Türkiye Ulusal Temel GNSS Ağı (TUTGA) Güncel Koordinat ve Hızlarının GNSS Verilerinin Yeniden Değerlendirilmesi Kapsamında Hesaplanması

(Estimation of the Updated Coordinates and Velocities of Turkish National Fundamental GNSS Network within the Context of GNSS Data Reprocessing)

Ali İhsan KURT*¹, Ayhan CİNGÖZ¹, Soner ÖZDEMİR¹

Selçuk PEKER[®], Özgür ÖZEL[®], Mehmet SİMAV[®] Harita Genel Müdürlüğü, Jeodezi Dairesi, Ankara *Sorumlu yazar: aliihsan.kurt@harita.gov.tr

Geliş Tarihi (Received): 04.05.2020

Kabul Tarihi (Accepted): 29.06.2020

ÖΖ

Türkiye'nin ilk modern uydu bazlı 3 boyutlu temel jeodezik referans ağı olan Türkiye Ulusal Temel GNSS Ağı (TUTGA)'nın yaşatılması ve geliştirilmesi için ölçü sayısının artırılması ve tüm ölçülerin en güncel modeller, hassas yörünge parametreleri ve güncel analiz stratejileri ile değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada; 1992-2019 yılları arasında gerçekleştirilen kampanya ve sabit GNSS ölçüleri birlikte dengelenerek, günümüzde 654 noktadan oluşan TUTGA'nın güncel koordinat ve hızlarının yeniden hesaplanması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, tarihsel tüm GPS verilerinin, homojen bir veri değerlendirme stratejisi, güncellenen uydu yörüngeleri ve Yer Dönme Parametreleri kullanılarak işlenmesiyle daha tutarlı zaman serilerinin ve nokta hızlarının elde edilmesi hedeflenmiştir. İlk olarak, tarihsel GNSS verileri ve meta verileri tasniflenerek sayısal ortamda hazır hale getirilmiştir. Verilerin değerlendirilmesinde GAMIT/GLOBK yazılımı kullanılmış ve nihai çözüm ITRF2014 referans sisteminde hesaplanmıştır. Hesaplanan TUTGA koordinatlarını, Türkiye Ulusal Datumu olan TUREF'in belirlendiği ITRF96 2005.0 epoğuna getirmek için 14 parametreli Helmert dönüşümü uygulanmıştır. Noktaların zaman serileri tektonik ve lokal etkiler açısından incelenmiş ve bölgesiyle uyuşumsuz olan noktalar tespit edilmiştir. İstatistiksel olarak anlamlı yer değiştirmeler oluşturan 11 adet deprem göz önüne alınmış, depremden etkilenen noktaların ayırt edilmesi için noktaların dört karakter kısaltmalarının yanına iki karakterli deprem kısaltması tanımlanmıştır. Ayrıca, bu çalışmadan elde edilen sonuçlar önceki çalışmalar ile karşılaştırılmış ve farklar sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: TUTGA, GNSS Verilerinin Yeniden Değerlendirmesi, Hız Kestirimi, Yarı-Kinematik Datum, TUREF.

ABSTRACT

Sustainability and improvement of the first modern satellite based 3 dimensional fundamental geodetic reference network of Turkey (TNFGN) requires more observations at sites and processing data with latest models, precise orbits and up to date analysis strategies. Via processing campaign type and continuous GPS data together spanning the years 1992 and 2019, up to date set of station coordinates and

velocities of TNFGN, which currently consists of 654 sites, have been obtained. Within the scope of this study it is aimed to achieve more consistent time series and velocities by processing all historical GPS data using a homogeneous data analysis strategy, updated satellite orbits and Earth Orientation Parameters. Firstly, all historical GPS and related meta data were prepared in digital platform prior to reprocessing. GAMIT/GLOBK software is used in analysis and the final solution is computed in ITRF2014 datum. In order to get coordinates in TUREF (ITRF96 at 2005.0) which is used as Turkey's National Datum, a 14-parameter Helmert transformation is applied. Coordinate time series are examined in terms of tectonic and local effects and points showing different behaviors from the ones in their vicinity are determined. In terms of statistically significant displacements, 11 earthquakes were taken into consideration and in addition to the four-character abbreviations of the sites two-character earthquake abbreviations were defined indicating the sites affected by the earthquake. Besides, differences in results between previous studies and this study are presented comparatively.

