

Kuzey Anadolu Fayı'nın orta bölümündeki güncel tektonik aktivitenin belirlenmesi

Hakan YAVAŞOĞLU*, Ergin TARI

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

Özet

Dünyanın en aktif yanal atımlı fay sistemlerinden birisi olan Kuzey Anadolu Fayı (KAF), doğuda Karlıova'dan başlar batıda Kuzey Ege Denizi'nde Saros Körfezi'ne kadar uzanır. Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) içinde ağaç dalları şeklinde birçok yan kolu vardır ve bu yan kollar Anadolu'nun içlerine doğru uzanmaktadır. Tüm fay zonu sismik olarak aktif ise de, fayın aktivitesinin önemli bir bölümü ana kol üzerindedir. Kuzey Anadolu Fayı'nın orta kesiminde yan kolların keserek birbirinden ayırdığı birçok kıtasal blok vardır. Bölgedeki nispeten en büyük yan kollar inceleme için seçilmiş ve aralarındaki hareket belirlenmeye çalışılmıştır. Fay sistemlerinin güncel metotlarla izlenmesi 1980'li yıllardan sonra uydu jeodezisinde meydana gelen önemli ilerlemeler sayesinde mümkün olmuştur. Bu bağlamda, yersel tekniklerin yerini uzay ve uydu tekniklerinin alması genel fotoğrafın görülmesinde büyük kolaylıklar sağlamıştır. Bu çalışmada, jeodezik metotlardan GPS (Küresel Konumlandırma Sistemi) ve InSAR (Yapay Açıklıklı Radar İnterferometri) kullanılmıştır. Çalışmanın amacı iki metot ile sonuçlar üretmek karşılaştırmak ve/veya metotların zayıf yönlerini birbiri ile tamamlamak ve böylece bölgenin depremselliğini ortaya koymaktır. GPS ile kurulan jeodezik ağ dört yıl boyunca periyodik olarak ölçülmüştür. InSAR tekniği ile bölgeyi kapsayan görüntülerden interferogramlar oluşturulmuş ve görüntü alım zamanları arasında yüzeyde meydana gelen uydu bakış yönündeki değişimler hesaplanmaya çalışılmıştır. InSAR metodu atmosfer ve bölge topografyasına bağlı olarak istenen sonuçlara ulaşmamıştır. GPS sonuçlarının modellenmesi ile yan kolların ana kola göre nispeten yavaş olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kuzey Anadolu Fayı, GPS, InSAR, deformasyon.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Hakan YAVAŞOĞLU, yavasoglu@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 67 83.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Geomatik Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Kuzey Anadolu fayının orta Anadolu bölümündeki güncel tektonik aktivitenin jeodezik yöntemler ve elastik yarı uzay modelleme ile belirlenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 08.12.2009 tarihinde dergiye ulaşmış, 28.01.2010 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.03.2011 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Bu makaleye "Yavaşoğlu, H., Tari, E., (2010) 'Kuzey Anadolu Fayı'nın orta bölümündeki güncel tektonik aktivitenin belirlenmesi', İTÜ Dergisi/D Mühendislik, 9: 6, 73-84" şeklinde atıf yapabilirsiniz.

Determination of recent tectonic activity in the central part of the North Anatolian Fault

Extended abstract

One of the important fault systems all over the world is the North Anatolian Fault (NAF). The NAF is a long fault which stretches from Karliova to Northern Aegean. Although a lot of studies exist, the central part of the NAF has not been studied in detail. In this study, the central part of NAF from Amasya to Kastamonu has been evaluated using geodetic techniques, GPS (Global Positioning System) and InSAR (Synthetic Aperture Radar Interferometry), and modeled with DEFNODE software.

The geodetic techniques to determine the tectonic activity have been used since early 1900. The inertial methods were not sufficient to calculate the strain accumulation or slip rate of the fault. Especially, the interseismic studies cannot be possible. After the space geodesy development, the earth sciences started to use these techniques. The most useful techniques of them are GPS, InSAR, VLBI and SLR. In this study, we used GPS and InSAR technique because of the financial constrains, mobility and accuracy. The GPS campaigns were carried out in four years periodically at 16 force-centered stations. Every year, the measurements were done in the same week. Each station was measured at least 8 hours in three days. All stations were not measured simultaneously because of the lack of equipments. So, we had continuous stations to link measurements which were carried out in two stages. The measurements obtained from campaigns and downloaded from internet belonging to IGS sites close to study area were processed using GAMIT/GLOBK software. The process was run in three steps. First step was made with GAMIT, the all GPS data belonging to same day had put in the same day directory and the required files for process were updated from process center like SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center). The stations coordinates and its covariance matrix were calculated. In this step, the repeatabilities were checked to protect data against to blunder and systematic errors. Second step, the calculated data (called quasi-observation) were combined with the international global network data computed by center, SOPAC. Each data had different sites that the all quasi-observation should have various weights. In the third step, the combined data were transformed in the reference

frame like ITRF (International Terrestrial Reference Frame) using common sites and transform parameters. After that, we calculated the sites velocities according to Eurasia plate in ITRF2000 reference frame using sites which have well known coordinates and have represented Eurasia plate very well. The GPS results are given in the text.

InSAR method depends on phase information in two SAR images by calculating phase difference between each pair of corresponding image points. The new image with interference pattern of fringes due to relative phase difference is called an interferogram. Phase change in the interferogram shows differences in the range distance between image acquiring platform (aircraft, satellite) and point on the ground. One complete phase cycle (2π radians) corresponds to a relative range change by half of wavelength. Main InSAR components are three, first is the image, at least two, second is the topography removal tools, for example, other interferogram that does not contain deformation or DEM (Digital Elevation Model), third is orbital information. In this study, we used the ERS-1 and ERS-2 (European Remote Sensing satellite) data obtained from ESA (European Space Agency) with track numbers 164 and 300. All the possible combinations were processed but the expected phase gradient was not calculated as useful as it was useful to determine tectonic activity. Main results of these are the atmospheric effects on the interferogram. The topography also rises to effect because of the gradient differences.

Finally, GPS results were modeled by DEFNODE software developed by Prof. Dr. Robert McCaffrey. The DEFNODE calculated strain and slip rate on the fault using velocity vectors of sites, locking depth, fault geometry and continental block definitions. The fault geometry was obtained from field work. The fault geometry described the continental block boundaries. All modeling results calculated from the software are shown in the text.

