

InSAR Ölçülerinin Doğruluk Araştırması (The Accuracy Assessment Of Insar Measurements)

Yavuz Selim ŞENGÜN

Harita Genel Komutanlığı, Ankara
yavuzselim.sengun@hgk.mil.tr

ÖZET

Yapay Açıklıklı Radar Interferometrisi (InSAR), yeryüzü topografyasının ve deformasyonun belirlenmesi için yeni bir jeodezik tekniktir ve yersel ölçümlere ihtiyaç duymaz. InSAR ölçüleri sadece uydu bakış doğrultusunda bilgi verir. Bu ölçüler yörünge, topografya veya atmosfer kaynaklı hataları içerisinde barındırabilir. Bu ölçülerin doğruluğu İzmit Depremi örneği üzerinde test edilmiştir. İzmit depremiyle ilgili olarak bu bölgedeki GPS noktalarındaki ölçümlerle aynı noktalardaki InSAR ölçüleri karşılaştırılmış, aradaki fark yaklaşık ± 4 cm bulunmuştur. InSAR ölçülerinin çözülmesi sırasında başlangıç noktası kaynaklı hatalardan kurtulabilmek amacıyla aynı noktalar arasındaki görece farklar incelenmiştir. Bu durumda farklar ± 2 cm'dir. Aradaki farkın nedeninin hem GPS hem de InSAR'ın kendi içerisinde barındırdığı hata kaynakları hem de postsismik deformasyon olduğu değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: GPS, InSAR, doğruluk, nokta seyrekleştirme.

ABSTRACT

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 give information only in line of sight. These measurements may include topographic, orbital or atmospheric errors. The accuracy of these measurements was tested on İzmit Earthquake sample data. The measurements at GPS points were compared with the InSAR measurements at the same points for İzmit Earthquake and the difference was found as ± 4 cm. To get rid of starting point error during the unwrapping of InSAR measurements, relative differences between the points are investigated. In this case the differences are ± 2 cm. It is evaluated that the reasons for these differences are InSAR error resources included in itself and postseismic deformation.

Key Words: GPS, InSAR, accuracy.

1. GİRİŞ

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 mümkün kılmıştır. 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 deformasyonun belirlenmesi için tekrarlı yersel ölçümlere ihtiyaç duymaktadır (Wright, 2000). Fakat bunlar nokta tabanlı ölçme sistemleri olup geniş alanların ölçülmesinde maliyeti çok fazladır. Yapay Açıklıklı Radar Interferometrisi (InSAR), yeryüzü topografyasının ve deformasyonun 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, su, petrol veya 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 vd., 2003).

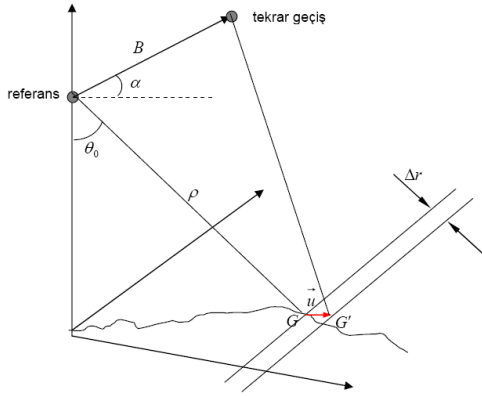
Uydular yardımıyla gerçekleştirilecek radar interferometrisi ile bütün dünyayı kaplayacak kadar alansal ölçeğe kavuşulmasının yanında, yüksek çözünürlüğe de erişilmiştir. Optik alıcıların

Yüzey deformasyonu nedeniyle, Şekil 2'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

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

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

Bu nedenle, yer değiştirme vektörünün, uydudaki 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.



Şekil 2. InSAR deformasyon modeli.

b. Atmosferik Düzensizlikler 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 birçok değişik şekil alabilir. Etna yanardağında yapılan bir çalışmada 6 ± 3 cm.lik atmosferik gecikmeler hesaplanmıştır (Delacourt vd., 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 vd., 2001; Williams vd., 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.

c. Uyumsuzluk (Korelasyonsuzluk)

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).

$$\gamma_{top} = \gamma_{termal} \cdot \gamma_{zamansal} \cdot \gamma_{geometrik} \cdot \gamma_{dopplermerkezi} \cdot \gamma_{proses} \quad (5)$$

Termal gürültünün interferometrik faza olan etkisi algılayıcı sistemin "sinyal gürültü oranı" (SNR) ile ifade edilebilir.