Keywords: TNFGN, GNSS Data Reprocess, Velocity Prediction, Semi-Kinematic Datum, TUREF.

1. GİRİŞ

Ülkemiz dünyanın en aktif deprem bölgelerinden birisi olan Alp-Himalaya kuşağı üzerindedir (Duman ve diğerleri, 2017). Anadolu Plakası, doğuda Arabistan - Avrasya levhalarının çarpışması, batıda ise Afrika levhasının Ege Denizi altına dalması sonucu yoğun ve farklı gerilme koşullarında şekil değiştirmeye maruz kalmaktadır. Arabistan ve Avrasya levhalarının çarpışması sonucu batıya hareket eden Anadolu Levhası sınırlarında ve içinde meydana gelen tektonik deformasyonlar ve bunların neden olduğu deprem etkinliği Türkiye'nin sismotektoniğini doğrudan kontrol etmektedir. Başta Kuzey Anadolu Fayı ve Doğu Anadolu Fayı gibi transform faylar olmak üzere, Akdeniz'de Anadolu ve Afrika levhaları arasındaki yitimi karşılayan Ege ve Kıbrıs yayları ile Afrika ve Arabistan levhaları arasında transform sınır oluşturan Ölü Deniz Fay zonu bölgenin diğer deprem kaynağı olan devasa

Attf/To cite this article: Kurt, A.İ., Cingöz, A., Özdemir, S., Peker, S., Özel, Ö. ve Simav, M. (2020). Türkiye Ulusal Temel GNSS Ağı (TUTGA) Güncel Koordinat ve Hızlarının GNSS Verilerinin Yeniden Değerlendirilmesi Kapsamında Hesaplanması. *Harita Dergisi*, 164, 1-17.

yapısal unsurlarıdır. Türkiye ve yakın çevresinde tarihsel ve aletsel dönemlerde çok sayıda deprem kayıt altına alınmıştır. Anadolu'da 1900 öncesi tarihsel dönemde 200'den fazla yıkıcı depremin meydana geldiği ve bazı medeniyetleri ciddi şekilde etkilediği, hatta yıkılmalarına neden olduğu bilinmektedir. Benzer şekilde aletsel dönemde 1900-2012 yılları arasında Türkiye ve yakın çevresinde 203 büyük deprem (Mw≥6,0) kaydedilmiştir (Duman ve diğerleri, 2017).

Ülkemizde 1990'lı yıllardan itibaren yapılan GNSS ölçüleri, deprem öncesi (intersismik) tektonik levha hareketleri nedeniyle nokta konumlarında büyüklük ve yönü bölgeden bölgeye değişen yatay yönde 2-3 cm/yıl mertebesinde değişiklik olduğunu göstermektedir. Kuzey Anadolu Fayı (KAF)'na göre daha durgun olarak görülen ancak tarihte büyük depremlerin meydana geldiği Doğu Anadolu Fayı (DAF) üzerinde dahi 1 cm/yıl'a varan kayma hızları tespit edilmiştir (Ayhan ve diğerleri, 2002; Reilinger ve diğerleri, 2006; Aktuğ ve diğerleri, 2016).

Böylesine aktif tektoniğe sahip bir bölgede meydana gelen söz konusu depremler güncel jeodezik ölçü doğruluğunun çok üzerinde büyüklüğe ulaşan yatay ve düşey yerkabuğu hareketleri meydana getirmektedir.