According to results obtained from GPS and InSAR, the topography and atmosphere are important for InSAR to calculate interseismic strain accumulation of the hilly region. The other important result is that the main branch of the NAF has faster slip rate than splays of the NAF in the study area.

Keywords: North Anatolian Fault, GPS, InSAR, deformation.

Giriş

Kuzey Anadolu Fayı (KAF) ülkemizin ve dünyanın en önemli fay hatlarından birisidir. Son yüzyıl içerisinde önemli depremler üretmiş, büyük can ve mal kaybına sebep olmuştur. Ülkemizin üzerinde bulunduğu fay kuşağının sebep olduğu depremlerin daha iyi tanımlanabilmesi ve depremlerin önceden kestiriminin yapılabilmesi için son on yılda ulusal ve uluslararası çalışmalar yoğunlaşarak artmıştır. Bu çalışmada ise, KAF'ın Ilgaz ile Amasya arasında kalan orta kesimi çalışılmaktadır.

Depremlerin önceden kestirimi için levha sınırlarında oluşan fay hatlarının incelenmesi ve izlenmesi hayati öneme sahip konulardır. Bu bağlamda birçok disiplinin ortak çalışması ve bilimsel birikimin ortak değerlendirilmesi önem kazanmaktadır.

Jeodezi biliminin anlamlı deformasyonların tespit edilmesinde ve hız vektörlerinin belirlenmesinde önemli bir rolü vardır. Yersel veya uzaysal ölçmeler yardımı ile nokta bazında veya alan bazında anlamlı hareketler ve bu hareketlerin yönü ve hızı belirlenebilir. Bu amaçla VLBI (Very Long Baseline Interferometry – Çok Uzun Bazlı İnterferometri), SLR (Satellite Laser Ranging – Yapay Uydulara Lazer ile Boy Ölçmeleri), LLR (Lunar Laser Ranging – Aya Lazer ile Boy ölçmeleri), InSAR (Synthetic Aperture Radar Interferometry – Yapay Açıklıklı Radar İnterferometri) ve GPS (Global Positioning System – Küresel Konumlama Sistemi) gibi uzaysal teknikler ile klasik açı-kenar ölçmeleri gibi yersel teknikler kullanılmaktadır.

GPS, pre-sismik (deprem öncesi), co-sismik (deprem anı) ve post-sismik (deprem sonrası) hareketlerin belirlenmesi için kullanılabilen bir tekniktir. Deprem öncesinde gerilme birikiminin belirlenmesinde, deprem anında depremin meydana getirdiği atımın büyüklüğünün belirlenmesinde ve deprem sonrası elastik hareketin bölgeyi etkileyişinin incelenmesinde çok sık olarak kullanılmaktadır (McClusky vd., 2000; Reilinger vd., 2006). InSAR ile bir bölgeye ait hız alanının belirlenmesi, deprem anı, öncesi ve sonrası için tahminlerde bulunulması da olasıdır. İki teknik arasında hız bileşeni farkı (GPS

için yatay bileşenlerin belirlenmesinde doğruluk yüksek iken InSAR için düşey bileşenin belirlenmesindeki doğruluk yüksektir (Hanssen, 2001) temel farktır. GPS ile veri elde etmesi zor olmasına karşın verilerin işlenmesi kolaydır. Buna karşın InSAR için veri elde etmesi kolay fakat işlenmesi zordur.

GPS ve InSAR tekniklerinin birlikte kullanılması durumunda düşeyde ve yatayda oluşan deformasyonlar belirlenebilmekte ve bölgenin hareket karakteri (burkulma, dönme vb.) ortaya konulabilmektedir. Belirlenen hız vektörü ve/veya alanı yardımı ile deprem öncesi gerilmeler hesaplanarak diğer disiplinlerin kullanımına sunulmaktadır. Böylece çok disiplinli bir çalışma ile bölgeye ait depremsellik ortaya konulabilmektedir.

Çalışma bölgesi

Çalışma bölgesi Kuzey Anadolu Fayı'nın (KAF) Lâdik ile Ilgaz arasında kalan orta kesimini içermektedir. Burada KAF, güneye doğru uzanan içbükey kollar içerir. Bu kollar genel olarak sağ yanal atımlıdır. Sungurlu Fay'ı olarak bilinen kol bunların en büyüklerinden biridir. Bu fay Niksar'dan başlar ve güneybatıda Çankırı Havzası'na kadar uzanır (Şekil 1). Diğer önemli kollar Merzifon ve Lâçin faylarıdır. Bu faylar ise literatüre geçmemiş ancak yakın zamanlarda depremler üretmiş aktif faylardır (İşseven ve Tüysüz, 2006). Kuzey Anadolu Fay'ından ayrılarak güneye doğru, kavisler çizerek devam eden tali faylar ve bölgede meydana gelen depremler Tablo 1'de verilmiştir.

Bu çalışmaya konu olan bölgede batıda Kurşunlu-Ilgaz, doğuda Amasya-Havza, güneyde ise Sungurlu yerleşim birimi ile sınırlanan alan içerisinde gerek Kuzey Anadolu Fayının ana kolu gerekse tali kollar bölgeyi biçerek bazı kıtasal bloklara bölmüşlerdir. Fayların sınırladığı bu kıtasal bloklar, yakın zamanda gerçekleştirilen araştırmalara (İşseven ve Tüysüz, 2006) göre fayların etkisi ile bağımsız hareket etmekte ve düşey bir eksen etrafında farklı yönlere dönmektedir. Bu bölgede yapılan paleomanyetizma çalışmaları da günümüzde GPS ile belirlenen bu hareketin geçerliliğine işaret etmektedir (İşseven ve Tüysüz, 2006).



Şekil 1. Orta-KAF çalışma bölgesi ve GPS istasyonları

Tablo 1. Son yüzyılda bölgede meydana gelen büyük depremler

Tarih	Deprem-Fay-Uzunluk	Ms
09.03.1902	Çankırı	5.5
25.06.1910	Osmancık (Çorum)	6.1
26.12.1939	Erzincan (KAF) 360km	7.8
21.11.1942	Osmancık (Çorum)	5.6
02.12.1942	Osmancık (Çorum)	5.9
20.12.1942	Erbaa (KAF) 50km	7.1
01.02.1943	Tosya/Ladik (KAF) 260km	7.3
13.08.1951	Kurşunlu (KAF) 50km	6.9
07.09.1953	Kurşunlu/Çankırı	6.1
05.10.1977	Çankırı	5.8
14.08.1996	Merzifon (Mecitözü)	5.4
06.06.2000	Orta (Çankırı)	5.9
30.04.2005	Çorum	4.7

Bölgede 1990'lerden itibaren birçok çalışma yapılmış olup mikro ölçekli bir çalışma bu çalışmaya kadar yapılmamıştır (McClusky vd., 2000, Reilinger vd. 2006, Kozacı vd., 2007, Hartleb vd., 2003 ve Hubert-Ferrari vd., 2002). Bu çalışma ile bölgede mikro ölçekte var olan fayların aktivitesi ve güncel hızları ortaya konulmuştur. Bu bağlamda yapılan GPS ölçmeleri, InSAR değerlendirmeleri ve hız vektörlerinden üretilen model ve model sonuçları sunulmuştur.

