

InSAR ölçülerinin doğruluk araştırması ve nokta seyrekleştirilmesi

Yavuz Selim ŞENGÜN*, **Rasim DENİZ**

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Geomatik Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Yapay Açıklıklı Radar İnterferometrisi (InSAR), yeryüzü topografyasının ve deformasyonun belirlenmesi için yeni bir jeodezik tekniktir ve yersel ölçümlere ihtiyaç duymaz. InSAR ölçü sadece uydu bakış doğrultusunda bilgi verir. Bu ölçüler yörünge, topografya veya atmosfer kaynaklı hataları içerisinde barındırabilir. 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 ± 4 cm bulunmuştur. InSAR ölçülerinin çözülmesi sırasında başlangıç noktası kaynaklı hatalardan kurtulabilmek amacıyla aynı noktalar arasındaki göreceli farklar incelenmiştir. Bu durumda farkların ortalaması ± 2 cm'dir. Aradaki farkın nedeninin hem GPS hem de InSAR'ın kendi içerisinde barındırdığı hata kaynakları hem de GPS ölçülerinin deprem sonrası hareketleri içermemesine rağmen, InSAR ölçülerinin elde edildiği deprem sonrasına ait görüntünün depremden 1 ay sonrasına ait olması nedeniyle deprem sonrası hızlı hareketleri içermesi olduğu değerlendirilmiştir. InSAR ölçüleri çok yoğun olması nedeniyle, hesaplama yükü çok ağırdır. Ayrıca bu ölçülerin GPS ve nivelman gibi başka jeodezik yöntemlere ait ölçü gruplarıyla kullanılmaları durumunda çok baskın olmaktadır. Bu nedenle seyrekleştirilmelerine ihtiyaç vardır. InSAR ölçülerinin seyrekleştirilmesi üzerine yeni bir algoritma geliştirilmiş, bu algoritmanın sık kullanılan quadtree algoritması ile karşılaştırması yapılmıştır. Yeni algoritmanın quadtree algoritmasına göre InSAR veri kümesini 2/3 oranında daha az noktayla daha doğru bir şekilde temsil ettiği hesaplanmıştır. Bu seyrekleştirme algoritmasının yapılacak çalışmalarda kullanılabileceği değerlendirilmiştir.

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

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Yavuz Selim ŞENGÜN. yavuzsengun@gmail.com; Tel: (312) 595 21 40.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Geomatik Mühendisliği Programında tamamlanmış olan "GPS ve InSAR Ölçülerini Birlikte Kullanarak İzmit Depreminde Oluşan Deformasyonun Modellenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 02.02.2009 tarihinde dergiye ulaşmış, 10.03.2009 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.09.2009 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir

The accuracy assessment of InSAR measurements and reducing data points

Extended 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 uses Synthetic Aperture Radar (SAR) images which are in the region of microwave of electromagnetic spectrum. It is a method in which phase component of SAR images are differenced and effects other than the deformation are removed to determine deformation. These phase difference images are called interferograms. In interferograms every 2π cycle of phase corresponds to one wavelength deformation in line of sight (LOS). To determine absolute deformation these cycles have to be unwrap namely added over each other.

InSAR measurements can include many types of errors. These errors can be caused by orbit, digital elevation model or atmosphere. Not many studies have been interested on the accuracy of these measurements. In this study the accuracy of InSAR measurements are tested for İzmit Earthquake by GPS measurements. Firstly, the interferogram was constructed by ERS-1 SAR images. Because of the inadequacy of the phase unwrapping algorithm, every cycle of the interferogram was digitized. The measurements at GPS points were compared with the InSAR measurements at the same points for İzmit Earthquake. 11 GPS points lay over the interferogram. The comparison was made for north and south of North Anatolian Fault (NAF) separately, 8 of the GPS points stay north of the NAF, 3 of them south. For the aim of comparison, the deformation of GPS in 3 dimensions was projected on LOS of InSAR measurements.

For the North of the NAF, the average of the differences is 38 mm and all the differences are in the same direction. The reason for this difference is thought to be the postseismic deformation which was included by InSAR measurements but not by GPS measurements. For South of the NAF the average of the difference is 94 mm and all the differences are in the same direction. The main reason for this difference is the beginning point that is chosen to unwrap phase. It can be seen that the GPS point which is near the beginning point but out of the InSAR meas-

urements coverage area has a 91mm displacement in LOS. This means that the beginning point has a 91 mm shift. In this case the difference for the South of the NAF is only 3 mm.

