

Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı Güncel Koordinat ve Hızlarının Hesaplanması (Computation of the Actual Coordinates and Velocities of Turkish National Fundamental GPS Network)

Bahadır AKTUĞ, Serdar SEZER, Soner ÖZDEMİR, Onur LENK, Ali KILIÇOĞLU

Harita Genel Komutanlığı, Ankara
bahadır.aktug@hgk.msb.gov.tr

ÖZET

Türkiye ve çevresinde tektonik hareketler nedeniyle oluşan deformasyon ve depremsellik nokta koordinatlarında zamana bağlı değişimler meydana getirmektedir. 1997-1999 yılları arasında yapılan çalışmalarla kurulan, 2000-2001 yıllarında yapılan çalışmalarla güncelleştirilen TUTGA-99A (Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı 1999-A) söz konusu değişimlerden etkilenmektedir. Bu nedenle, TUTGA koordinatlarının güncellenmesi zamana bağlı değişimlerinin belirlenmesi ile olanaklıdır. Bu çalışmada 1992-2009 yılları arası GPS kampanyalarının değerlendirilmesi, kampanya gözlemlerinin birlikte dengelenmesi, depremler nedeniyle oluşan yer değiştirmelerin ele alınması, hız kestirimleri, Türkiye Ulusal Referans Çerçevesinin (TUREF) tanımlanmasına yönelik çalışmalar derlenmiş, elde edilen sonuçlar önceki çözümlerle karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: TUTGA, GPS Kampanyası, Hız Kestirimi, Referans Çerçevesi.

ABSTRACT

The deformation and the seismicity emanated from the tectonic movements throughout Turkey and her vicinity causes time dependent variations on the coordinates of the points. The coordinates of the TNFGN-99A (Turkish National Fundamental GPS Network 1999-A) which was established between 1997 and 1999 and updated between 2000 and 2001 is also subject to those changes. It is possible to update the coordinates of TNFGN-99A (Turkish National Fundamental GPS Network 1999-A) only by determining the time dependent variations of the coordinates. In this study, studies devoted to procession of GPS campaigns between 1992 and 2009, adjustment of campaigns together, handling of seismic variations, velocity estimations, determination of Turkish National Reference Frame (TNRF) are compiled and the results are discussed by comparing with the former results.

Key Words: TNFGN, GPS Campaign, Velocity Estimation, Reference Frame.

tektonik plaka hareketleri ve depremler sonucu oluşan konum değişikliği nedenleriyle güncel jeodezik gereksinimleri büyük ölçüde karşılayamayan Türkiye Ulusal Yatay Kontrol Ağı yerine kullanılmak amacıyla; Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı-1999 (TUTGA-99), 1997-1999 yılları arasında yapılan çalışmalarla kurulmuştur. Ancak, 1999-2000 yıllarında meydana gelen büyük ölçekli depremler, deprem bölgesinde yer alan TUTGA-99 nokta konumlarında önemli değişikliklere neden olmuştur. Özellikle bu depremlerin etkilerini belirlemek amacıyla 2000 ve 2001 yıllarında GPS gözlemleri ve geometrik nivelman ölçmeleri yapılmış, bu gözlem ve ölçmelerden elde edilen ölçüler dahil edilerek TUTGA-99 güncellenmiş ve Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı-1999A (TUTGA-99A) oluşturulmuştur.

Uluslararası Yersel Referans Koordinat Sistemine dayalı TUTGA-99A (Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı 1999-A) koordinatlarının güncellenmesi ve zamana bağlı değişimlerinin belirlenmesi amacıyla; 1992-2009 yılları arasında gerçekleştirilen GPS kampanyaları değerlendirilmekte ve birleştirilerek Türkiye ve çevresine ait koordinat ve hız alanı hesaplanmaktadır.

Bu çalışmada, Türkiye Ulusal Temel GPS Ağının kampanya çözümlerinin değerlendirilmesi, birleştirilmesi, depremler nedeniyle oluşacak değişimlerin modellenmesi, nokta koordinat ve hızlarının hesaplanması ve yayınlanmasına yönelik çalışmalar açıklanmıştır. 2. bölümde GPS gözlemleri değerlendirme stratejileri açıklanmış, 3. bölümde kampanya ölçülerinin birlikte dengelenmesi açıklanmış, 4. bölümde depremler nedeniyle oluşan değişimler ele alınmış, 5. bölümde Türkiye Ulusal Referans Çerçevesi (TUREF) tanımlanmış, 6. bölümde hız kestirimleri açıklanmış, 7. bölümde güncel çözüm önceki çözümlerle karşılaştırılmış, 8. bölümde çalışmanın sonuçları özetlenmiştir.

1. GİRİŞ

Global Konum Belirleme Sistemi (GPS)'nin üç boyutta konum belirleme olanağını ülke genelinde etkin kullanmak ve ülkemizdeki

2. GPS GÖZLEMLERİNİN ANALİZİ

Gerçekleştirilen tüm GPS kampanya gözlemleri (1992–2009) BERNESE v4.0, v4.2 ve

5.0 yazılımı ile değerlendirilmiştir (Rothacher ve Mervart, 1996). Her GPS kampanyasında gözlem yapılan noktaların koordinatlarını ITRF sisteminde tanımlamak amacıyla, Avrupa ve Asya'da uygun dağılımda 17 IGS (International GPS Service) noktasından, ölçüsü mevcut olanlar hesaplamalara dâhil edilmiştir.

Kampanyaların Bernese yazılımı ile ayrı ayrı değerlendirilmesinde; uydu ve alıcı antenleri faz merkezi değerleri için görelî model dosyaları kullanılmıştır. IGS yörünge bilgilerinin doğruluğu yüksek olduğu için yörünge iyileştirmesi yapılmamıştır. Uydu yörüngeleri ile yer dönme parametreleri değerlendirme süresince sabit ve hatasız alınmıştır. Bazlar seçilirken maksimum ölçü prensibine göre hareket edilmiştir. Taşıyıcı dalga faz belirsizliği bilinmeyenleri (ambiguity parameters) her baz için ayrı ayrı ve QIF (Quasi Ionosphere Free) stratejisi kullanılarak hesaplanmıştır. Bu stratejide L1 ve L2 frekanslarındaki ölçüler kullanılmış, her epok için kullanılan görelî iyonosferik etki parametreleri yine epok epok elimine edilmiştir. Troposferik etki hesabı En Küçük Kareler (EKK) yöntemi ile nokta ve zaman bağımlı olarak yapılmıştır. Bu hesaplamalarda Saastomoniens standart atmosfer modeli kullanılmış ve zenit gecikme bilinmeyenleri her nokta ve her iki saatlik ölçme/gözlem süresi için bir tane hesaplanmıştır. Burada mutlak zenit gecikme değerleri için 1 m ve görelî (ardışık) zenit gecikme değerleri için ise 5 m koşullar tanımlanmıştır. Yapılan günlük serbest koşullu çözümler sonucu elde edilen normal denklemler yine serbest koşullu (± 20 m) birleştirilerek hız hesaplamalarında kullanılmak üzere tüm kampanyaya ait normal denklem sistemi elde edilmiştir (Özdemir, 2009). İşlem adımları sırasında uygulanan kriterler Tablo 1'de verilmektedir.

GPS gözlemleri Tablo 1'de verilen kriterler kullanılarak ayrı ayrı BERNESE yazılımı ile değerlendirilmiş, normal denklemler serbest koşullu olarak SINEX (Software Independent Exchange Format) formatına dönüştürülmüştür.

3. KAMPANYA GÖZLEMLERİNİN BİRLİKTE DENGELENMESİ

Türkiye ve çevresine ait 1992-2009 yılları arasında gerçekleştirilen toplam 84 adet GPS kampanyası çalışmalara dahil edilmiştir. Söz konusu kampanyalar herhangi bir ara birleştirme olmaksızın bağımsız olarak değerlendirmeye alınmıştır. GPS gözlemleri Tablo 1'de verilen

kriterlere göre ayrı ayrı BERNESE 4.0-5.0 yazılımı ile değerlendirilmiş (Hugentobler vd., 2008), toplam 84 kampanyaya ait normal denklemler serbest koşullu olarak önce SINEX'e daha sonra GLOBK v5.06 "h-file" formatına dönüştürülmüştür (King vd., 2006).

Tablo 1. GPS Kampanya gözlemlerinin Bernese 4.0-5.0 yazılımı ile yapılan veri değerlendirmesinde kullanılan model ve kriterler.

Modeller	Değerlendirme Kriterleri
Yörünge	IGS Birleştirilmiş Yörünge (Final) (Sabit)
Yer Dönme Parametreleri	IGS Yer Dönme Parametreleri (Final) (Sabit)
Uydu Saatleri	IGS Uydu Saatleri (Final)
Troposfer	Saastomoinen Modeli 2- saatlik Zenit Gecikme Parametreleri Önsel Standart Sapma :5.00 m (Mutlak); 1.00 m (Görelî)
İyonosfer	Yerel Faz Verisi ile Tek Katmanlı Model
Alıcı Saatleri	Her Epok için Kod Verisi Çözümü
Anten Faz Merkezleri	IGS Faz Merkezi Tanımlamaları
Faz Tamsayı Bilinmeyenleri Çözümü	QIF Algoritması
Ağırlıklandırma Stratejisi	İkili fark Gözlemleri: 1-2 cm Yükseklik Açısından Bağımsız Ağırlıklandırma stratejisi

Hız alanının daha sağlıklı belirlenmesi amacıyla, 1996 yılı ve sonrasına ait kampanya ölçüleri, CODE (Center for Orbit Determination for Europe) haftalık serbest koşullu (loosely-constrained) çözümler ile birleştirilmiştir (Aktuğ, 2004). Bu şekilde kampanya ölçü değerlendirmelerinde kullanılmayan global noktaların da birleştirmeye dahil edilmesi ve çok daha fazla sayıda global nokta ile hız referans sisteminin tanımlanması olanaklı olmuştur (Aktuğ, 2003b).