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 oluştuğu bölgeleri belirlemek mümkündür. Çünkü interferogramdaki komşu pikseller birbirinden çok farklı faz değerlerine sahiptirler. Uyuşumdan uzaktırlar.

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

$$\gamma_{geometrik} = 1 - \frac{cB_{\perp}}{\lambda RB_w} |\cot(\theta_0 - \alpha_t)| \quad (6)$$

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.

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 değer;

$$\gamma_{dopmer} = \begin{cases} 1 - \frac{\Delta f_{dm}}{B_A} & \text{eger } |\Delta f_{dm}| \leq B_A \\ 0 & \text{eger } |\Delta f_{dm}| > B_A \end{cases} \quad (7)$$

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

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

3. INSAR YÖNTEMİNİN DOĞRULUK ARAŞTIRMASI

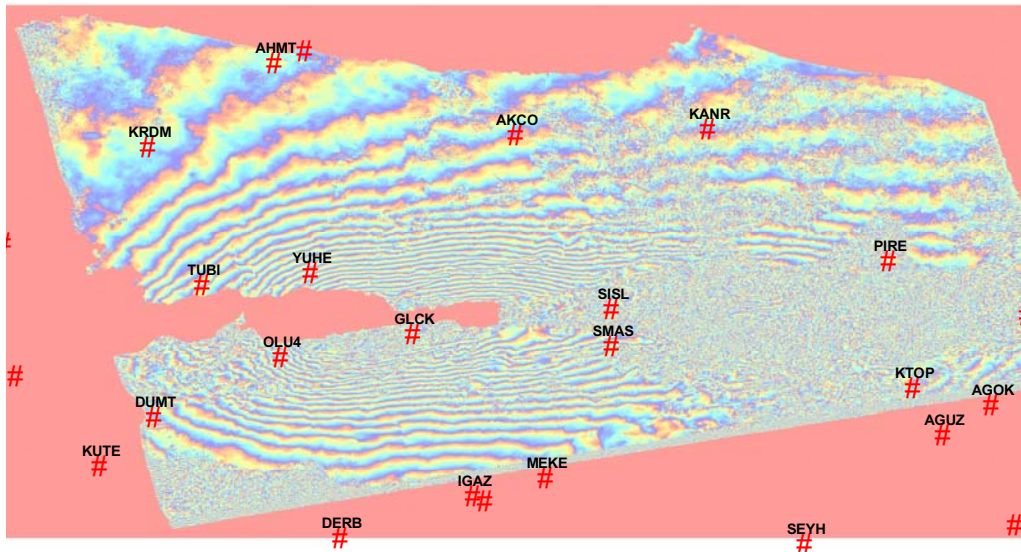
InSAR ölçülerinin doğruluk araştırması elde verisi mevcut bulunan İzmit Depremi için gerçekleştirilmiştir. İzmit depremi öncesinde ve sonrasında Harita Genel Komutanlığı (HGK), İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ), Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (TÜBİTAK-MAM) ile Massachusetts Institute of Technology (MIT) tarafından yapılan GPS ölçülerinden hesaplanan deprem anı yer değiştirme miktarları Rob Reilinger vd. (2000) tarafından yayımlanmıştır.

Aynı bölgeye ait interferogram ise Tablo 1'de özellikleri verilen ve konumsal ve zamansal baz mesafesi uygun bulunan iki adet SAR görüntüsü yardımıyla oluşturulmuştur. 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 Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) verisi kullanılmıştır.