Another test was held to check the accuracy. It was taking in to account the double differences between GPS points. By this namely, differencing displacement between two GPS points and checking InSAR measurements at those point, we can get rid of unwrapping beginning point error. The average of differences is 20 mm and Standard deviation is ± 7 mm.

InSAR measurements are highly dense compared with other geodetic observations. For calculation convenience, this huge number of data points is reduced by different approaches. One of the most used is quadtree algorithm. Quadtree algorithm, divides the data in quadrants and checks the rms value for each quadrant. If the rms value of a quadrant bigger than a threshold value determined at the beginning, algorithm goes on dividing that quadrant to another quadrants. If the rms value is smaller than the threshold value, the algorithm stops for that quadrant. This algorithm generally gives good results but it does not take in to account the natural patterns that exist in data. In this study a new algorithm is investigated which takes into account the patterns in a data set and can represent the data by smaller number than quadtree.

In this new developed algorithm contour lines are created for the data with the selected interval taking into account the slope of the data. Then, these contour lines are simplified by the commonly used Douglas-Poiker algorithm. And all the vertices of the simplified contour lines are converted to data points. And for other purposes such as weighting all of these data points are associated with the points in the original dataset that each of them represents. To test the results this new algorithm was compared with quadtree algorithm for İzmit earthquake interferogram. The data set was sampled by quadtree and newly developed algorithm. And by these sampled points, the original data set was tried to be constructed again. Differences are taken with the reconstructed dataset and original dataset for two algorithms. It was observed that the new algorithm represents the original data more accurately with 2/3 less points if compared with the quadtree.

Keywords: GPS, InSAR, accuracy, data reduction.

Giriş

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 İnterferometrisi (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 ta-

banlı 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 aksine gece veri toplanabildiği gibi, bulutlu alanların üstünde de ölçü yapılabilmektedir. Son 15 yıl içerisinde InSAR tekniği teoriden yer bilimlerinde kabul edilmiş, bir çok farklı uygulama alanı olan bir araca dönüşmüştür (Smith, 2002).

Deformasyon ölçülerinde; GPS istasyonu ölçümleri, yüksek zamansal çözünürlüğe 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.

InSAR yöntemi

SAR interferometrisi gerçekleştirmek için iki SAR görüntüsüne ihtiyaç vardır. Uyduda taşınan yan bakışlı yapay açıklıklı radar sistemi yörüngesinde ilerleyip, bir şeridi görüntülerken, yeryüzünden yansıyan radar dalgalarının genlik ve faz bilgilerini kaydeder (Zebker vd., 1994). Radar görüntülerindeki her bir piksel için ölçülen faz bilgisi, radarın gönderdiği dalganın giriş-dönüş mesafesi ile dalganın yüzey ile etkileşimine bağlı olarak oluşan fazın toplamına eşittir.

Aynı bölgenin iki radar görüntüsünün faz değerlerinin farkı alınır ve yeryüzünün geri yansıtma karakteristiği değişmemişse, rastgele katkılar gider ve bu faz farkı faz 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 ve yeryüzü deformasyonundan kaynaklanmaktadır.

Faz farklarının oluşturduğu görüntüye interferogram denmektedir. Interferogram üzerinde girişim çizgileri veya saçağı görülecektir. Çizgilerin bir kısmı koyu bir kısmı ise açık renktedir. Koyu renkli girişimler fazları birbirlerinin aksi istikametindedir. Parlak çizgiler yapıcı enterferansın olduğu yerlerdir Yani fazları birbirlerinin aynı istikametindedir

Deformasyon belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilecek bir çalışmada; atmosfer kaynaklı bir etki yoksa topografyanın etkisi sayısal yükseklik modeli yardımıyla, görüntüleme geometrisinin etkisi uydu yörünge bilgileri yardımıyla giderilirse geriye sadece faz farkı nedeni olarak deformasyon kalacaktır.