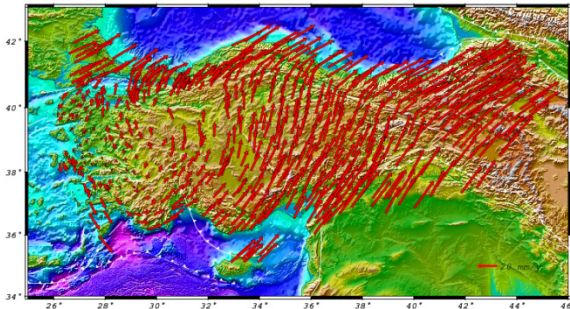
Birleştirme çalışmaları iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada tüm noktalara (± 100 m) öncül standart sapma tanımlanarak gevşek-kısıtlı (loosely-constrained) çözüm Kalman Filtresi tekniği ile elde edilmiştir (Herring, 1990; Herring, 2006).

İkinci aşamada gevşek kısıtlı bu çözüm ile referans koordinat sistemi tanımlanması için seçilen 17 Global noktanın ITRF2005 (2000.0) koordinat ve hızları arasında 12 parametrelî

(3 öteleme, 3 dönme, 3 öteleme hızı, 3dönme hızı) Helmert dönüşümü uygulanmıştır. ITRF 2005 koordinat ve hız alanı (Altamimi vd., 2007)'den elde edilmiştir. ITRF-2005'in gerçekleştirilmesinde kullanılan 17 noktanın 1992-2009 yılları arasında donanım, yazılım, yer değişikliği vb. nedenlere bağlı olarak koordinatlarında meydana gelen değişimler de dikkate alınmıştır. Daha önceki çözümde global istasyonların ITRF-2000 (Altamimi vd., 2002) koordinat ve hızları kullanılarak dönüşüm uygulanmıştır.

Global istasyonlar için farklı epoklarda farklı koordinatların kullanılmış olması ile, global istasyon koordinatlarındaki değişikliklere bağlı olarak oluşabilecek hatalar minimum düzeyde tutulmuştur. Bu şekilde 17 global noktadan yararlanarak, tüm kampanyalardan oluşan gevşek kısıtlı çözüm ITRF2005 koordinat ve hız alanına dönüştürülmüştür. Çözümün dış kontrolünü sağlamak amacıyla, global noktaların ITRF2005 (2000.0) koordinatları çözüm epoğuna getirilmiş ve çözüm ile elde edilen koordinatlarla karşılaştırılmıştır. Her nokta için farklı olmakla birlikte yaklaşık 5 yıllık epok kaydırma işlemine rağmen, elde edilen farklar 1 cm'nin altındadır. Benzer işlem ITRF2005 hızları ile çözümde elde edilen hızlar arasında da yapılmış, ortalama 1 mm/yıl düzeyinde farklar elde edilmiştir. Belirtilen amaçla bütün Türkiye'ye dağılmış tüm GPS noktalarının zaman serileri ve tektonik uyumları dikkate alınarak Türkiye ve çevresindeki GPS noktalarının yüksek duyarlıklı koordinatları ve zamana bağlı doğrusal değişimleri (hız alanı) elde edilmiştir.

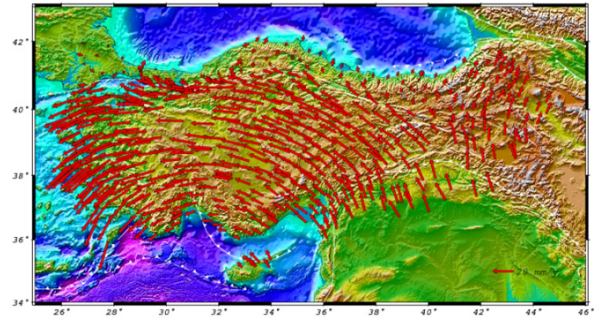
Yapılan analizler sonucunda Türkiye ve çevresindeki deprem öncesi 612, deprem sonrası ise 107 nokta tekrarlılık ve tektonik açıdan uyumlu bulunmuş ve hız alanı bu noktalar ile belirlenmiştir. Türkiye ve çevresinin ITRF2005'de belirlenen hız alanı Şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 1. Türkiye Yatay Hız Alanı.

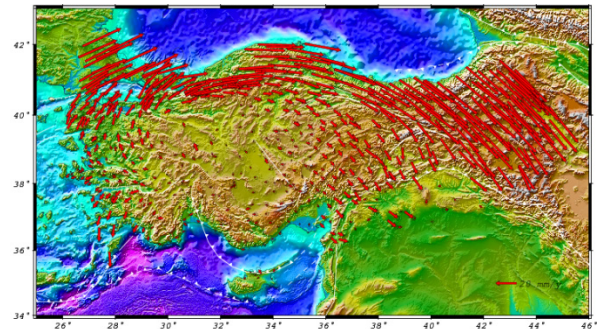
ITRF-2005'de GPS nokta koordinat ve hızlarının belirlenmesinde, koordinatlar ve hızlar için karesel ortalama hata değerleri sırasıyla ± 1.73 mm ve ± 0.61 mm/yıl olarak elde edilmiştir. 17 (kontrol noktası mı, istasyon mu) istasyonun yaklaşık 17 yıllık zaman içerisindeki kesiklikleri ile (17 nasıl 45 oluyor daha net açıklanmalı) 45 istasyon olarak kullanıldığı ve TUTGA'nın coğrafi olarak oldukça geniş bir alanı kapladığı dikkate alındığında elde edilen karesel ortalama değerlerinin çok iyi olduğu değerlendirilmektedir.

Şekil 1'de verilen hız alanı sıfır-net-dönüklüğe göre tanımlıdır (Aktuğ, 2003b). Avrasya-sabit bir sistemde hız alanı tanımlamak için aynı referans noktalarının Avrasya levhasına göre olan artık hızları kullanılmıştır. Bu şekilde elde edilen yatay hız alanı Şekil 2'de gösterilmektedir. Avrasya-Sabit bir sistemde elde edilen yatay hız alanı Anadolu levhasının saatin tersi istikametinde döndüğünü göstermektedir. Söz konusu dönüklük aynı zamanda Orta Anadolu'nun katı blok hareketi içinde bulunduğu şeklinde de yorumlanabilir.



Şekil 2. Avrasya-Sabit Sistemde Yatay Hız Alanı.

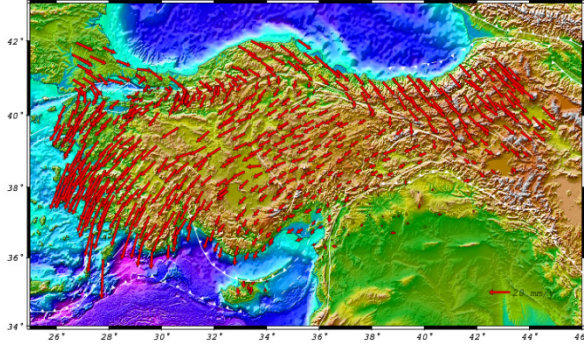
Bu dönüklüğün çıkarılması ile TUTGA noktalarının Anadolu'nun katı blok hareketine göre olan göreceli hareketi elde edilir. Anadolu-Sabit şeklinde ifade edilebilecek bu yatay hız alanı Şekil 3'de gösterilmektedir. Benzer şekilde Doğu Anadolu Fay Sistemi ile ayrılan Arap Levhasının genel dönüklüğüne göre TUTGA noktalarının hareketi de Şekil 4'de gösterilmektedir.



Şekil 3. Anadolu-Sabit Sistemde Yatay Hız Alanı.

4. DEPREMSEL DEĞİŞİMLERİN ELE ALINMASI

Kampanyaların birleştirilmesi sırasında depremler nedeniyle zaman serilerinde oluşan kesiklikler dikkate alınmış ve deprem öncesi ve sonrası noktalar ayrı noktalar olarak değerlendirilmiştir. Birleştirmelerde dikkate alınan, büyüklükleri ve noktalara yakınlıkları nedeniyle yer değiştirme yaratan önemli depremler Tablo 2'de verilmektedir.



Şekil 4. Arap Levhası Sabit Sistemde Yatay Hız Alanı.

1999 yılında Marmara bölgesinde meydana gelen iki büyük deprem ile 1997 yılında Marmara bölgesi ve civarındaki nokta koordinatları birkaç cm'den birkaç metreye varan oranda değişmiştir. Daha sonra Orta Anadolu'nun kuzeyinde meydana gelen Çerkeş Depremi ve yine Batı Anadolu'da meydana gelen Çay Depremi desimetreye varan yer değiştirmeler yaratmıştır.

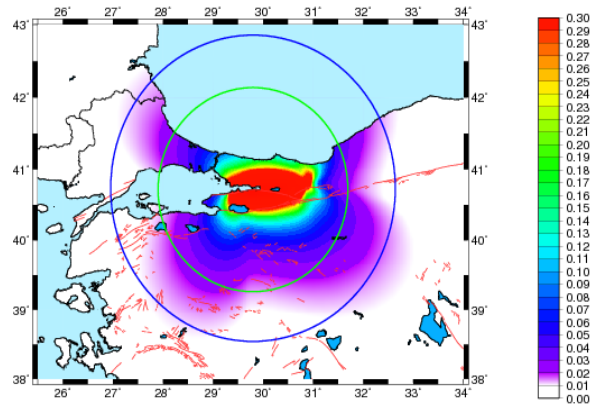
Tablo 2. Birleştirmelerde dikkate alınan depremler.