Çalışmada kullanılan teknikler

GPS (Küresel konumlandırma sistemi)

GPS, Amerika birleşik Devletleri Savunma Bakanlığı tarafından kurulan ve işletilen küresel konumlandırma sistemidir.

GPS tekniğinin yer bilimleri için kullanımı 1980'li yılların sonlarında başlamış ve 2000'li yıllarda artarak devam etmiştir (Reilinger vd., 1997, 2006, McClusky vd., 2000). Yayınlanan birçok çalışmada GPS tekniği, bölgeyi kapsayan bir jeodezik ağı sürekli ve/veya periyodik kampanyalar ile ölçülmesi şeklinde kullanılmıştır. GPS istasyonları fay sistemini ve kıtasal blokları temsil edecek şekilde seçilmiştir. Yapılan ilk çalışmalar yersel ölçmelerin var olduğu ağlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu jeodezik ağlar açı, açı-kenar veya kenar ağlarından oluşabilmekteydi. Yersel ölçmeler, yapılması maliyetli, zahmetli ve anlık izlemeler için yeterli değildir. Uydu jeodezisi için başlangıçtan bugüne bakıldığında, GPS sisteminin kendi içinde var olan konfigürasyon, yörünge ve hesaplama tekniği vb. problemler nedeniyle ilk çalışmaların sonuçları istenen verimlilikte olmamıştır. Buna karşın yersel ve uydu teknikleri ileriki çalışmalara deneyim açısından önemli yararlar sağlamıştır.

Günümüzde ise GPS tekniği ile hem bölgesel hem de küresel ölçekte çalışmalar yapılabilir. Tekniğin ulaşılmış olduğu güvenilirlik ve ekonomik kazanç hem yersel teknikleri hem de var olan diğer uydu tekniklerini geride bırakmıştır. Günümüzde, iki yöntem ile teknik uygulanmaktadır. Birincisi, bölgeyi kapsayan (bölgesel veya küresel) jeodezik ağ(lar) kurulmaktadır. Bu ağın noktaları birkaç kilometre aralıktan binlerce kilometre aralığa kadar noktalardan oluşmaktadır. Bu ağ üzerinde genel olarak sürekli istasyonlar tesis edilerek ölçmeler yapılmaktadır. Bu ağlardan başlıcası olarak IGS (Uluslararası GPS Ağı) sayılabilir. Elde edilen uzun zamanlı ölçülerden yararlanılarak, yer hareketleri, uydu parametreleri, atmosferik çalışmalar ve bölgesel jeodezik çalışmalar yapılabilir. Bu bağlamda ülkemizde geliştirilen MAGNET (Marmara Sürekli GPS Ağı), CORS (Sürekli Operasyonel Referans Sistem) örnek gösterilebilir. Bu sürekli ağların sıklığının yeterli olmadığı bölgelerde uygun noktalar seçilerek yıllık periyotlarla kampanyalar gerçekleştirilmektedir. İkinci yöntem ise, fayın ayırdığı blokların elastik hareket yaptığı teorisinden yola çıkılarak fay bölgesini kapsayan jeodezik bir noktalar dizisi (jeodezik ağ) oluşturmaktır. Bu teknik ile çalışma bölgesinde var olan blokları tanımlayacak ve bölgesel ölçekli hareketlerden (heyelan, hafriyat vb.) etkilenmeyecek şekilde faya yakın ve uzak noktalar tesis edilir. Elastik hareketin doğası gereği faya yakın ve uzak noktaların fayın hareketli veya kilitli olmasına göre farklı hızlara sahip olmaları beklenir. Fay hattının iki yakasındaki noktaların hızları bir kutup etrafında dönen bloğun merkezine doğru azalacaktır. Bununla beraber fayın her iki yakasındaki hareket vektörleri birbirine göre farklı hızlarda olacaktır.

Bu çalışmada, zorunlu merkezleştirme sistemine sahip 16 noktalı jeodezik bir ağ çalışma bölgesinde kurulmuştur (Şekil 2).

Tesis edilen jeodezik ağ 2001 ve 2004 yılları arasında 4 yıl boyunca periyodik olarak jeodezik GPS alıcıları (Ashtech, Trimble ve Leica) ile ölçülmüştür. Ölçmeler en kısa süre 24 saat olacak şekilde planlanmış ve değişik zamanlarda yapılan ölçmeleri birleştirmek için iki istasyon kampanya zamanı boyunca sürekli çalıştırılmıştır.

Gerek donanım gerekse finansal kısıtlar nedeniyle tek oturumda tüm ölçmeler tamamlanamamıştır.