Ülkemizde, kurulduğu günden bu yana statik ve bölgesel bir jeodezik datum (ED-50) olarak hizmet veren Türkiye Ulusal Yatay Kontrol Ağı (TUYKA); tektonik hareketlerden dolayı uğradığı deformasyonlar nedeniyle, 1980'lerden itibaren artarak gelişen uydu tekniklerinin beraberinde getirdiği yüksek konumlama doğruluklarına cevap veremez hale gelmiştir. Bu sebeple, tektonik hareketleri de içeren kinematik, modern ve yere bağlı yer merkezli bir sistemde 3 boyutlu bir ağın kurulması ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Türkiye Ulusal Temel GNSS Ağı (TUTGA) ülkemizde 3 boyutlu modern referans koordinat sistemi ihtiyacını karşılamak amacıyla 1997-1999 yılları arasında gerçekleştirilen çalışmalarla 594 noktalı olarak TUTGA-99 ismi ile kurulmuştur (Ayhan ve diğerleri, 2001). Daha sonra, 17 Ağustos 1999 İzmit, 12 Kasım 1999 Düzce ve 6 Haziran 2000 Çerkeş/Çankırı depremlerinin geniş bir alanda oluşturduğu yatay ve düşey yer değiştirmeler nedeniyle, 2000 ve 2001 yıllarında özellikle deprem alanlarını içeren noktalarda yapılan yeni TUTGA-99A ölçülerle güncellenerek tanımlanmıştır (Ayhan ve diğerleri, 2002). Sıklaştırma çalışmaları ile nokta sayısı günümüzde 654'e ulaşmıştır (Şekil 1).

TUTGA kurulduktan sonra, noktalardaki ölçümler genellikle bölgesel kampanyalar ile yenilenmiştir. Bunun sonucu olarak noktalarda homojen ölçü aralıkları oluşmamış, bazı noktalarda hız belirlemek için yeterli ölçü sayısına veya uzun ölçü aralığına ulaşılamamıştır. Bu strateji 2015 yılında bırakılarak, 2015 ve 2018 yılları arasında tüm ağın yeniden ölçülmesiyle hem konumsal hem de zamansal çözünürlük açısından oldukça iyi bir veri seti elde edilmiştir.



Şekil 1. Türkiye Ulusal Temel GNSS Ağı.

Bu çalışmada, Türkiye ve Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti'nde 1992-2019 yılları arasında gerçekleştirilen kampanya GPS verileri ile TUSAGA ve TUSAGA-Aktif ağlarına ait istasyonların günlük verileri yeniden değerlendirilerek sonuç çözümler TUREF (ITRF-96 Epok 2005.0) datumunda üretilmiştir.

TUTGA'ya ilişkin kampanyaların yeniden değerlendirilmesindeki motivasyonlar; önceki kampanyalara oranla noktalarda çok daha fazla epok ölçü olması ve epoklar arasında daha fazla zaman aralığı bulunması, veri değerlendirme stratejilerindeki gelişmeler, global jeodezik belirlenmesindeki iyileşmeler, parametrelerin yer dönme parametrelerinin yörünge ve iyileştirilmesidir. Ayrıca, TUSAGA ve TUSAGA-Aktif sabit GNSS istasyonları zaman serilerinde tespit edilen sıçramalar TUTGA noktalarının da tekrar gözden geçirilmesi ihtiyacını ortaya koymuştur. TUTGA koordinat ve hızlarının tümüyle yeniden değerlendirilmesinde izlenen stratejiler ile daha önceki hesaplamalardan farklı gerçekleştirilen olarak çalışmalar izleyen bölümlerde açıklanmıştır.