No	Deprem	Tarih	Büyükölük
1	İzmit	17.08.1999 ; 03:02	Mw7.5
2	Düzce	12.11.1999 ; 18:57	Mw7.2
3	Çerkeş	06.06.2000 ; 05:41	Mw6.1
4	Çay	03.02.2002 ; 11:26	Mw6.6

Söz konusu depremler nokta koordinatlarını değiştirmekle kalmayıp, noktaların zaman serisinde yarattıkları kesiklikler nedeniyle nokta koordinatlarının yıllık değişim miktarlarının hesaplanmasını da zorlaştırmışlardır. Önceki Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı hesaplamalarında (Ayhan vd., 2002; Aktuğ vd., 2005), İzmit Depremi 240 km, Düzce Depremi 200 km, Çerkeş Depremi ise 100 km yarıçaplı bir alanda yer değiştirme meydana getiren depremler olarak modellenmiştir. Depremlerden etkilenen noktaları daha doğru belirlemek ve olanaklı olması durumunda daha küçük etki alanı tanımlayabilmek amacıyla her bir deprem (Aktuğ, 2003a)'da verilen yöntem ve yazılım ile modellenmiştir. İzmit Depremi etki alanı Reilinger

vd., 2000'de verilen düzlem fay modeli ile hesaplanmış olup Şekil 5'de gösterilmektedir.

Kampanya verilerinin birlikte analizinde, depremlerin etki alanları, odak noktasından itibaren bir yarıçap ile tanımlanmaktadır. Söz konusu etki yarıçaplarının belirlenmesinde sismik sonuçlardan yararlanılmakla birlikte, gerçekte depremlerin etkilediği alanın dairesel olmaması nedeniyle deprem etkisi altında olmayan bazı istasyonlar da etki alanındaymiş gibi değerlendirmeye alınmaktadır. Ayrıca, bazı depremler için etki alanının yarıçapı hassas şekilde belirli olmadığı gibi, bazı depremler için etki yarıçapı ile ilgili olarak hiçbir bilgi bulunmamaktadır.



Şekil 5. İzmit Depremi'nin etki alanı.

Daireler 160 ve 240 km'lik etki alanlarını göstermektedir. Yer değiştirme miktarı doğu, kuzey ve yükseklik bileşenlerinden en büyüğü alınarak belirlenmiştir.

Örneğin, yapılan ön incelemede önceki çalışmalarda (Ayhan vd., 2002; Aktuğ vd., 2004) İzmit, Düzce ve Çerkeş Depremleri için sırasıyla tanımlanan 240 km, 200 km ve 100 km lik dairesel etki alanlarının gereğinden fazla olabileceği gözlenmiştir.

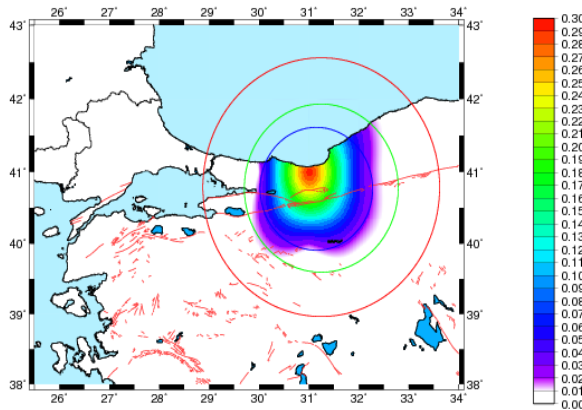
Benzer şekilde önceki çalışmalarda 2002 yılındaki Çay Depremi için odak noktası ve yarıçap dahi tanımlanamamış, bölgedeki noktaların tamamına yakınının depremden etkilendiği kabul edilmiştir. Bu çalışmada, söz konusu depremler ayrı ayrı modellenerek, her bir deprem için tüm noktaları kapsayacak şekilde dairesel etki alanı tanımlamak yerine, daha küçük dairesel alan tanımlama ve ekleme/çıkarma şeklinde depremsel etki alanları kullanılmıştır.

Düzce Depremi için elde edilen etki alanı Ayhan ve diğ., 2001'de verilen model ile hesaplanmış olup, Şekil 6'da grafik olarak

gösterilmektedir. İzmit ve Düzce depremleri nedeniyle oluşan yer değiştirmelerin büyüklüğü birkaç metreyi geçmektedir.

Ancak gerek Şekil 5'de gerek Şekil 6'da deprem etkisinin sınırlarını (en küçük değerlerini) gösterebilmek amacıyla özel bir renk kademesi kullanılmıştır. Bu nedenle ilgili şekillerdeki renk skalasında/yelpazesinde maksimum 30 cm'nin bulunması söz konusu depremlerin etkisinin maksimum 30cm olduğu şeklinde anlaşılmamalıdır.

Depremden etkilenmiş noktaların, ayrı bir nokta olarak değerlendirmeye alındığı düşünüldüğünde ve deprem etkisi altında olmadığı halde etki altındaymış şeklinde ele alınan noktalarda önemli sayıda ölçü kaybı olmakta ve çoğu noktada zaman serisinde yaratılan bu kesiklik nedeniyle nokta hızları belirlenememektedir. Bu nedenle her bir deprem ayrı ayrı modellenmiş ve etki alanları her bir nokta için incelenmiştir. Bu şekilde nokta zaman serilerindeki kesiklikler asgari düzeye getirilerek daha fazla sayıda hızı belirli nokta elde edilmiştir.



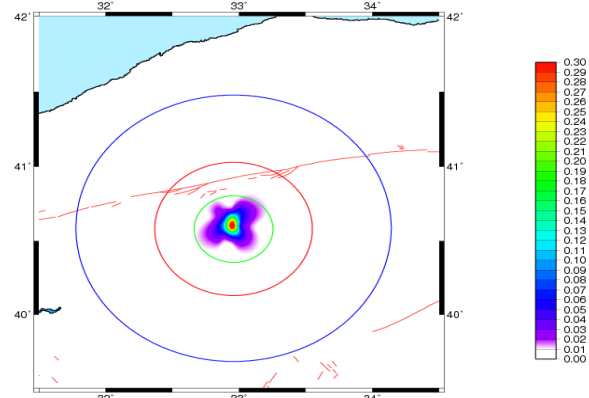
Şekil 6. Düzce Depreminin etki alanı.

Yeşil ve mavi daireler sırasıyla 95, 130 ve 200 km'lik etki alanlarını göstermektedir. Yer değiştirme miktarı doğu, kuzey ve yükseklik bileşenlerinden maksimumu alınarak belirlenmiştir.

Önceki çalışmalar sırasında 2000 yılında meydana gelen Çerkeş depremi ile 2002 yılında meydana gelen Çay depremleri için gerekli modeller mevcut olmadığından söz konusu depremlerin etki alanları da hesaplanamamıştır (Aktuğ, 2003a). Çerkeş depremi ile ilgili olarak (Taymaz vd. 2007) tarafından yapılan çalışma, Çerkeş depreminin daha önce kabul edilen 100 km yerine çok daha küçük bir alanda etkili olduğunu göstermektedir. Etki yarıçapının 25 km'den daha küçük olması itibarıyla Çerkeş

Depremi nedeniyle daha önce koordinatları değiştiği düşünülen noktalardan sadece ikisinin koordinatlarının değiştiği gözlenmiştir. Bu şekilde İç Anadolu Bölgesinin bu kesiminde hızları belirlenemeyen birçok noktanın hızları belirlenebilmiştir. Çerkeş Depreminin etki alanı Şekil 7'de gösterilmiştir.

Benzer şekilde 2002 yılında meydana gelen sismik moment büyüklüğü Mw6.6 olan Çay Depreminin etki alanının tüm bölgeyi kapsamadığı değerlendirilerek, deprem etki alanı için elastik yarı-uzay modelleri odak noktası ve çevresindeki yüzey yer değiştirmeleri hesaplanmıştır.

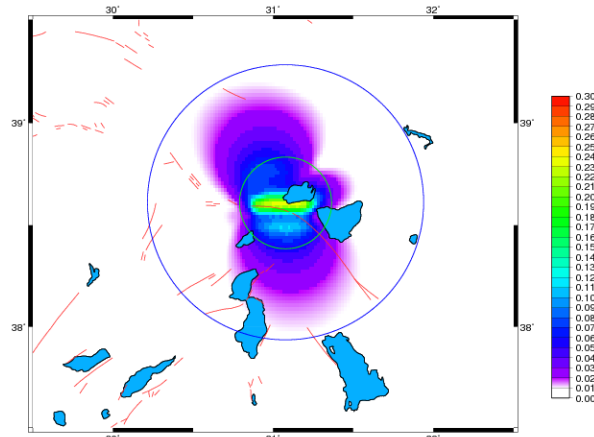


Şekil 7. 2000 Çerkeş Depreminin etki alanı.

Şekil 7'de (Aktuğ, 2003a)'da verilen eşitlikler ve Taymaz vd. 2007'de verilen inSAR çözümündeki fay geometrisi ve kayma değerleri ile hesaplanmıştır. Yer değiştirme miktarı doğu, kuzey ve yükseklik bileşenlerinden karelerinin toplamının karekökü şeklinde hesaplanmıştır. Mavi, kırmızı ve yeşil daireler sırasıyla 100, 50 ve 25 km yarıçaplı etki alanlarını göstermektedir.

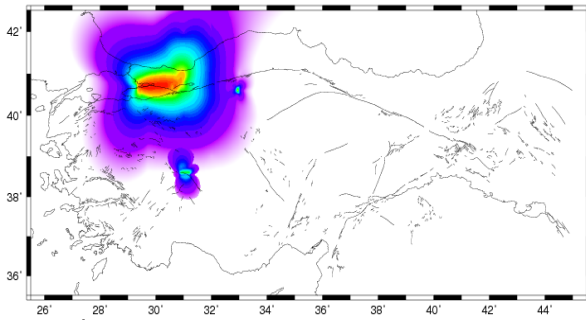
Bu amaçla (Aktuğ vd., 2009b)'de verilen model ile yapılan hesaplamalarda depremi meydana getiren fayın geometrisinden dolayı depremsel etkinin kuzey-güney yönünde maksimum olduğu gözlenmiştir. Çay depremi ve etki alanı Şekil 8'de grafik olarak gösterilmiştir.