Oluşturulan interferogramın doğruluğu kullanılan sayısal yükseklik modeli ve uydu yörünge bilgisine, radar sisteminin tasarımına ve veri işleme yöntemlerine bağlıdır. Örnek bir çalışma için InSAR ölçülerinin doğruluğu araştırılacaktır.

InSAR yönteminin doğruluk araştırması

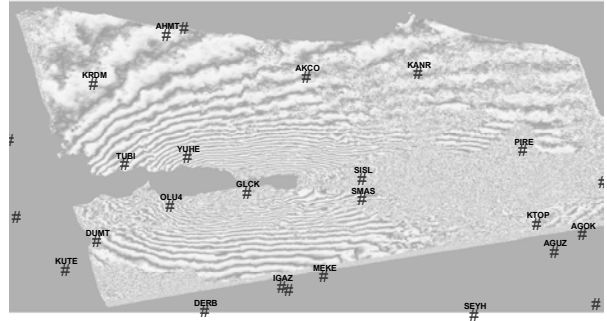
InSAR ölçülerinin doğruluk araştırması elde verisi mevcut bulunan İzmit Depremi için gerçekleştirilmiştir. İzmit depremi öncesinde ve sonrasında Harita Genel Komutanlığı (HGK), İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ), Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (TÜBİTAK-MAM)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

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 SRTM verisi kullanılmıştır.

Tablo 1. InSAR uygulaması için kullanılan görüntü özellikleri

Uydu	Yörünge No.	Alım Tarihi	İz No.	Çerçeve No.
ERS1	42229	12 08 99	157	815
ERS1	42730	16 09 99	157	815

Şekil 1'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 1. Interferogram üzerine gelen GPS noktaları

Interferogram 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, 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 gerek-

mektedir. 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;

$$\vec{u} \cdot \vec{n} = u_x n_x + u_y n_y + u_z n_z \quad (1)$$

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.

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

Fay hattının kuzeyi için noktaların görelî koordinatlarının değerlendirme sonuçları Tablo 3’de 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.

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 tarihlidir. Halbuki GPS ölçüleri hemen deprem sonrasında gerçekleştirilmiş ve deprem sonrasında hızlı yer hareketlerine maruz kalmamıştır.

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

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 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 fayın çözülmeye başlandığı başlangıç noktasının 0 olarak alınmasına rağmen 0’dan farklı olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. İGAZ noktası Şekil 1 incelenirse intreferogramın hemen güney sınırının dışına denk gelmektedir. İGAZ noktasındaki GPS yer değiştirme vektörünün uydu bakış doğrultusun-

daki 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.

InSAR nokta seyrekleştirilmesi Nokta Seyrekleştirme Algoritmaları

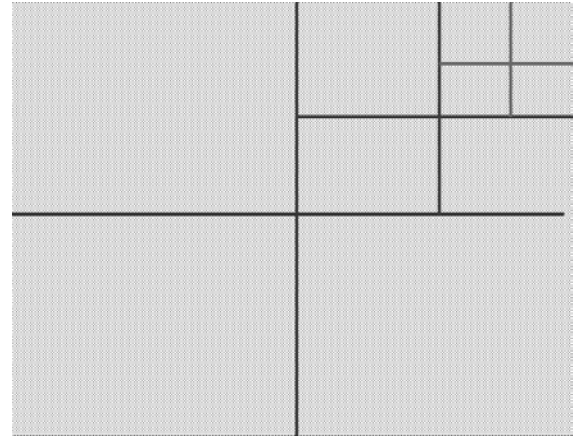
90x90m çözünürlüklü tek görüntülük (100kmx100km) bir interferogram yaklaşık olarak 1.5 milyon noktadan oluşmaktadır. Bu verinin herhangi bir hesaplamada olduğu gibi kullanılması hesaplama yükünü çok fazla arttıracaktır. Ayrıca bu verinin GPS verisi gibi yoğunluğu daha az bir veriyle birlikte kullanılması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

İnterferogramdan elde edilen deformasyon verisi konumsal olarak yüksek korelasyona sahiptir ve büyük bir sinyal kaybına sebep olmadan bu veri miktarı azaltılabilir. Bununla ilgili ilk olarak Simons ve arkadaşları alt örnekleme ismini verdikleri bir yöntem kullanmışlardır (Simons vd., 2002). Bu yöntemde örnekleme yoğunluğu deformasyon alanının eğrilğine (ikinci türevine) göre belirlenmektedir. Eğer ikinci türev büyükse örnekleme sıklığı artmakta, küçükse örnekleme sıklığı azalmaktadır.