GPS verilerinin değerlendirilmesi

Elde edilen veriler GAMIT/GLOBK yazılım takımı ile değerlendirilmiştir (King ve Bock, 2002). Değerlendirme üç aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, günlük veriler ve bu verilere ilave olarak bölgeye yakın IGS istasyonlarından (ANKR, GRAZ, ISTA, TRAB, MATE, NICO, SOFI, ONSA, TUBI, WTZR, ZECK) alınan veriler birlikte değerlendirilerek istasyon noktalarının koordinatları ve bu koordinatlara ait varyans-kovaryans matrisi elde edilmiştir. Elde edilen koordinatlar tekrarlılıkların (her istasyonun günlük ölçülerinden elde edilen koordinat ve varyans değerlerinin çizimi) gösterilmesi için çizime dökülmüştür. Büyük varyans değerine sahip olan veya ortalamadan büyük sapmalar gösteren noktaların o günkü verileri tekrar incelenmiştir. İncelenen ve temizlenen veriler (faz kesikliği, atmosferik etki vb. dolayısıyla) ile değerlendirmenin ilk adımı tekrarlanmıştır. Temizlenemeyen veriler değerlendirmeden çıkarılmıştır. İkinci adımda GAMIT ile günün işlenen veriler (h-dosyaları) birleştirilmiştir. Birleştirme işlemi sırasında küresel ağlara ait birleştirilmiş veriler internet ortamında alınmış ve değerlendirmeye dahil edilmiştir. Küresel ağlardan igs1, igs2 ve eura ağları kullanılmıştır. Küresel ağların güvenilirliğinin yüksek olması nedeniyle her ağ için ağırlıklandırmalar yapılmıştır. Küresel ağlar ile yapılan birleştirmenin sağlıklı olması GAMIT aşamasında işlenen küresel yakın istasyonların yoğunluğuna bağlıdır. Bu nedenle ilk aşamada alınan sürekli istasyonlar işlem için büyük önem göstermektedir. Son aşama olan üçüncü aşamada, elde edilen birleştirilmiş (Küresel ve bölgesel ağlar) günlük ağların transformasyon ile referans sistemine oturtulması gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada ITRF (Uluslararası Yersel Referans Sistemi) 2000 yılı parametreleri ve bu referans sisteminde tanımlı yüksek güvenilirliğe sahip istasyonlar (YAKT, IRKT, KSTU, ARTU, ZWEN, GLSV, GRAZ, WSRT, POTS, WTZR, KOSG, CAGL, NRIL, NVSK, VILL) Avrasya plakasını temsil edecek şekilde temel alınmıştır. Temel alınan noktalar

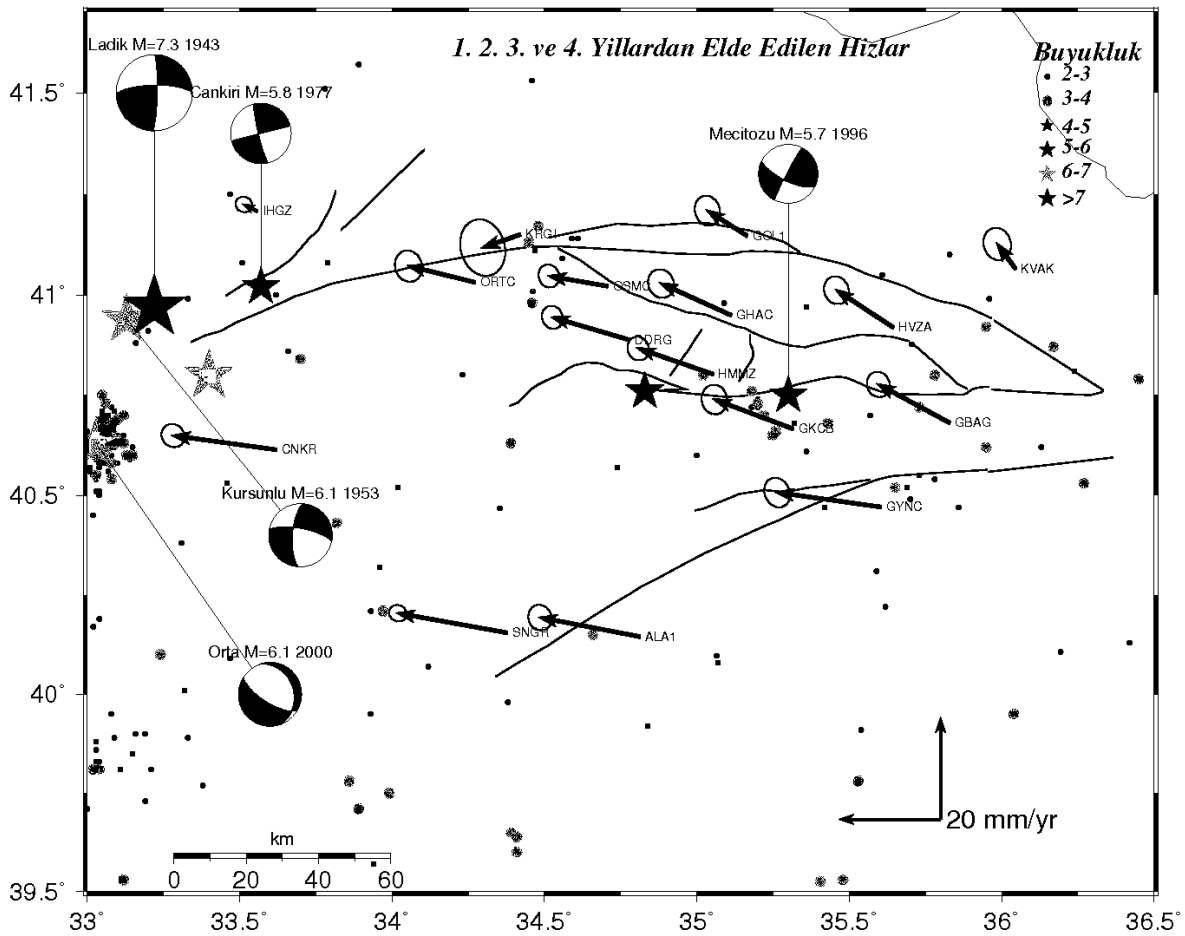
seçilirken, değerlendirme sonucu elde edilen rms (root means square – karesel ortalama hata) ve χ^2 (Chi2) değerleri dikkate alınmıştır. McClusky ve diğerleri (2000), EUREF noktaları denenmiş ve yukarıda verilen 15 nokta ile en iyi sonuca ($\chi^2 = 1.001$ ve rms = 0.5 mm/yıl) ulaşılmıştır. Böylece noktalara ait hız vektörlerinin elde edilmesi mümkün olmuştur (Tablo 2). Bu işlem için GLOBK yazılımı kullanılmıştır (Şekil 2).

InSAR (Yapay açıklıklı radar interferometri)

InSAR, İngilizce Radio detection and ranging (radar), Synthetic Aperture (Yapay Açıklıklı) radar (SAR), ve Interferometric (İnterferometrik) SAR veya SAR Interferometry (İnterferometri) (InSAR) kelimelerinin kısaltmasıdır. InSAR tekniği, radar görüntüsü toplayan uydu veya hava araçları vasıtasıyla elde edilmiş görüntülerin SAM (Sayısal Arazi Modeli), yer yüzeyinin değişiminin incelenmesi ve buzul veya volkanik ha-

rekelerin gözlemlenmesi vb. için görüntülerin birleştirilmesi işlemi olarak tanımlanabilir (Çakır, 2003).