İzmit, Düzce, Çerkeş ve Çay depremleri dikkate alındığında özellikle Marmara Bölgesinde depremsel yer değiştirmelerin yer yer 2 metreyi geçtiği gözlenmektedir. Toplam etkiyi göstermek amacıyla tüm depremlerin etkileri birleştirilerek Şekil 9'da grafik olarak sunulmuştur.



Şekil 8. 2002 Çay Depreminin etki alanı.

Şekil 8'de (Aktuğ, 2003a)'de verilen eşitlikler ve (Aktuğ vd. 2009)'da verilen fay geometrisi ve kayma değerleri ile hesaplanmıştır. Yer değiştirme miktarı doğu, kuzey ve yükseklik bileşenlerinden maksimumu alınarak belirlenmiştir. Mavi ve yeşil daireler sırasıyla 25 ve 75 km'lik etki yarıçaplarını göstermektedir.



Şekil 9. İzmit, Düzce, Çerkeş ve Çay Depremlerinin toplam yer değiştirmeleri.

5. TÜRKİYE ULUSAL REFERANS ÇERÇEVESİNİN (TUREF) TANIMLANMASI

Hız alanının daha sağlıklı belirlenmesi amacıyla, 1996 yılı ve sonrasına ait kampanya gözlemleri, CODE (Center for Orbit Determination for Europe) haftalık serbest koşullu (loosely-constrained) çözümler ile birleştirilmiştir (Aktuğ, 2004). Bu şekilde kampanya ölçü değerlendirmelerinde kullanılmayan global noktaların da birleştirmeye dahil edilmesi ve çok daha fazla sayıda global nokta ile hız referans sisteminin tanımlanması olanaklı olmuştur (Aktuğ, 2003b).

Referans koordinat sistemi tanımlamak için gerçekleştirilen dönüşüm modeli 14-parametrelili Helmert dönüşüm modelidir. 14-parametrelili Helmert Dönüşümü,

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D & -R_3 & R_2 \\ R_3 & D & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_2 \\ \dot{Y}_2 \\ \dot{Z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{Y}_1 \\ \dot{Z}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{T}_X \\ \dot{T}_Y \\ \dot{T}_Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{D} & -\dot{R}_3 & \dot{R}_2 \\ \dot{R}_3 & \dot{D} & -\dot{R}_1 \\ -\dot{R}_2 & \dot{R}_1 & \dot{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

şeklinde. TUTGA nokta koordinatları ve bu noktalara ait hızların belirlenmesi amacıyla (1) ve (2) eşitlikleri kullanılarak gevşek-kısıtlı çözümlerde bulunan 17 global noktadan yararlanarak tüm çözüm ITRF2005 koordinat ve hız kümesine dönüştürülmüştür. 1996 yılı öncesi GPS gözlem kampanyalarında global nokta sayısının yetersizliği nedeniyle MATE, GRAZ, ONSA, WETT, ZIMM noktalarından en fazla dördünün kampanya çözümlerinde bulunması ve bu tarihten öncesi için analiz merkezlerinde gevşek-kısıtlı (loose) haftalık çözümlerin olmaması nedeniyle bu kampanyalar için referans sistemi bu noktalara tanımlanmıştır. 1996 yılında tesis edilen Wettzell (WTZR) noktası ile önceki çözümlerde yer alan Wettzell (WETT) noktaları için bağlantı ölçüsü tanımlanarak birleştirme yapılmıştır.

TUTGA-99A (Ayhan vd., 2002), ITRF96'ya dayalı olarak üretilmiş, koordinat ve hız alanı da ITRF96'ya göre tanımlanmıştır. Bu durum, TUTGA-99A'nın, içerdiği kontrol noktaları (ITRF-96 koordinat ve hızları bilinen) sayısı ve bunların coğrafi dağılımları oranında ITRF96 ile hesap epeğünde çakışık olduğu şeklinde ifade edilebilir. Ancak, ITRF96 ile daha sonra üretilen ITRF2000 ve ITRF2005 arasındaki öteleme, dönüklük ve ölçek ilişkileri sabit olmayıp, zamana bağlı parametreler şeklindedir. Bu nedenle gelecekte daha güncel bir ITRS gerçekleşimi ile yapılacak çözümlerin aynı referans sisteminde ifade edilmesi için ITRS gerçekleştirmeleriyle ilişkisi global olarak belirli 4 boyutlu bir referans sistemi tanımlamak ihtiyacı duyulmuştur (Aktuğ, 2005). Bu anlamda TUTGA-99A, ITRF-96'a dayalı olarak tanımlanmış olsa bile ITRS sürümleriyle ilişkisi global olarak belirli değildir. Örneğin, TUTGA-99A ile ITRF2000 ya da ITRF-2005 arasındaki ilişki 4 boyutlu olarak mevcut değildir.

Türkiye Ulusal Datumu olarak işlev görebilecek, dört boyutlu, global referans sistemleri ile ilişkileri yüksek duyarlılıkla belirli, ITRS'in gelecek sürümlerinden bağımsız ve tek anlamlı olabilecek bir referans çerçevesi ihtiyacını karşılamak amacıyla Türkiye Ulusal

Referans Çerçevesi (TUREF) tanımlanmıştır (Aktuğ, 2005). TUTGA-99A'nın Bakü-Tiflis-Ceyhan Petrol Boru Hattı, tüm doğal gaz şebekeleri, Türkiye kadastro sunun ~%25'i gibi büyük projelere altlık oluşturduğu dikkate alındında, yeni tanımlanacak bir referans çerçevesinin TUTGA-99A ile dolayısıyla ITRF-96 ile çakışık bir referans sistemi olması gerektiği değerlendirilmiştir. Diğer yandan Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgilerini Üretim Yönetmeliği (BÖHHBÜY) kapsamında sıklaştırılan yeni ağ noktalarının, diğer sayısal ve basılı ürünlerin tek anlamlı bir şekilde ilgili idarelerce teslim alınabilmesi, arşivlenebilmesi ve yeniden kullanılabilmesi amacıyla referans epoğu kavramının referans çerçevesi ile birlikte ele alınması da zorunlu hale gelmiştir. Bu kapsamda tanımlanan TUREF, ITRF-96 ile uyumlu ve koordinatlarının 2005.0 epoğunda tanımlandığı bir referans çerçevesidir. Diğer bir deyişle TUREF, ITRF-96 ile 2005.0 epoğunda çakışık bir referans çerçevesidir.

Referans çerçevesinin 2005.0 epoğunda tanımlanmasının en önemli nedeni 1999 Marmara Depremleri sonrasında birçok noktanın (sıklaştırma) tekrar ölçülemediği olmasıdır. Benzer şekilde referans epoğunun deprem öncesi bir epok (1998.0 gibi) olarak tanımlanması, ölçülecek tüm noktalarda deprem etkisinin söz konusu noktalarda yeniden hesaplanmasını gerektirmektedir. Ancak, tüm modelleme ve periyodik ölçüm çabalarına rağmen Marmara Depremlerinin etkisini her yerde yüksek duyarlılıkla belirlemek olanaklı değildir. Bu anlamda, referans epoğunun deprem öncesi bir epok seçilmesi özellikle Marmara bölgesinde distorsiyonların oluşmasına neden olacaktır. Diğer bir bakış ise, bir deprem ülkesi olan Türkiye'de yeni depremlerin olacağı ve her durumda bunların ağ üzerinde bozucu etkiler yaratacağıdır. Marmara depremleri ülkemizde güncel 4D jeodezik altyapı çalışmaları tamamlanmadan önce meydana gelmiştir. Örneğin deprem meydana geldiğinde noktaların %90'ından fazlasının hızları belirsizdir. Gelecekte yeni depremler meydana gelse de, mevcut TUTGA/TUSAGA altyapısı ile söz konusu depremlerin etkisi belirlenebilecek ve gerekli düzeltmelerin yapılabilmesi olanaklı olacaktır.

Diğer yandan, ITRS'in en güncel sürümü en fazla sayıda nokta ve ölçü içerdiğinden IGS noktalarının koordinat ve hız bilgileri en yüksek duyarlılıkları olarak en güncel sürümde bulunacaktır. Günümüzde en güncel ITRF sürümü ITRF-2005 olup, tüm çözüm ITRF-2005'e dayalı olarak gerçekleştirilmiş daha sonra TUREF'e

dönüştürülmüştür. TUREF'e dönüştürmek amacıyla ITRF-2005 ile ITRF-96 arasındaki 14 dönüşüm parametresine ihtiyaç vardır. IGN (2009) tarafından ITRF2000'den daha önceki referans çerçevelerine olan dönüşüm parametreleri yayınlanmıştır. Benzer şekilde Altamimi ve diğ. 2007 tarafından ITRF-2005 ile ITRF-2000 arasındaki dönüşüm parametreleri yayınlanmıştır. ITRF-2005 ile ITRF-1996 arasındaki dönüşüm parametreleri ise (Aktuğ, 2009)'da verilen yöntem ile hesaplanmış ve (Aktuğ, 2008b)'de verilmiştir. ITRF-2005 ile ITRF-96 arasındaki dönüşüm parametrelerinin bulunmasından sonra ITRF2005 çözümünden TUREF koordinat ve hızlarının elde edilmesi aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmiştir:

1. Öncelikle ITRF2005'de elde edilen koordinatlar, yine bu sürüme ait hız alanı kullanılarak t epoğundan 2005.0 epoğuna getirilmiştir.

$$X_{05}^{ITRF}(2005.0) = X_{05}^{ITRF}(t) + \dot{X}_{05}^{ITRF} \cdot (2005.0 - t) \quad (3)$$