Diğer bir uygulama ise devinin çizgileri üzerinde belirli aralıklarla noktalar olarak örnekleme yöntemidir. Stramondo ve arkadaşları devinin çizgisi üzerinde her 500m'de bir nokta olarak InSAR verisini indirgemeye çalışmışlardır (Stramondo vd., 1999).

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 2'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, parçayı oluşturan verilerin ortalamasıdır. Parçayı ifade eden koordinat ise parçanın orta noktasıdır. Bu şekilde indirgenen veri daha az nokta ile sinyalin önemli bir kısmını ifade edebilir hale gelmektedir.



Şekil 2. Quadtree algoritması

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 kalmaktadır. Verinin üzerindeki deseni dikkate alan bir algoritmaya ihtiyaç vardır.

Nokta seyreltmesi için yeni bir yöntem

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 birçok 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 3). 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

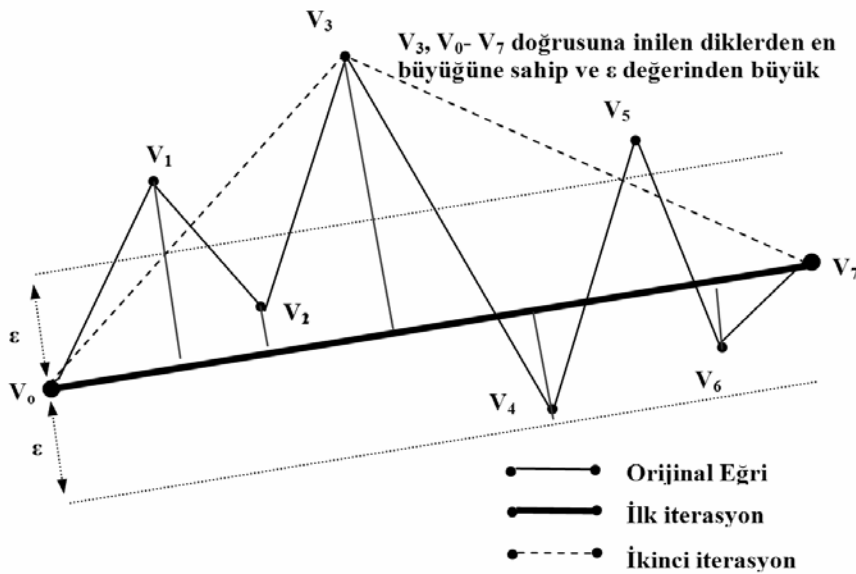
işleme iteratif olarak hiçbir dikin ϵ eşik değerinden fazla olmadığı duruma kadar devam edilir.

Basitleştirilmiş çizgileri oluşturan noktalardan yeni bir veri kümesi oluşturulur. Ağırlıklandırma çalışmasında kullanılma duruma göre, 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.

Quadtree algoritması ile yeni bir yöntemin karşılaştırması

Quadtree algoritması ve yeni oluşturulan algoritmanın İzmit depremi için oluşturulan interferogram için uygulanması sonucunda oluşan nokta sayıları özet olarak Tablo 4’de verilmiştir.

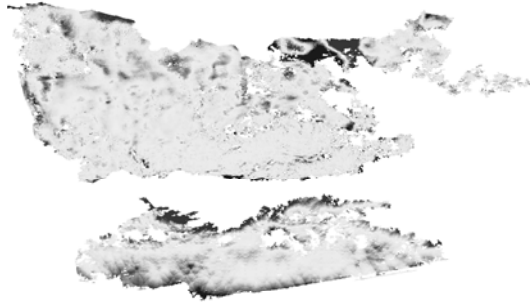
Elde edilen sonuçların asıl veriyi ne kadar temsil ettiğini belirleyebilmek amacıyla, iki yöntemle de örneklenen veri yardımıyla asıl veri tekrar oluşturulmaya çalışılmıştır. Asıl verinin elde edilmesinde kriging gridlemesi kullanılmıştır. Elde edilen veri kümelerinin, orijinal veri kümesinden farkları Şekil 4’de Quadtree algoritması için Şekil 5’de yeni algoritma için verilmiştir.