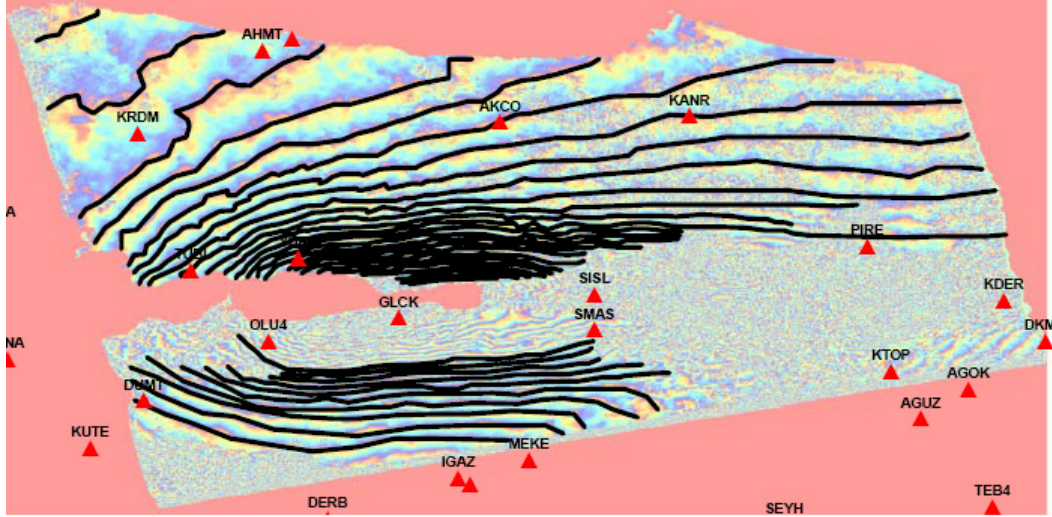
Tablo 1. InSAR uygulaması için kullanılan görüntü özellikleri.

| Uydu | Yörünge Nu. | Alım Tarihi | İz Nu. | Çerçeve Nu. |
|------|-------------|-------------|--------|-------------|
| ERS1 | 42229 | 12 08 99 | 157 | 815 |
| ERS1 | 42730 | 16 09 99 | 157 | 815 |

Şekil 3'de; oluşturulan interferogram ve üzerine düşen GPS noktaları verilmiştir. Toplam 11 adet GPS noktası oluşturulan interferogramın üzerine düşmektedir. Bunlardan 8 tanesi Kuzey Anadolu Fay (KAF) hattının kuzeyinde, 3 tanesi ise güneyinde kalmaktadır.



Şekil 3. İnterferogram bölgesinde mevcut GPS noktaları.



Şekil 4. İnterferograma ait devinimlerin sayısallaştırılması.

İnterferogram üzerindeki mutlak deformasyonun elde edilebilmesi için faz çözülmesine ihtiyaç vardır. Faz çözülmesi tanımlı algoritmalar tarafından yapılmaktadır. Fakat bu algoritmalar yardımıyla bütün durumlar tam olarak modellenemediği için gözle fark edilebilen fakat program tarafından çözülemeyen bölgeler oluşabilmektedir. GPS noktalarından bir kısmı da gözle görülebilen fakat program tarafından fazı çözülemeyen alan içerisinde kalmaktadır. Bu nedenle doğruluk araştırması için otomatik olarak çözülen faz kullanılmamış, Şekil 4'de verildiği gibi interferogram elle sayısallaştırılmış devinimler bu şekilde mevcut faz değeri üzerine eklenmiştir.

GPS noktalarındaki yer değiştirme vektörleri 3 boyutludur. InSAR'dan elde edilen yer değiştirme miktarları uydu bakış doğrultusunda tek boyutludur. İki farklı ölçü grubunun karşılaştırılabilmesi için GPS yer değiştirme vektörlerinin uydu bakış doğrultusuna izdüşürülmesi gerekmektedir. Bunun için, GPS noktalarındaki yer değiştirme vektörleri, uydunun bakış doğrultusundaki birim vektörle iç çarpım yapılarak (inner product), GPS vektörlerinin uydu bakış doğrultusundaki bileşenleri hesaplanmıştır. İç çarpım için eşitlik;

$$\vec{u} \cdot \vec{n} = u_x n_x + u_y n_y + u_z n_z \quad (8)$$

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

GPS ve InSAR ölçüleri karşılaştırılırken fayın kuzeyi ve güneyindeki farkları birbirinden ayrı olarak değerlendirilmiştir. Tablo 2'de verilen fayın kuzeyindeki 8 nokta için farkların hepsi aynı yönlüdür ve ortalaması 49 mm'dir. GPS ölçüleri için YUHE noktasının uydu bakış doğrultusundaki belirsizliği 63 mm'dir. Bu noktanın GPS ölçülerinde özellikle yükseklik tekrarlılığında problemi olduğu görülmektedir. YUHE noktası hariç tutulup tekrar bir değerlendirme yapılırsa farkların ortalaması 38 mm'dir.