2. Daha sonra 2005.0 epoğunda ITRF2005 ile ITRF96 arasında 14-parametrelili dönüşüm yapılmıştır. Dönüşüm parametreleri (Aktuğ, 2008b)'den alınmıştır. Buna göre genel dönüşüm eşitliği,

$$\begin{bmatrix} X^{TUREF} \\ Y^{TUREF} \\ Z^{TUREF} \end{bmatrix}_{(2005.0)} = \begin{bmatrix} X_{05}^{ITRF} \\ Y_{05}^{ITRF} \\ Z_{05}^{ITRF} \end{bmatrix}_{(2005.0)} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}_{(2005.0)} + \begin{bmatrix} D & -R_3 & R_2 \\ R_3 & D & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & D \end{bmatrix}_{(2005.0)} \begin{bmatrix} X_{05}^{ITRF} \\ Y_{05}^{ITRF} \\ Z_{05}^{ITRF} \end{bmatrix}_{(2005.0)} \quad (4)$$

şeklinde oluşturulmuştur. (4) eşitliğindeki dönüşüm parametreleri (5), (6) ve (7) eşitliklerinden yararlanarak elde edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}_{(2005.0)} = \begin{bmatrix} T_{ITRF05,ITRF96} \\ T_{ITRF05,ITRF96} \\ T_{ITRF05,ITRF96} \end{bmatrix}_{(t_0)} + \begin{bmatrix} \dot{T}_{ITRF05,ITRF96} \\ \dot{T}_{ITRF05,ITRF96} \\ \dot{T}_{ITRF05,ITRF96} \end{bmatrix} (2005.0 - t_0) \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{bmatrix}_{(2005.0)} = \begin{bmatrix} R_{ITRF05,ITRF96} \\ R_{ITRF05,ITRF96} \\ R_{ITRF05,ITRF96} \end{bmatrix}_{(t_0)} + \begin{bmatrix} \dot{R}_{ITRF05,ITRF96} \\ \dot{R}_{ITRF05,ITRF96} \\ \dot{R}_{ITRF05,ITRF96} \end{bmatrix} (2005.0 - t_0) \quad (6)$$

$$D(2005.0) = D_{ITRF05,ITRF96}(t_0) + \dot{D}(2005.0 - t_0) \quad (7)$$

Burada,

X^{TUREF} : TUREF koordinatları

X_{05}^{ITRF} : ITRF2005 sisteminde 2005.0 epoğundaki koordinatlar,

t_0 : Dönüşüm parametrelerinin hesaplandığı epoğu ifade etmektedir.

6. HIZ KESTİRİMLERİ

Türkiye ve çevresinde toplam 1547 nokta analiz edilmiş olup, bu noktaların 723 adedi tek epoklu, 824 adedi ise iki veya daha fazla epokta gözleme sahiptir. Söz konusu noktaların epoklara göre dağılımı Tablo 3'de verilmiştir.

Tektonik olarak uyumsuz olması ya da epok sayısının yeterli olmamasından dolayı hızları iyi belirlenemeyen istasyonların tespit edilmesi amacıyla öncelikle hız bileşenleri ayrı ayrı gridlenmiş ve daha sonra çapraz-doğrulama (cross-validation) tekniği ile artık değerler (residual-misclosure) elde edilmiştir. Gridleme algoritmasının seçiminde yine çapraz-doğrulama tekniğinden yararlanılmış ve En Küçük Eğrilik (Minimum Curvature), Kriging ve Inverse Distance (Uzaklık Ters) algoritmaları arasında Kriging algoritmasının en küçük artık değerler verdiği tespit edilmiştir.

Kriging yönteminde fay hatlarını girdi olarak verme olanağı olmasına rağmen, fay hatları dikkate alınmadan uygulama yapılmıştır. Bunun en önemli nedeni, nokta hızlarında farklılık yaratabilecek fay sınırlarının tam olarak bilinmesinin olanaklı olmamasıdır. Özellikle TUTGA'nın oluşturulmasında noktaların homojen dağılımı göz önünde bulundurulduğundan, her noktanın etki altında bulunduğu tektonik sınırların 30-50 km aralıklı kontrol noktaları ile tespiti oldukça güçtür.

Tablo 3 Gözlemlerin epok sayılarına göre dağılımı.

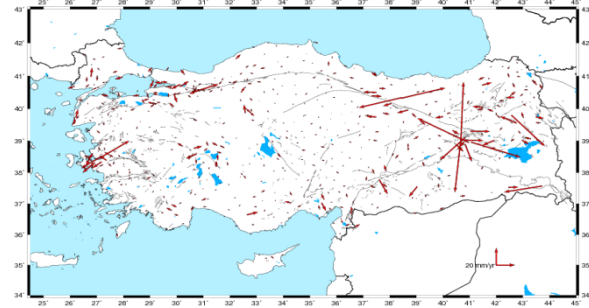
DEPREM ÖNCESİ			
EPOK	TUTGA	DİĞER	TOPLAM
Tek Epok	154	495	649
2 Epok	197	94	291
3 Epok	100	58	158
4 Epok	54	50	104
5 Epok	41	5	46
> 5 Epok	48	39	87
TOPLAM	594	741	1335

DEPREM SONRASI			
EPOK	TUTGA	DİĞER	TOPLAM
Tek Epok	5	69	74
2 Epok	12	20	32
3 Epok	12	10	22
4 Epok	1	7	8
5 Epok	2	14	16
> 5 Epok	27	33	60
TOPLAM	59	153	212

Bu nedenlerle fay sınırları tanımlanmasından vazgeçilmiş, bunun yerine komşu kontrol noktalarının davranış farklılığı hakkında yeterli sonuçlar veren çapraz-doğrulama tekniğinin ölçüt olarak alınmasına karar verilmiştir. Hızları hesaplanan noktalardan, farklı nedenlerden dolayı hızları uyumsuz olan kontrol noktaları çapraz-doğrulama tekniği ile belirlenmiştir. Hızları çevrelerine göre problemlili kontrol noktaları istasyonlar iki grupta ele alınabilir:

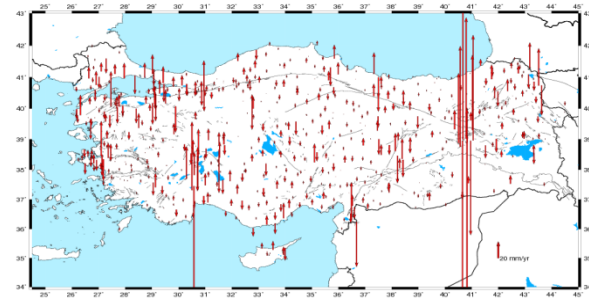
(a) Epok sayısı ya da ölçülerin düşük duyarlılığı nedeniyle hızları çevresine göre uyumsuz kontrol noktaları (hızları duyarlı belirlenemeyen kontrol noktaları).

(b) Hızları iyi belirlenmekle birlikte, kontrol noktasının yer seçimi ya da maruz kaldığı farklı etkiler nedeniyle tektonik anlamda uyumsuz kontrol noktaları (hızları duyarlı olanlar).



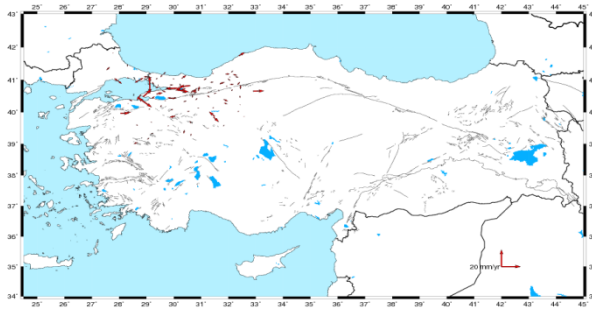
Şekil 10. Çapraz-doğrulama ile elde edilen deprem öncesi artık yatay hızlar.

İstasyonlar deprem öncesi ve sonrası olarak iki grup halinde incelenmiş, çevresine göre uyumsuz hızı bulunan istasyonlar çapraz-doğrulama tekniği ile belirlenmiştir. Deprem öncesi hızların analizi ile elde edilen çapraz-doğrulama sonuçları sırasıyla yatay ve düşey hızlar için Şekil 10 ve Şekil 11'de verilmektedir. Benzer işlem, deprem sonrası hızlar için de gerçekleştirilmiş olup, çapraz-doğrulama ile elde edilen deprem sonrası yatay ve düşey hızlar sırasıyla Şekil 12 ve Şekil 13'de gösterilmiştir.



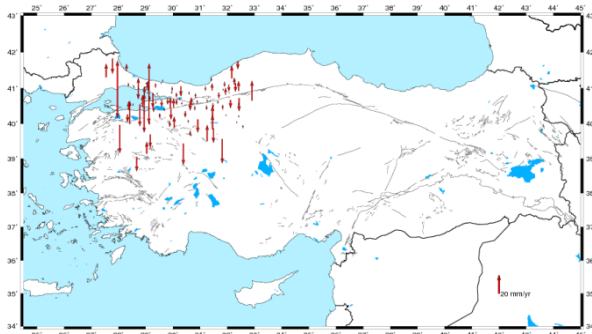
Şekil 11. Çapraz-doğrulama ile elde edilen deprem öncesi artık düşey hızlar.

Kriging yöntemi kullanılarak, V_N , V_E ve V_U bileşenleri 25° - 45° boylamları ve 34° - 43° enlemleri arasında kalan bölgede, $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ derece aralıklı grid köşelerinde hız bileşenleri hesaplanmış ve ayrı dosyalarda düzenlenmiştir. Daha sonra da ITRF2005 sisteminde kullanılarak V_N , V_E ve V_U hız bileşenleri grid veriden yararlanarak kestirilmiştir. Elde edilen kestirim hız değerlerinin hataları, çapraz-doğrulama sonuçlarından benzer şekilde kestirimle bulunmuştur. Çapraz-doğrulama tekniğinin doğası gereği, noktanın kendisinin çıkarılması sebebiyle özellikle tektonik olarak farklılık gösteren noktalarda ya da yeterli veri bulunmayan bölgelerde elde edilen hata değerlerinin büyük olduğu görülebilir. Ancak bu durum kötümser hata değerleri yerine, tektonik olarak uyumsuz ve/veya yetersiz veri bulunan bölgelerdeki hız kestirim değerleri için tolerans/güvenirlilik ölçütü olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 12. Çapraz-doğrulama ile elde edilen deprem sonrası artık (residual) yatay hızlar.