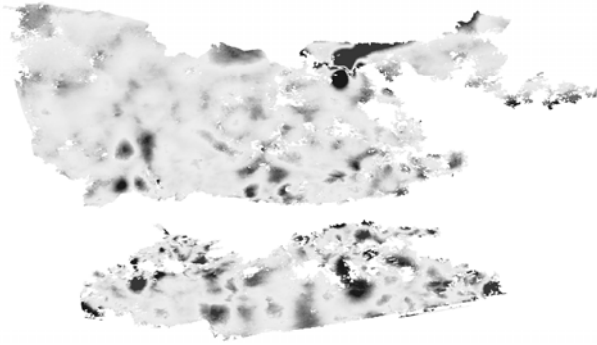
Şekil 3. Douglas-Peucker çizgi basitleştirme algoritması

Tablo 4. Nokta seyreltme yöntemlerinin örneklenen nokta bakımından karşılaştırılması

	Seyrek. Öncesi	Seyrek. Sonrası (Quadtree)	Seyrek. Sonrası (Yeni yöntem)
Üst Bölge	492660	861	699
Alt Bölge	206214	596	319
Toplam	698874	1457	1018



Şekil 4. Quadtree algoritmasının hatası



Şekil 5. Önerilen yeni algoritmanın hatası

Elde edilen sonuçlar özet olarak Tablo 5’de verilmiştir. Tablodaki 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. Tablo 4 incelenirse quadtree algoritmasında 1457 nokta 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.

Tablo 5. Nokta seyreltme yöntemlerinin asıl veri kümesiyle karşılaştırılması

Faya Göre Konum	Parametre	Quadtree	Yeni Yönt.
Kuzey	Min.(mm)	-40	-38
Kuzey	Maks(mm)	61	44
Kuzey	Ortalama(mm)	0.2	1.5
Kuzey	Standart Sapma(mm)	5	4.7
Güney	Min(mm)	-180	-116
Güney	Maks(mm)	61	48
Güney	Ortalama(mm)	5.76	1.37
Güney	Standart Sapma(mm)	17.1	9.63

Sonuçlar

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 göreli koordinat farklarıyla aynı noktalardaki InSAR ölçülerinin göreli 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 göreli 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 interferogramına katkısı olmadığı değerlendirilmektedir.

Yapılan çalışma sonucunda uygun geometri, uygun sayısal yükseklik verisi ve uygun atmosferik koşullarda oluşturulacak interferogramların jeodezik çalışmalarda kullanılabileceği görülmüştür.

InSAR ölçüleri sayı olarak çok fazla olduğu üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadan önce hesaplama kolaylığı sağlaması açısından seyrekleştirilmesine ihtiyaç vardır. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda genel olarak kullanılan yöntem quadtree algoritmasıdır (Welstad, 1999; Jonsson vd., 2002). Quadtree algoritması normalde veri içerisinde olan desenleri dikkate almamaktadır. Ayrıca her bir çeyreğin sınırında da problem olabilmektedir. Bu nedenle veri seyreltmesiyle ilgili 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.

Kaynaklar

- 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.
- Hanssen, R., (2001). *Radar interferometry*, Kluwer Academic Publishers Dordrecht, 328.
- 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, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **92**, 4, 1377-1389.
- 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.
- Simons, M., Fialko, Y. ve Rivera, L., (2002). Coseismic static deformation from the 1999 M_w7.1 Hector Mine, California, earthquake, as inferred from InSAR and GPS observations, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **92**, 1390-1402.
- 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.
- 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 E. Boschi, (1999). The September 26, 1997, Colfiorito, Italy, earthquakes: Modeled coseismic surface displacement from SAR interferometry and GPS, *Geophysical Research Letters*, **26**, 7, 883-886.
- Welstead, S. T., (1999). Fractal and wavelet image compression techniques, SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington, 232.

- Wright, T., (2000). Crustal deformation in Turkey from synthetic aperture radar interferometry, University of Oxford, Ph.D.Thesis.
- 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.
- 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**, 18, 3547-3563.