InSAR, iki SAR görüntüsünün her birinde, uygun resim noktalarına ait faz farkının alınması ile hesaplanan faz bilgisine dayalı bir tekniktir. Elde edilen faz farkı görüntü üzerinde gökkuşakına benzer girişim paterni oluşturur. Bu renk halkalarından her birine fringe adı verilir. Rölatif faz farkına bağlı olarak iki görüntüden oluşan Fringelerin girişim (interferans) yaparak oluşturdukları yeni görüntüye interferogram adı verilir. İnterferogramdaki faz değişimi, yeryüzündeki nokta ile görüntü alan platform arasındaki mesafenin değişimini göstermektedir. Bir tam faz halkası (2π radyan), dalga boyunun yarısı ile orantılı olarak (dalga boyunun yarısının katları olarak) mesafedeki değişimi gösterir (Hovanesian, 1980).



Şekil 2. 1., 2., 3. ve 4. yılların ölçülerinden elde edilen hız vektörleri, önemli depremler ve faylar (Hız vektörleri; ITRF2000 sisteminde Avrasya plakasına göre hesaplanmıştır)

Tablo 2. GLOBK hız kestirim özeti

Boylam	Enlem	Doğu hız bileşeni	Kuzey hız bileşeni	Doğu ±	Kuzey ±	İstasyon	Yatay hızlar
<i>Derece</i>		<i>mm/yr</i>		<i>mm/yr</i>			<i>mm/yr</i>
34.272	41.031	-12.96	3.19	1.09	1.26	ORTC	13.35
33.558	41.208	-2.59	1.28	0.66	0.63	IHGZ	2.89
33.620	40.614	-20.14	2.76	0.92	0.94	CNKR	20.33
34.707	41.022	-11.43	1.98	0.83	0.92	OSMC	11.60
34.422	41.150	-7.40	-2.56	1.80	2.26	KRGI	7.83
34.379	40.155	-21.40	3.83	0.70	0.67	SNGR	21.74
34.780	40.888	-15.10	4.43	0.83	0.93	DDRG	15.74
34.814	40.145	-19.54	3.75	0.93	1.03	ALA1	19.90
35.113	40.949	-13.70	6.22	1.04	1.15	GHAC	15.05
35.054	40.802	-14.66	5.05	0.86	0.96	HMMZ	15.51
35.316	40.666	-15.36	5.75	1.02	1.19	GKCB	16.40
35.166	41.146	-7.80	4.97	1.01	1.20	GOL1	9.25
35.830	40.681	-13.95	7.53	0.91	1.02	GBAG	15.85
35.645	40.919	-11.12	7.28	0.99	1.12	HVZA	13.29
35.604	40.471	-20.26	2.84	1.03	1.18	GYNC	20.46
36.046	41.065	-3.59	4.87	1.10	1.29	KVAK	6.05

SAR verisi elde etmek için kullanılan yöntemler iki ana başlıkta incelenebilir, Tek geçiş (Single-pass) ve Tekrarlı geçiş (Repeat-pass). Tek geçiş yönteminde, iki antenin belirli bir baz mesafesi aralıkla takılı olduğu platform bir bölgeyi tarar ve tek kaynaktan yayımlanan sinyal iki anten tarafından kaydedilir. Bu yöntem genellikle uçaklarda kullanılmaktadır. Tekrarlı geçiş yönteminde ise, tek kaynaktan yayımlanan sinyal bir anten ile kayıt edilir. Bu yöntemde aynı bölgeye ait iki görüntü almak için o bölgeden aynı yörünge üzerinde en az iki defa geçmek gereklidir. Bu yöntem ise genellikle uydularda kullanılmaktadır.

InSAR tekniğinde çözünürlük önemli bir terimdir ve iki önemli bileşene sahiptir Azimut (Azimuth) ve Menzil (Range). Aynı zamanda azimut ve menzil isimlendirmeleri yönlendirme için de kullanılmaktadır. Azimut hava aracının uçuş yönünü ve menzilde hava aracından yapılan kayıt için gözlem yönünü ifade etmektedir. Çözünürlük, iki objenin birbirinden fark edilebilecek şekilde kayıt edilebildiği yeryüzündeki en kısa mesafe olarak tanımlanabilir (Çakır, 2003).

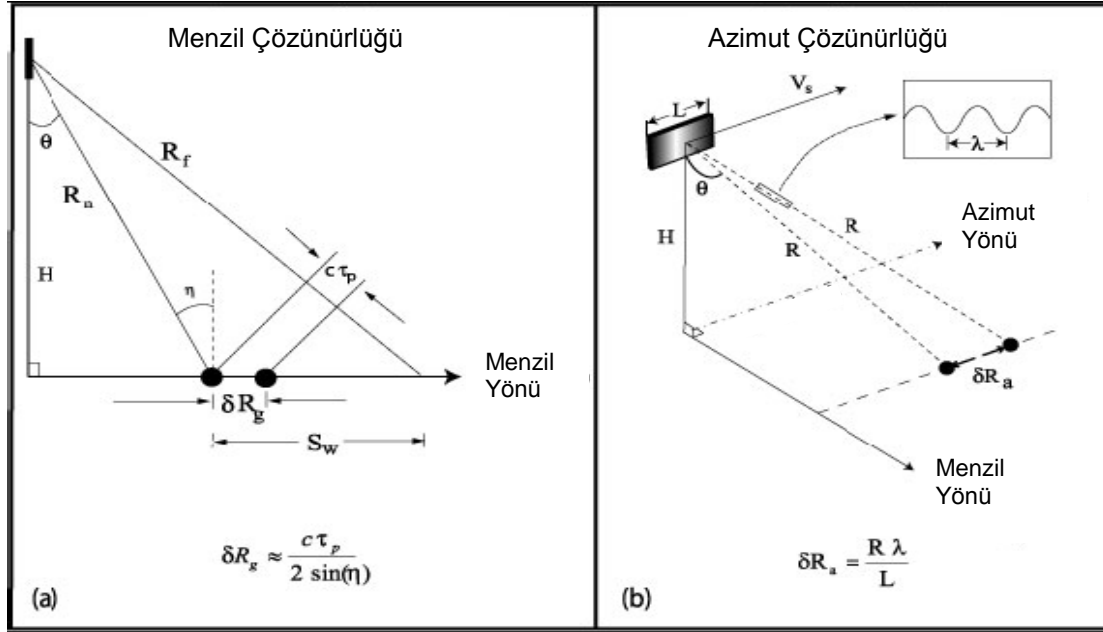
Standart radar sistemi içinde çözünürlük anten özelliğine bağlı olarak değişim gösterir örneğin, anten uzunluğu, gözlem açısı, radar uydusunun

yüksekliği ve radar faz gönderim aralığı gibi. Şekil 3 içinde azimut ve menzil bileşenine ait çözünürlük için bağıntılar verilmiştir.