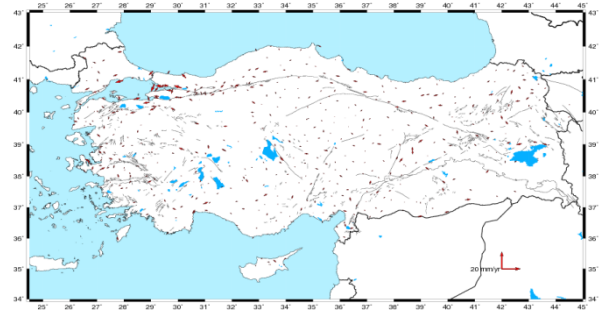
Kontrol noktaları arası mesafelerin minimum ~30 km olduğu dikkate alınarak, yapay sonuçlar elde edilmesini önlemek amacıyla gridleme aralığı ~15 km olarak seçilmiştir. Enlem ve boylam yönünde 15 km 0.16° ve 0.13° olduğundan, gridleme $0.15^{\circ} \times 0.15^{\circ}$ aralıklarla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 13. Çapraz-doğrulama ile elde edilen deprem sonrası artık düşey hızlar.

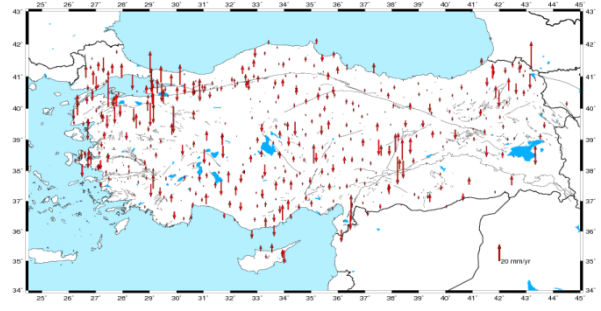
Gridleme alanı deprem öncesi hızlar için sırasıyla 25° - 46° ve 35° - 43° boylam ve enlemleri arasındaki bölge olarak seçilmiştir. Deprem sonrası için ise, 39° - 42° ve 27° - 33° enlem ve boylamları alınmıştır.

Hızları zaman serisi ve tektonik olarak uyumlu noktalar deprem öncesi ve sonrası için ayrı ayrı kullanılarak, TUTGA ve diğer çalışmalar için tesis edilmiş hızları problemli veya tek epoklu noktaların hızları interpolasyon ile kestirilmiştir. Hız kestirimleri deprem öncesi ve sonrası şeklinde iki ayrı grup şeklinde değerlendirilmiştir. Kestirim işlemi yatay ve düşey bileşenler için ayrı ayrı yapılmış olup, hız bileşenleri dikkate alınmıştır. Hızları uyumlu noktalar için elde edilen çapraz doğrulama sonuçları Şekil 14, 15, 16 ve 17'de gösterilmiştir.



Şekil 14. Hızları uyumlu noktaların çapraz-doğrulama ile elde edilen deprem öncesi artık yatay hızları.

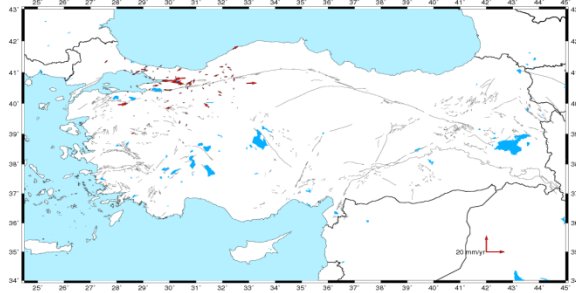
Hızları uyumsuz olan noktalar iki şekilde ele alınmıştır. Öncelikle hızlarının uyumsuz olmasının nedeni yetersiz sayıda ve süredeki ölçüleri olan noktaların hızları bilinmiyor kabul edilmiştir. Diğer yandan ölçüleri bakımından yeterli ancak çevresine göre uyumsuz olan noktaların hızları biliniyor kabul edilmekle birlikte tek epoklu noktalar hız kestiriminde kullanılmamışlardır.



Şekil 15. Hızları uyumlu noktaların çapraz-doğrulama ile elde edilen deprem öncesi artık düşey hızları.

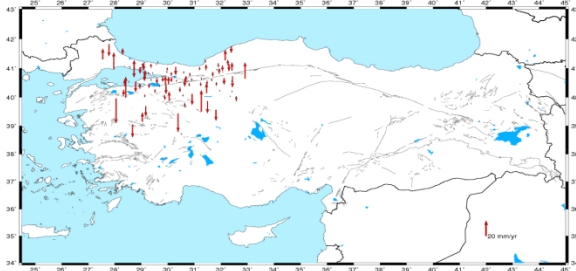
Hızları çevresine göre uyumsuz olan noktalardan dört ve daha fazla epoklu olanlar ile iki ve üç epoklu noktalardan ölçü aralığı 4 yıldan fazla olanların hızları hesaplananlar olduğu kabul

edilmiştir. Diğer bir ifade ile bu noktaların hızlarındaki problemler, hızların iyi belirlenememesi yerine, söz konusu noktaların bulundukları zemin vb. koşullara bağlı olarak farklı olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 16. Hızları uyumlu noktaların çapraz-doğrulama ile elde edilen deprem sonrası artık yatay hızları.

Benzer işlem deprem sonrası hızlar için de uygulanmıştır. Deprem sonrası hızları uyumsuz olan noktaların tümünün yetersiz ölçü süresinden kaynaklandığı görülmektedir.



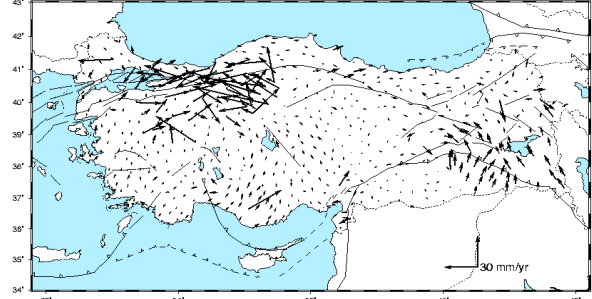
Şekil 17. Hızları uyumlu noktaların çapraz-doğrulama ile elde edilen deprem sonrası artık düşey hızları.

İzmit ve Düzce depremlerinden sonra hızların değişmiş olduğu gözlenmiştir. Postsismik deformasyonun kosismik deformasyonun yaklaşık 1/10'u olduğu dikkate alındığında, Çerkeş Depremi ile Çay Depremi için post-sismik deformasyon bulunmadığı değerlendirilmiştir. Buna göre, Çerkeş ve Çay depremlerinin etki alanında kalmakla birlikte deprem öncesi veya sonrasında hızları bulunmayan noktalarda deprem öncesi ve sonrası hızlar aynı kabul edilmiştir.

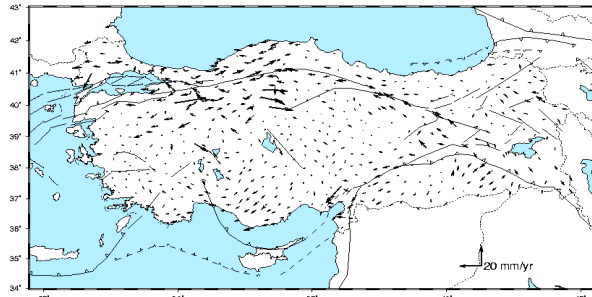
7. ÖNCEKİ ÇÖZÜMLERLE FARKLAR

Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı (TUTGA)'nın 1997-1999 yılları arasında tamamlanmasından sonra ilk defa 2002 yılında TUTGA-99A koordinat ve hızları ITRF-96'ya dayalı olarak yayınlanmıştır (Ayhan vd., 2002). 2004 yılında (Aktuğ vd., 2005) tarafından yayınlanan koordinat ve hızlar ise ITRF-2000'de hesaplanmakla birlikte

ITRF-96'ya dönüştürülerek yayınlanmıştır. Her iki koordinat ve hız kümesi (Aktuğ vd., 2005)'da karşılaştırılmıştır. Söz konusu karşılaştırmada elde edilen koordinat ve hız farkları sırasıyla Şekil 18 ve Şekil 19'da gösterilmektedir.



Şekil 18. TUTGA99A TUREF2000 koordinat farkları (Aktuğ vd., 2005).



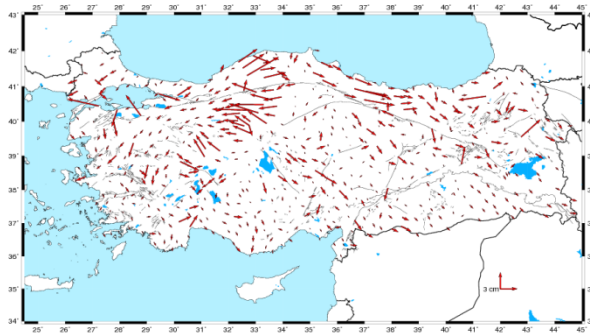
Şekil 19. TUTGA99A TUREF2000 hız farkları (Aktuğ vd., 2005).