Tablo 2. İnterferometri ve GPS sonuçlarının karşılaştırılması.

| Nokta İsmi | InSAR ölçüsü (mm) | GPS ölçüsü (mm) | Fark (mm) |
|------------|-------------------|-----------------|-----------|
| PIRE | 337 | 280 | 57 |
| KANR | 168 | 126 | 42 |
| AKCO | 148 | 88 | 60 |
| YUHE | 422 | 314 | 108 |
| SILE | 50 | 26 | 24 |
| AHMT | 43 | 33 | 10 |
| TUBI | 258 | 210 | 48 |
| KRDM | 52 | 21 | 31 |
| SMAS | -340 | -361 | 21 |
| OLU4 | -404 | -499 | 95 |
| DUMT | -37 | -130 | 93 |

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

Fay hattının kuzeyi için noktaların görelî koordinatlarının değerlendirme sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'te ikili GPS noktaları arasındaki görelî farklar hem GPS ölçülerinden hem de interferometrik ölçülerden karşılaştırılmıştır. Bu farkların ortalaması 20 mm ve standart sapması ± 7 mm'dir.

Tablo 3. Nokta deformasyonlarının görelî karşılaştırması.

| Nokta İsmi | InSAR ölçüsü (mm) | GPS ölçüsü (mm) | Fark |
|------------|-------------------|-----------------|------|
| KRDM-TUBI | 206 | 189 | 17 |
| KRDM-AKCO | 96 | 67 | 29 |
| AKCO-TUBI | 110 | 122 | 12 |
| SILE-TUBI | 208 | 184 | 24 |

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 değerlendirilmiştir. İnterferogram oluşturulan ikinci görüntünün tarihi 16 Eylül 2007 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. Şekil 1 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 fazın çözülmeye başlandığı başlangıç noktasının 0 olarak alınmasına rağmen 0'dan farklı olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. IGAZ noktası Şekil 1 incelenirse intreferogramın hemen güney sınırının dışına 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. SONUÇ

InSAR ölçülerinin doğruluğu, GPS ölçüleri yardımıyla değerlendirilmeye çalışılmıştır. İzmit depremiyle ilgili olarak elde mevcut SAR görüntüleri yardımıyla interferogram oluşturulmuştur. İzmit depremi öncesinde ve sonrasında yapılan GPS ölçülerinden hesaplanan deprem anı yer değiştirme vektörlerinin 11 tanesi oluşturulan interferogram üzerine düşmektedir.

Fayın kuzeyindeki GPS noktaları ile aynı noktadaki InSAR ölçüleri karşılaştırılırsa farkların ortalaması 38 mm'dir. 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. Fayın güneyindeki 3 nokta için de farkların hepsi aynı yönlüdür ve ortalaması 70 mm'dir.

Fayın güneyi için oluşan farkın başlangıç noktasının 0 olarak alınmasına rağmen 0'dan farklı olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. InSAR ile GPS ölçüleri arasındaki özellikle görelî farklar incelendiğinde InSAR ölçüleriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Mevcut farkın olası sebepleri şunlardır: Deprem sonrası hareketin InSAR ölçülerinin içerisinde olması, GPS ölçüleri içerisinde olmaması bir etkidir. 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° derece yaptığı için uydu bakış doğrultusuna asıl katkı GPS ile karşılaştırıldığında düşey bileşenden gelmektedir. Aradaki farkın bir nedeni 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.

Yapılan çalışma sonucunda uygun geometri, uygun sayısal yükseklik verisi ve uygun atmosferik koşullarda oluşturulacak

interferogramların jeodezik çalışmalarda kullanılabileceği görülmüştür.

Jeodezik koordinatlandırma, ölçme alanının büyüklüğüne, konumuna ve tarayıcının özelliklerine bağlı olarak bu yöntemlerden birisi ile yapılabilir.

KAYNAKLAR

- 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.
- 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.
- Hanssen, R., 2001, **Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis**, Kluwer Academic Publishers Dordrecht, ISBN-10:0792369459, 328 p.
- Lee, H, Liu, J. G., 1999, **Spatial decorrelation due to topography in the interferometric SAR coherence imagery**, Proceedings of IGARSS99, Hamburg, Germany, 485-487.
- 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.
- Smith, L., 2002, **Emerging Applications of Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) in Geomorphology and Hydrology**, Annaşs of the Association of American Geographers, 92(3), 385-398.
- 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, T., 2000, **Crustal Deformation in Turkey from Synthetic Aperture Radar Interferometry**, University of Oxford, Ph.D.Thesis.
- 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.
- 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.