Şekil 3'te görüldüğü gibi L (anten boyu) çözünürlüğün azimut bileşeni için en önemli parametredir. Anten boyu ne kadar büyük olursa çözünürlük o oranda iyi olacaktır. Buna karşın uzun anten kullanımı pratik bir çözüm değildir. Burada devreye sinyal işleme tekniği girmektedir. Doppler bilgilerinin kullanımı ile anten boyunun simülasyonla (sanal) büyütülmesi sağlanmaktadır (SAR-Yapay açıklıklı radar).

Standart radar uygulamasında Şekil 3'de verilen bağıntıların kullanılması ile menzil bileşeninde yaklaşık 14 km ve azimut bileşeninde 5 km çözünürlüğe ulaşılmaktadır (ERS sistemi için). Aynı görüntüde, Doppler prensibi ile yapay açıklıklı radar uygulaması yapıldığı durumlarda ise 20 m menzil bileşeninde ve 4 m azimut bileşeninde çözünürlüğe ulaşılmaktadır (ERS sistemi için). Çözünürlüğün ikinci bileşeni menzil çözünürlüğüdür. Menzil çözünürlüğü (δR_R) ifadesi için bağıntı aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$\delta R_R = \frac{c}{2B_{BW}} \quad (1)$$



Şekil 3. Yan görüş çözünürlüğü (a) menzil bileşeni için ve (b) azimut bileşeni için (H uydu yüksekliği, R_n yakın mesafe, R_f uzak mesafe, η yansıma açısı, c ışık hızı, τ_p puls zaman aralığı, δR_s yeryüzündeki menzil çözünürlüğünün karşılığı, S_w bimin (gönderilen elektro manyetik sinyal) yeryüzünde karşılık geldiği mesafe, V_s uydunun hızı, θ bakış açısı, λ faz dalga boyu, R mesafe ve δR_a azimut çözünürlüğünün yeryüzündeki karşılığı) (Çakır, 2003)

Burada:

B_{BW} gönderilen radar pulsunun frekans bant genişliği ve c ise ışık hızını ifade etmektedir (Lyons, 2002). 1 eşitliğinde de görüldüğü gibi menzil çözünürlüğü görüntü alımı yapılan platformun yüksekliğinden bağımsızdır ve bant genişliğinin artırılması ile doğru orantılıdır. Gönderilen puls, dalga boyunun şekli değiştirilerek modüle edilmiş frekanstır. Bu değişim chirp olarak adlandırılmaktadır.

Faz değişimi ($\Delta\Phi$) için genel formül;

$$\Delta\Phi = 4\pi(-B\cos\theta/\lambda + h/(2h_a) + e/\lambda + \text{noise}) \quad (2)$$

olarak elde edilir.

Burada: θ bakış açısı, λ dalga boyu, h_a topografik hassasiyet, h gözlenen noktanın yüksekliği, e deformasyon vektörüdür. 2 eşitliği InSAR değerlendirmesinin 4'önemli bileşeninden oluşmaktadır. İlk bileşen, yörüngesel etkileri gösteren ($-B\cos\theta/\lambda$) ifadesidir, İkinci bileşen, topografik etkiyi gösteren ($h/(2h_a)$) ifadesidir, son bileşen ise deformasyon etkisini gösteren (e/λ) ifadesidir.

Bu çalışmada yer yüzeyinin deformasyonu belirlenmeye çalışıldığı için yörüngesel etkinin, bozucu atmosferik ve topografik etkinin interferogramdan kaldırılması gereklidir. Topografik etkiyi kaldırmak için iki görüntüye ek olarak SAM (Sayısal Arazi Modeli) veya üçüncü görüntü kullanılır. Elde edilen interferogram SAM veya deformasyon içermeyen interferogramdan çıkarılarak topografik etki giderilir. Yörüngesel etkiler hassas yörünge bilgileri kullanılarak giderilebilir (ODR dosyası olarak Delft Üniversitesi tarafından yayınlanmaktadır). Atmosferik etkilerin giderilmesi değerlendirmenin en zor aşamasıdır. Her zaman olumlu sonuç vermemektedir.

Bu çalışmaya ait veriler değerlendirilirken iki geçiş yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle ait detaylı bilgi Massonet ve Feigl (1998) yayınında verilmiştir. Bu yöntem ile çalışan ROI_PAC ve DIAPASON yazılımları kullanılarak görüntüler işlenmiştir (Tablo 3).

Görüntüler değerlendirilirken, ilk olarak iki görüntüden birincisi sabit tutularak ikinci görüntü ilk görüntünün sistemine aktarılmıştır. İkinci olarak iki görüntü birbirinden çıkarılmış ve topografik

etkiden arındırılmıştır. Elde edilen fark görüntüsü (interferogram) filtrelenmiş ve faz belirsizlikleri çözülmüştür. Son olarak interferogram yersel koordinat sistemine dönüştürülerek değerlendirme tamamlanmıştır.

Elde edilen sonuçlar atmosferik etkinin giderilemediğini göstermektedir. Bölgesel ölçekte küçük deformasyonlara işaret etse de interferogramların bütününde tektonik aktiviteye bağlı homojen faz değişimleri gözlemlenmemiştir. Görüntülerin PSInSAR vb. tekniklerle yeniden işlenmesi gereklidir.

Tablo 3. Değerlendirilen görüntüler

Sıra no	Tarih	Çerçeve	İz	Uydu
1	920513	2781	164	<u>ers1</u>
2	920826	2781	164	<u>ers1</u>
3	921209	2781	164	<u>ers1</u>
4	930402	0819	300	<u>ers1</u>
5	930611	0819	300	<u>ers1</u>
6	950421	2781	164	<u>ers1</u>
7	950604	0819	300	<u>ers1</u>
8	950805	2781	164	ers2
9	951223	2781	164	ers2
10	970609	0819	300	ers2
11	990501	2781	164	ers2
12	990510	0819	300	ers2
13	990719	0819	300	ers2
14	990926	0819	300	<u>ers1</u>
15	990927	0819	300	ers2
16	991127	2781	164	ers2
17	000415	2781	164	ers2
18	001007	2781	164	ers2
19	920930	2781	164	<u>ers1</u>
20	920617	2781	164	<u>ers1</u>
21	950526	2781	164	<u>ers1</u>