İki çözüm arasındaki farklar için;

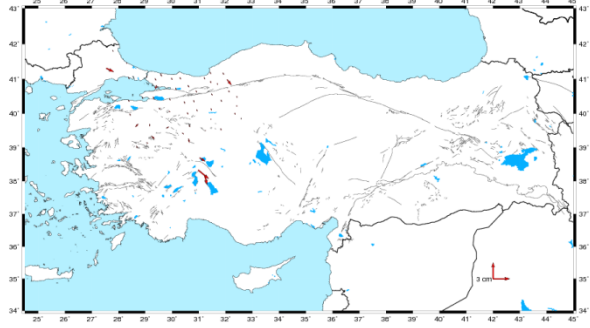
- TUTGA-99A'nın hız kümesinin, özellikle Doğu ve Güney Doğu Anadolu bölgesinde yoğunlukla kestirimle elde edildiği ve o dönemde bölgede hızı bilinen nokta kümesinin azlığı nedeniyle hız kestirimlerinin geçmişteki değişimleri yeterince temsil edemediği,
- TUTGA-99A'nın Doğu ve Güney Doğu Anadolu bölgelerindeki koordinat çözümlerinin tek epoklu olması nedeniyle kontrolsüz olduğu,
- Marmara ve Orta/Çankırı Depremleri sonrasında çok kısa zaman aralığında deprem sonrası hızları belirlenen noktaların yeni çözümle hızlarının daha iyi belirlendiği ve bu hızların deprem öncesi hızlardan farklı olduğu (post-sismik etki nedeniyle) ve epok kaydırmaları sonucunda koordinatlarda da benzer farklılıkların oluştuğu,
- Afyon ve çevresinde 2000 ve 2002 yıllarında meydana gelen depremlerin koordinat çözümlerinde dikkate alınması gerektiği,

- Koordinat farklılıklarının olduğu kesimlerde aynı zamanda hızlarda da farklılıkların olması nedeniyle söz konusu koordinat farklılıklarının hızların iyi belirlenememesinden kaynaklandığı değerlendirilmeleri yapılmıştır (Aktuğ vd., 2005).

ITRF-2005'e dayalı olarak gerçekleştirilen yeni çözüm ile önceki çözüm arasındaki koordinat farkları ise Şekil 20'de gösterilmiştir. Özellikle Doğu Anadolu bölgesinde koordinat farklarının azaldığı gözlenmektedir. Benzer şekilde deprem sonrası nokta koordinatları karşılaştırıldığında (Şekil 21) koordinat farklarının mm düzeyinde olduğu görülmektedir.

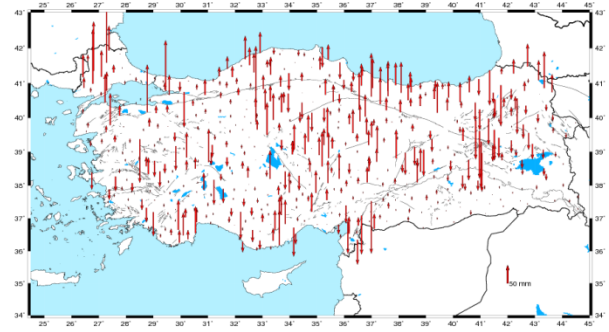


Şekil 20. 2005 yılında yapılan çözüm ile yeni çözümün deprem öncesi yatay koordinat farkları.

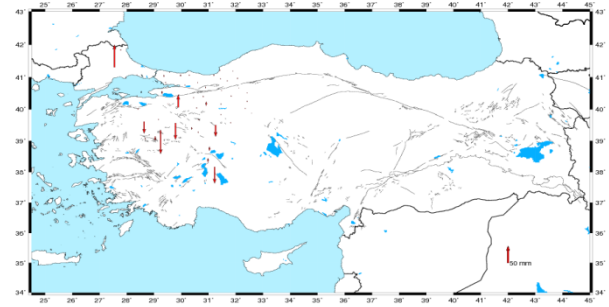


Şekil 21. 2005 yılında yapılan çözüm ile yeni çözüm arasında, deprem sonrası yatay koordinat farkları.

Yükseklik bileşeninin yatay bileşene göre daha düşük korelasyona sahip olması nedeniyle hızların kestirimindeki duyarlık yatay bileşenlere göre daha düşüktür. Ayrıca, yükseklik bileşeninin GPS tekniğinden kaynaklanan geometrik nedenlerle yatay bileşenlere göre daha düşük duyarlıkla belirlendiği dikkate alındığında her iki çözüm arasında bazı noktalarda yükseklik bileşenindeki farklar 5 cm'ye ulaşmaktadır. Yükseklik bileşenindeki farklar deprem öncesi ve sonrası için Şekil 22 ve Şekil 23'de gösterilmektedir.



Şekil 22. 2005 yılında yapılan çözüm ile yeni çözüm arasında deprem öncesi düşey koordinat farkları.



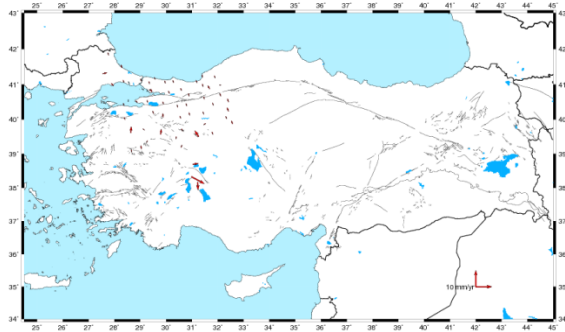
Şekil 23. 2005 yılında yapılan çözüm ile yeni çözüm arasında deprem sonrası düşey koordinat farkları.

Koordinatlar dışında iki çözümde hızlar arasındaki farklar incelendiğinde hız farklarının Orta Anadolu'nun kuzeybatısı dışında 1-3 mm/yıl civarında olduğu gözlenmektedir.



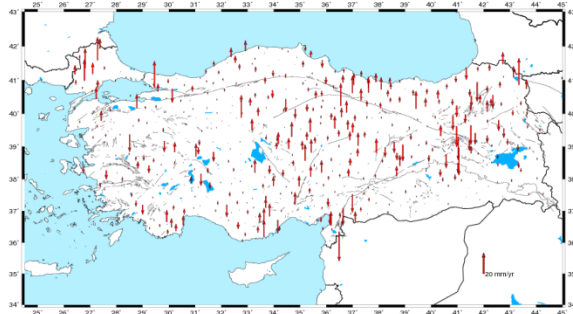
Şekil 24. 2005 yılında yapılan ile yeni çözümün deprem öncesi yatay hız farkları.

Çerkeş Depreminin etki alanının 100 km olarak tanımlanması ve bu nedenle önceki çözümde bu bölgedeki birçok noktanın hızlarının ancak kestirimle belirlenmesi nedeniyle hızlar arasında 1 cm/yıl'a varan farkların meydana geldiği değerlendirilmektedir. Deprem öncesi ve sonrası yatay hızlara ilişkin farklar Şekil 24 ve Şekil 25'de gösterilmektedir.

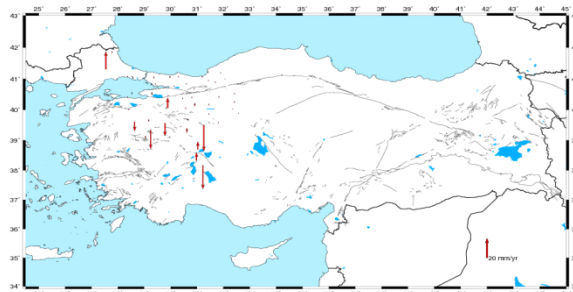


Şekil 25. 2005 yılında yapılan çözüm ile yeni çözüm arasında deprem sonrası yatay hız farkları.

Benzer şekilde deprem öncesi ve sonrası düşey hız farkları da sırasıyla Şekil 26 ve Şekil 27'de verilmektedir.



Şekil 26. 2005 yılında yapılan çözüm ile yeni çözüm arasında deprem öncesi düşey hız farkları.



Şekil 27. 2005 yılında yapılan çözüm ile yeni çözüm arasında, deprem sonrası düşey hız farkları.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

1992 ve 2009 yılları arasında gerçekleştirilen toplam 84 GPS ölçü kampanyası ile koordinat ve hız alanı belirlenmiş, noktaların koordinat, tekrarlılık ve tektonik uyumları araştırılmıştır. Hızları uyumsuz olduğu tespit edilen noktalar ayrı ayrı incelenerek yeniden kestirim yapıp yapılmayacağına karar verilmiştir.

Depremlerle meydana gelen kesiklikleri asgari düzeye indirebilmek amacıyla İzmit,

Düzce, Çerkeş ve Çay depremlerinin etki alanları (Aktuğ, 2003a)'da verilen yöntem ve yazılım ile yeniden hesaplanmıştır. Etki alanları incelendiğinde; Düzce depreminin yaklaşık 100 km yarıçaplı bir alanda etkili olduğu ve bu deprem için daha önce kullanılan 200 km yarıçaplı etki alanının gereğinden fazla noktada kesiklik meydana getirdiği tespit edilmiştir. Benzer şekilde, Çerkeş depreminin daha önce kullanılan 100 km yarıçaplı etki alanı yerine 25 km yarıçaplı bir alanda etkili olduğu bulunmuştur. 2002 yılında meydana gelen Çay depreminin bölgedeki tüm noktalar yerine kuzey-güney yönünde uzunlamasına bir alanda etkili olduğu gözlenmiştir.

Marmara Depremleri sonrasında, deprem öncesi ölçülmekle birlikte deprem sonrası ölçüsü bulunmayan noktalar bulunmaktadır. Benzer şekilde TUTGA güncelleme çalışmaları kapsamında deprem etkisi altındaki bir alanda tesis edilerek ölçülen ancak deprem öncesine ait koordinatları bulunmayan noktalar da bulunmaktadır. Söz konusu noktaların listesi ilgili bölümlerde verilmiştir. Öncelikli olarak, deprem öncesi ölçüsü bulunup, deprem sonrası ölçüsü bulunmayan TUTGA noktalarının müteakip ölçü planlarına dahil edilmesinin yararlı olacağı değerlendirilmektedir.

Koordinat ve hızların ITRF-2005'e dayalı olarak hesaplanmasından sonra tüm koordinatlar TUREF'e dönüştürülmüştür. Bu amaçla, 14-parametrelili standart Helmert Dönüşümü kullanılmıştır. Elden edilen TUREF koordinatları daha önce (Aktuğ vd., 2005) ile yayınlanan koordinat ve hız kümesi ile karşılaştırılmıştır. Koordinat ve hızların genel olarak uyumlu oldukları gözlenmiştir.