Marmara Depremleri sonrasında bölgedeki (postsismik) deprem sonrası etkivi tespit edebilmek amacıyla 2004 yılına kadar ölçümler tekrarlanmıştır. Müteakip ilk ölçümler çoğu noktada 2016 yılında gerçekleştirilmiştir. Ancak, postsismik etkinin noktaların deprem merkez üssüne yakınlığına bağlı olarak 2008-2010 yılına kadar devam ettiği görülmektedir. Bu çalışmada 1999-2008 mümkün olduğu kadar yılları arasındaki ölçülerden kaçınılarak daha güncel ve postsismik etkinin azaldığı zamanlardaki ölçülerin kullanılmasına özen gösterilmiştir. Üniversiteler ve diğer kurumlardan bu noktaların bazılarının 2008 sonrası ham GPS ölçüleri temin edilerek noktaların intersismik hızları, postsismik etkinin tamamlandığı dönemdeki ölçüler kullanılarak belirlenmiştir.

2. GPS KAMPANYALARININ YENİDEN VERİ DEĞERLENDİRMELERİ

GNSS uydu yörüngeleri ve yer dönme parametrelerinin gelişen yeni modeller ışığında global analiz merkezlerince güncelleme çalışmaları sürekli bir faaliyet olarak devam etmektedir. değerlendirme Yeniden veri çalışmaları kapsamında; tarihsel tüm GPS homojen bir veri değerlendirme verilerinin, stratejisi, güncellenen uydu yörüngeleri ve yer dönme parametreleri kullanılarak işlenmesiyle daha tutarlı zaman serilerinin ve nokta hızlarının elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmada kullanılan çözüm dosyaları ve epok sayılarına ilişkin bazı istatistikler Aktuğ, Sezer, Özdemir, Lenk ve Kılıçoğlu (2011) ile karşılaştırmalı olarak Tablo 1'de verilmiştir. Bu çalışmaya TUSAGA-Aktif istasyonlarının da dâhil olmasıyla, 5 epoktan fazla veriye sahip nokta sayısında önemli bir artış kaydedilmiştir.

Tablo 1. Yeniden veri değerlendirme çalışmalarında kullanılan çözüm ve nokta sayılarına ilişkin istatistikler.

	Aktuğ ve	Bu
	diğerleri	Çalışma
	(2011)	
Çözüm dosyası	84	470
Toplam nokta	1547	2020
1 Epok verisi olan nokta	723	491
2 Epok verisi olan nokta	323	208
3 Epok verisi olan nokta	180	300
4 Epok verisi olan nokta	112	255
5 Epok verisi olan nokta	62	131
>5 Epok verisi olan nokta	147	635

Yeniden veri değerlendirme çalışmalarında daha önceki kampanya çözüm çalışmalarından farklı olarak aşağıdaki stratejiler göz önüne alınmıştır:

- TUTGA revizyon kampanyaları dışında farklı amaçlarla ölçülen ağa ilişkin noktalar araştırılmış, ölçü süreleri ve yöntemleri incelenerek uygun olanlar veri değerlendirmelerine dâhil edilmiştir.

- Önceki çalışmalarda sabit istasyonlar kampanya bazlı olarak çözümlerde yer almıştır.

Bu çalışmada TUSAGA ve TUSAGA-Aktif istasyonlarının verileri de TUTGA kampanyalarıyla beraber değerlendirilmiştir.

- Nokta sayısını ve dolayısıyla hız alanı için gerekli konumsal çözünürlüğü artırmak amacıyla mareograf istasyonlarında gerçekleştirilen GNSS kampanyaları da çözüme dâhil edilmiştir.

Önceki hesaplamalarda, hir TUTGA kampanyası, arazideki toplam ölçüm süresi dikkate alınmadan (2-3 ay) tek bir dosya olarak çözümlere girmiştir. Ancak bu durum nokta konumlarının kampanya orta noktasında hesaplanmasından kaynaklı hataları beraberinde getirmekte, diğer bir deyişle, olası nokta hızları göz ardı edilmektedir. Bu çalışmada ise, kampanyalar 15 günlük bölümlere ayrılarak, söz konusu hataların azaltılması hedeflenmiştir.