GPS verilerinin modellenmesi

GPS ile elde edilen veriler DEFNODE yazılımı ile modellenmiştir (McCaffrey, 2002). Yazılım ile GPS hız vektörleri, fay geometrisi, blok ve fay sınırları ve sismik kilitlenme derinliği girdi verisi olarak alınmıştır. Fay geometrisinin belirlenmesinde en önemli parametreler fayın sınır-

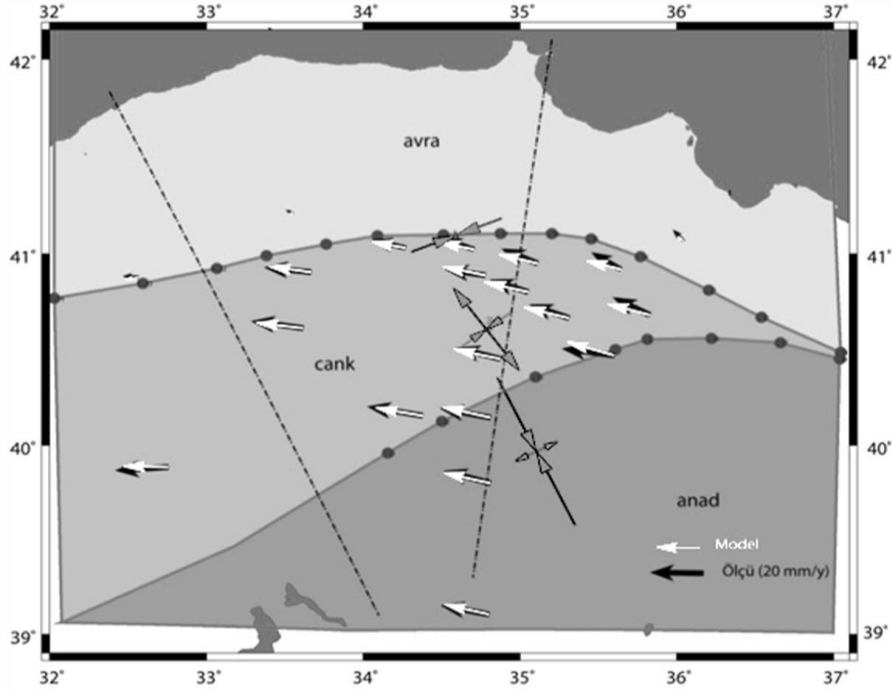
ladığı blokların belirlenmesi ve koordinatları ile kilitlenmenin beklendiği derinliktir. Bu parametrelerin elde edilmesi için daha önce yapılan çalışmalar incelenmiş ve sismolojik ve jeolojik çalışmalar irdelenmiştir. İşseven ve Tüysüz (2006) çalışmasında yayınlanan bölgeye ait fay haritası çalışmaya esas alınmıştır. Sismik derinlik için ise Reilinger ve diğerleri (2006) yayınında önerilen 16 km derinlik, globalcmt web sitesinde yayınlanan sismolojik verilerle karşılaştırılmıştır. Bununla beraber yazılımda tüm diğer parametreler sabit tutularak deprem derinliğinin belirlenmesi için 2 km ile 30 km arasında denemeler yapılmış ve en iyi karesel ortalama hatanın (rms-koh) 16 km derinlik için elde edildiği görülmüştür.

Parametreleri tanımlanan yazılım ile bölgeye ait profiller alınmış ve bu profillerin ışığında sonuçlar üretilmiştir (Şekil 4 ve Şekil 5).

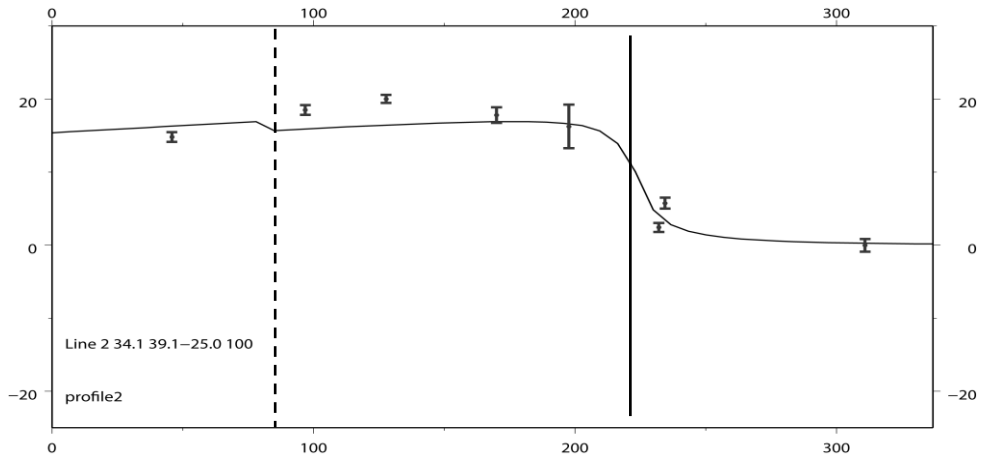
Sonuçlar

Yapılan GPS ölçmelerine maddi destek TUBİTAK-ÇAYDAG projesinden ve İTÜ Araştırma Fonundan ve InSAR çalışmasına maddi destek Fransa'dan Universite Montpellier 2 kurumundan sağlanmıştır. Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar değişik bilimsel toplantılarda sunulmuş ve başarılı bir şekilde proje(ler) sonlandırılmıştır.

Yapılan GPS değerlendirmeleri ve model çalışmaları ışığında, Kuzey Anadolu Fayı (KAF)'nın orta kesiminde elde edilen sonuçlar yapılan önceki çalışmalar ile uyumludur. McClusky ve diğerleri (2000) ve Reilinger ve diğerleri (2006) yayınlarında çalışma bölgesine ait hız bilgisi olarak $\pm 24 \pm 0.2$ mm/yıl değeri verilmektedir (Tablo 4). Bu çalışmada elde edilen değerler ise KAF'ın ana kolu için $\pm 20.5 \pm 1.8$ mm/yıl olarak belirlenmiştir. Adı geçen yayınlarda bölgeye ait hız değerleri az sayıda nokta ile belirlenmiştir. Çalışmaya konu olan ağ benzeri yoğun ve faya yakın ve uzak noktalar tesis edilmemiştir. Bu bağlamda elde edilen değerler arasında bir fark oluşması olasıdır ama bu farkın sayısal olarak birbirine yakınlığı yapılan çalışmaların doğruluğunu ifade etmektedir.