Özellikle iki epoklu ölçüler yardımıyla hesaplanan hızların kontrolsüz olduğu bilinmektedir. Bununla beraber çapraz doğrulama yöntemiyle hesaplanan kestirim değerleri ölçülerle bulunan hızların güvenilirliği konusunda önemli bilgi sağlamaktadır. Bununla beraber epok sayısı yanında ölçü süresi de elde edilen hızların duyarlılığı için önemlidir. Hızları çapraz-doğrulama ile uyumsuz bulunan noktalar iki şekilde incelenmiştir. İlk olarak noktaların epok sayıları ve ölçü sürelerine bağlı olarak hız uyumsuzluğunun nedeninin ölçülerin nicelik ve niteliğinden mi yoksa noktanın tektonik olarak farklı bir zeminde bulunmasından mı kaynaklandığı araştırılmıştır. Hızları yeterli duyarlılıkta belirlenmiş ama uyumsuz noktalar tek epoklu noktaların hızlarının kestiriminde kullanılmamakla birlikte ilgili noktada hız olarak

kullanılmıştır. Bunun yanında yetersiz ölçü sayısı ya da süresi nedeniyle hızları iyi belirlenememiş noktalar tek epoklu nokta olarak kabul edilmiştir. Söz konusu noktaların listesi ilgili bölümde verilmiş olup, Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgilerini Üretim Yönetmeliği (BÖHHÜY) kapsamındaki nokta sıklaştırma ve hız kestirimi sırasında dikkat edilmesinin yararlı olacağı değerlendirilmektedir. İki epok ölçülerle hız belirlenmesinin güvenilir olmadığı, özellikle 3–6 ay gibi zaman aralıklarında yapılacak ölçülerle hız belirlenmesi sırasında ölçü hatalarının hız tahmininde baskın olduğu ve uzun zaman aralığı olmadan yapılacak tekrarlı ölçülerin güvenilir ve ekonomik olmayacağı değerlendirilmektedir.

Ülkemizdeki GPS ölçüleri, ilgili bölümde de verildiği üzere 1990'lı yıllara dayanmaktadır. Söz konusu tarihten 2000'li yılların başlarına kadar ülkemizdeki sabit istasyon sayısının yeterli sayıda olmaması, mevcut olan istasyonlardan bir kısmının (TUBİ, İSTA, ANKR) da daha sonra depremler nedeniyle kosismik ve post-sismik etkilere maruz kalması, referans sisteminin tanımlanmasında kullanılabilecek istasyonları Avrupa ve Asya'dakilerle sınırlamaktadır. Türkiye Ulusal Sabit GPS İstasyonları Ağı (TUSAGA) ve Türkiye Ulusal Sabit GPS İstasyonları Ağı-Aktif (TUSAGA-Aktif)'nin önemli bir işlevi de Türkiye Ulusal Datumunun yüksek duyarlılıkla tanımlanmasına katkıda bulunmaktır. Bu anlamda, söz konusu ağların TUTGA ile bağlantısının sağlanmasının önemli olduğu değerlendirilmektedir.

Mevcut kampanyaların uzun zaman aralığı içinde değerlendirilmesi nedeniyle farklı veri indirgeme stratejileri içerdikleri, kullanılan global istasyon sayısının bazı kampanyalar için yeterli olmadığı gözlenmektedir. Bu amaçla, yeni yazılımların sağladığı otomatik veri işleme olanaklarından yararlanarak geçmiş kampanyaların yeniden işlenmesinin yararlı olacağı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- Aktuğ, B., 2003a, **Elastik Yarı-uzay Modelleri ve Depremisel Koordinat Değişimlerine Bakış**, Harita Dergisi, Ankara.
- Aktuğ, B., 2003b, **ITRF Hız Alanı ve Görelî Hız Referans Sistemlerine Bakış**, Harita Dergisi, Ankara.
- Aktuğ, B., 2004, **Günümüz Jeodezik Ölçü Sistemlerinde Veri İndirgemesi ve Kısıtların Ele Alınması**, Harita Dergisi, Ankara.
- Aktuğ, B., Ayhan, M.E., Demir, C., 2004, **1992-2004 Yılları GPS Kampanyalarının Birleştirilmesi ve Türkiye Hız Alanının Belirlenmesi**, Teknik Rapor, UZYTEK-05-2004, Jeo. D.Bşk.lığı, Ankara.
- Aktuğ, B., 2005, **Referans Sistemlerinin Zamansal Evrimi ve Türkiye için Ulusal bir Model: Türkiye Ulusal Referans Sistemi – 1996 (TURES-96)**, Harita Dergisi, Ankara.
- Aktuğ, B., Kılıçoğlu, A., Açıkgöz, M., Özkan, S.Ş., 2005, **1992-2005 Yılları GPS Kampanyalarının Birleştirilmesi ve TUTGA Koordinatları ve Türkiye Hız Alanının Belirlenmesi**, Teknik Rapor, UZYTEK-03-05, Jeo. D.Bşk.lığı, Ankara.
- Aktuğ, B., 2008a, **Jeodezik Ölçüler ile Deprem Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesinde Yöntem Etkinliği**, Harita Dergisi, 139, Ankara.
- Aktuğ, B., 2008b, **ITRF-2005 ve Önceki Referans Koordinat Sistemleri ile olan ilişkisi**, Harita Dergisi, 140, Ankara.
- Aktuğ, B., 2009, **Inverse and Compound Datum/Frame Transformations**, Journal of Surveying Engineering, 135 (2), 46-55.
- Aktuğ, B., Kilicoglu, A., Lenk, O., Gürdal, M.A., 2009a, **Establishment Of Regional Reference Frames For Detecting Active Deformation Areas in Anatolia**, Studia Geophysica et Geodaetica, 53, 169-183.
- Aktuğ, B., Kaypak, B., Çelik, R.N., 2009b, **Source parameters of Çay Earthquake and aftershocks of GPS Data, Southwestern Turkey**, Journal of Seismology.
- Aktuğ, B., Lenk, O., Kılıçoğlu, A., Özdemir S., Sezer S., 2009c, **Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı (TUTGA) Hesap Çalışmaları**, Teknik Rapor, JEO-0600-131335-09, Jeo. D.Bşk.lığı, Ankara.
- Ayhan, M. E., Bürgmann, R., McClusky, S., Lenk, O., Aktuğ, B., Herece, E., and Reilinger, R.E., 2001, **Kinematics of the Mw 7.2, 12 November 1999, Düzce, Turkey earthquake**, Geophys. Res. Lett., 28, 367-370.

- Ayhan, M.E., C. Demir, O. Lenk, A. Kılıçoğlu, B. Aktuğ, M.A. Açıkgöz, O. Fırat, Y.S. Şengün, A. Cingöz, M.A. Gürdal, A.İ. Kurt, M. Ocak, A. Türkezer, H. Yıldız, N. Bayazıt, M. Ata, Y. Çağlar, A. Özerkan,, 2002, **Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı-1999A (TUTGA-99A)**, Harita Dergisi Özel Sayı, 16, Ankara.
- Altamimi, Z., Sillard, P., Boucher, C., 2002a, **ITRF2000: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth Science Applications**, Geophysical Research Letters, Vol.107, No.B10, pp.2214.
- Altamimi, Z., Sillard, P., Boucher, C., 2002b, **New Trends for the Realization of the International Terrestrial Reference System**, Adv. Space Res., Vol.30, No.2, pp.175-184.
- Altamimi, Z., Collilieux, X., Legrand, J., Garayt, B. ve Boucher, C., 2007, **ITRF-2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters**, *J. Geophys. Res.*, 112, B09401.
- Dong, D., Herring, T.A., King, R.W., 1998, **Estimating Regional Deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data**, *Journal of Geodesy*, 72, 200-214.
- Herring, T.A., 1990, **Geodesy by Radio Interferometry: The Application of Kalman Filtering to Very Long Baseline Interferometry**, *J. Geophys. Res.*, 95, 12561-12581.
- Herring, T. A., 1997, **GAMIT/GLOBK Kalman Filter VLBI and GPS Analysis Program; Version 4.1**. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1997.
- Özdemir, S., 2009, **TUTGA (2009) GPS Kampanyası Değerlendirme Raporu**, GPS Hesaplama Çalışmaları Raporu, JEO-01-09, Jeo. D.Bşk.İlğı, Ankara.
- Reilinger, R.E., S. Ergintav, R. Bürgmann, S. McClusky, O. Lenk, A. Barka, O. Gurkan, L. Hearn, K. L. Feigl, R. Cakmak, B. Aktug, H. Ozener, M.N. Töksoz, 2000, **Coseismic and postseismic fault slip for the 17 August 1999, M=7.5, Izmit, Turkey Earthquake**, *Science*, 289, 1519-1524.
- Rothacher M., L. Mervart, 1996. **Bernese GPS Software Version 4.0**. AIUB, Berne.
- Sillard, P., Altamimi, Z., Boucher, C., Sep., 1998. **The ITRF Realization and its associated Velocity Field** *Geophysical Research Letters*, Vol.25, No.17, pp.3323-3326.
- Sillard, P., Boucher, C., 2001, **Review of Algebraic Constraints in Terrestrial Reference Frame Datum Definition**, *Journal of Geodesy*, 75, 63-73.
- Taymaz, T., Wright, T., Yolsal, S., Tan, O., Fielding, E. & Seyitoğlu, G., 2007, **Source Characteristics of June 6, 2000 Orta-Çankırı (Central Turkey) Earthquake: a synthesis of seismological, geological and geodetic (InSAR) observations, and internal deformation of Anatolian plate**. In: *The Geodynamics of the Aegean and Anatolia* (eds. Tuncay Taymaz, Yücel Yılmaz & Yıldırım Dilek), pp. 259-290, The Geological Society of London, Special Publications Book, Vol: 291.
- ITRF, 2010, **ITRF Solutions**
<http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF/ITRS-ITRF.html>, Institut Geographique National Central Bureau,
- Boucher, C. ve Altamimi, Z., 2007, **Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign**, <http://lareg.ensg.ign.fr/EUREF/memo2007.pdf>.