen, P.A., Hensley, S., Joughin, I.R., Li, F.K., Madsen, S.N., Rodriguez, E. ve Goldstein R.M., (2000). Synthetic aperture radar interferometry, *Proceedings of the IEEE*, **88**, 3, 333-382.
- Scharroo, R. ve Visser, P., (1998). Precise Orbit Determination and gravity field improvement for ERS satellites, *Journal of Geophysical Research*, **103**, C4, 8113-8127.
- Tezcan, S.S., Erdem, K., Bal, I.E., Ozdemir, Z., (2002). Seismic amplification at Avcılar, Istanbul, *Engineering Structures*, **24**, 5, 661-667.
- Tüysüz, O., (2007). Kişisel görüşme.
- UKNERC (2004). GMES Case Study 3: Stroke-on-Trent and Istanbul. Providing a ground motion service across Europe, Press Release, UK. Natural Environment Research Council.
- Usai, S., (2000). An analysis of the Interferometric Characteristics of Anthropogenic features , *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **38**, 3, 1491-1497.