Şekil 4. Üç bloklü model sonucu



Şekil 5. Modelden elde edilen profil
(Düz siyah çizgi KAF ana kolunu, kesikli çizgi Sungurlu fayını göstermektedir)

Tablo 4. Bölgeye ait hız değerleri

Yayın	Hız (mm/yıl)	Yöntem
McClusky vd., 2000	25	Jeodezik
Reilinger vd., 2006	25.2	Jeodezik
Hubert-Ferrari vd., 2002	18	Jeolojik
Hartleb vd., 2003	18	Jeolojik
Kozacı vd., 2007	20.5	Jeolojik

Kozacı ve diğerleri (2007), Hartleb ve diğerleri (2003) ve Hubert-Ferrari ve diğerleri (2002) yaptıkları çalışmada bölgenin jeolojik yaşını belirlemişlerdir. Adı geçen yayınlarda yapılan çalışma bölgeyi içeren çalışma çukurlarından alınan yaşlandırma örneklerine, büyük akarsu ve dere ötelenmelerine ve aynı jeolojik yapıya sahip unsurların tektonik aktivite sonucu yer değiştirme oranlarının belirlenmesine dayanmaktadır. Burada fayın yaşı ile dere ve akarsu yaşla-

rının tutarlı olması gerekmektedir. Bu noktada, yapılan çalışmalarda tartışmalar yapılmış ve büyük akarsular yardımı ile belirlenen ötelenmeler ile dere ve küçük akarsuların taşıdıkları materyallerin yaşlandırılması ile karşılaştırmalar elde edilmiştir. Elde edilen değerler Tablo 4'te verilmektedir. Bu bağlamda da yapılan çalışmanın uzun dönemli jeolojik sonuçlar ile uyum içinde olduğu söylenebilir.

GPS hız vektörleri Sungurlu fayının aktivitesinin beklenenden az olduğunu göstermektedir. Sungurlu fayının kuzeyi ve güneyine kurulan istasyonlar incelendiğinde karşılıklı hız farkı doğudan batıya doğru (GYNC-GBAG ve GYNC-GKCB) $\pm 5\text{mm/yıl}$ 'dan (SNGR-ALA1) $\pm 2\text{mm/y}$ değerine kadar düşmektedir. Bu sonuçlarda göstermektedir ki, fay doğuda Amasya bloğunun açılmasında etkisini sürdürmektedir. Buna karşın Anadolu levhasının içlerine doğru ilerledikçe yavaşlamakta ve sönümlenmektedir.

Bölgedeki gerilme birikiminin büyük oranda ana kol üzerinde olduğu söylenebilir. Ana kolun kuzeyi ve güneyi arasında farklar vardır. Bu nedenle ana kolun yan kollara göre daha aktif olduğu söylenebilir. Ayrıca yapılan profil çalışması da gerilme birikiminin ana kol üzerinde olduğunu göstermiştir (Şekil 5).

InSAR değerlendirmeleri dışında yapılan çalışma bölgenin deprenselliği hakkında sınırlı olan bilgileri çoğaltmakta ve literatüre jeodezik ölçülerle yeni verileri katmaktadır. Bu çalışma ile elde edilen verilerin jeoloji ve jeofizik disiplinlerinde yeniden yorumlanması ve yeni veriler ve yeni yöntemler ışığında tekrar değerlendirilmesi deprem gibi yıkıcı doğa olaylarının önceden tahmininde önemli roller oynayacaktır.

Kaynaklar

Çakır, Z., (2003). Analysis of the crustal deformation caused by the 1999 İzmit and Düzce earthquakes using synthetic aperture radar interferometry, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Hanssen, R.F., (2001). *Radar interferometry data interpretation and error analysis*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

Hartleb, R.D., Dolan, J.F., Akyuz, H. S. ve Yerli, B., (2003). A 2000 year-long paleoseismologic record of earthquakes along the central North Anatolian Fault, from trenches at Alayurt, Turkey, *Seismological Society of America Bulletin*, **93**, 1935-1954.

Hovanessian, S.A., (1980). *Introduction to synthetic array and imaging radar*, Dedham, MA, Artech House, USA.

Hubert-Ferrari, A., Armijo, R., King, G., Meyer, B., ve Barka, A.A., (2002). Morphology, displacement, and slip rates along the North Anatolian Fault, Turkey, *Journal of Geophysical Research*, **107**, 1-32.

İşseven, T. ve Tüysüz, O., (2006). Palaeomagnetically defined rotations of fault-bounded continental blocks in the North Anatolian Shear Zone, North Central Anatolia, *Journal of Earth Sciences*, **28**, 469-479.

King, R.W. ve Bock, Y., (2002). *Documentation for the GAMIT GPS analysis software*, Massachusetts Institute of Technology, ABD.

Kozaci, O., Dolan, J.F., Finkel, R. ve Hartleb, R., (2007). Late holocene slip rate for the North Anatolian Fault, Turkey, from cosmogenic ^{36}Cl geochronology: implications for the constancy of fault loading and strain release rates, *Geology*, **35**, 867-870.

Lyons, S.N., (2002). Investigations of fault creep in Southern California using interferometric synthetic aperture radar and GPS, *Doktora Tezi*, University of California, San Diego, ABD.

Massonnet, D. ve Feigl, K., (1998). Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface, *Reviews of Geophysics*, **36**, 441-500.

McCaffrey, R., (2002). Crustal block rotations and plate coupling, in *Plate Boundary Zones*, S. Stein and J. Freymueller, editors, AGU Geodynamics Series 30, 101-122.

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., Nadriya, M., Ouzounis, A., Paradissis, D., Peter, Y., Prilepin, M., Reilinger, R., Sanli, I., Seeger, H., Tealeb, A., Toksoz, M. N. ve Veis, G., (2000). Global positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the Eastern Mediterranean and Caucasus, *Journal of Geophysical Research*, **105**, 5695-5719.

Reilinger, R.E., McClusky, S.C., Oral, M.B., King, R.W., Toksoz, M.N., Barka, A.A., Kinik, I., Lenk, O. ve Sanli, I., (1997). Global positioning system measurements of present-day crustal movements in the Arabia-Africa-Eurasia plate collision zone, *Journal of Geophysical Research*, **102**, 9983-9999.

Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M.,

Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., Evren, E., Dmitrotsa, A., Filikov, S.V., Gomez, F., Al-Ghazzi, R. ve Karam, G., (2006). GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia, Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions, *Journal of Geophys, Research - Solid Earth*, **111**, B05411, 1-26.