- Türkiye çevresindeki Uluslararası GNSS Servisi (International GNSS Service-IGS) istasyonlarının zaman serileri ile IGS ve Avrupa Referans Sistemi Bölgesel Alt Komisyonu (European Reference Frame-EUREF) raporları incelenerek, datum tanımlamada kullanılacak istasyon sayısı artırılmıştır.

Kampanya GPS verilerinin yeniden değerlendirmesinde sırasıyla aşağıdaki işlem adımları uygulanmıştır:

- Tüm noktalara ait dört karakter kısaltması, alıcı ve anten marka/model bilgileri ile anten yüksekliklerini içeren meta veri dosyaları yeniden kontrol edilmiştir. Bu amaçla, ölçüm gerçekleştirilen yıllara ait tüm gözlem karneleri gözden geçirilmiş ve sayısal ortama alınmış, anten yüksekliklerinin tümü kontrol edilmiş, nokta ismi çakışanlar için yeni dört karakter kısaltmaları tanımlanmıştır. Bu şekilde TUTGA ve TUSAGA-Aktif nokta isimlendirmelerindeki tutarsızlıklar giderilmiştir.

- Tüm GNSS verileri (RINEX), standart bir klasör yapısında bir araya toplanarak veri arşivi oluşturulmuştur. Bu amaçla, farklı disk, bilgisayar ve data teyp ortamlarında, farklı klasörler halinde saklanan veriler sayısal ortamda birleştirilmiştir.

- Referans çerçevesini tanımlamak amacıyla datum dönüşümünde kullanılmak üzere, daha fazla IGS istasyonu dikkatli bir seçimle ağ çözümlerine dâhil edilmiştir. Bu kapsamda kullanılan Türkiye ve çevresindeki 33 adet IGS istasyonunun dağılımı Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Veri değerlendirmelerinde kullanılan IGS istasyonlarının dağılımı.

- Analiz stratejileri ile kullanılacak modeller belirlenirken, IGS ve EUREF Sabit GNSS İstasyonları Ağı (European Permanent Network – EPN) teknik rapor ve kılavuzlar da (IGS Technical Report 2018; EPN Guidelines, 2018; IERS Conventions, 2010) göz önüne alınmıştır.

- Önceki çözümlerin bir kısmı BERNESE (Dach, Lutz, Walser ve Fridez, 2015) bir kısmı ise GAMIT/GLOBK (Herring, King, ve McClusky, 2018) yazılımlarının geçmiş sürümleriyle yapılmışken, bu çalışmada tüm veriler GAMIT/GLOBK V10.70 (Herring ve diğerleri, 2018) ile yeniden değerlendirilmiştir.

Analizde, IGS analiz merkezlerince güncel model ve stratejiler ile yeniden değerlendirilerek üretilen "repro2" final uydu yörünge bilgileri CDDIS (Crustal Dynamics Data Information System) veri arşivinden indirilerek kullanılmıştır. Ölçüm yapılan noktalardaki anten faz merkezi düzeltmeleri için, azimut ve yükseklik açısına bağlı olmak üzere en güncel mutlak faz merkezi değişimi dosyasından yararlanılmıştır. Kutup gezinmesi koordinatları, evrensel zaman (UT1-UTC) ve nutasyon değerlerini içeren Yer Dönme Parametreleri için Uluslararası Yer Dönme ve Referans Sistemleri Servisi (International Earth Rotation and Reference Systems Service-IERS) tarafından hazırlanan USNO "bulletin b" final dosyaları kullanılmıştır.

Troposferik gecikme hesaplanırken, ölçüm yapılan noktanın zenit doğrultusundaki gecikme miktarından yararlanarak herhangi bir uydudan sinyal doğrultusundaki değerin gelen hesaplanmasını sağlayan indirgeme (izdüşüm) fonksiyonu için, Vienna Fonksiyonu (Vienna Mapping Function-VMF1) kullanılmıştır. Avrupa Hava Tahminleri Orta Vadeli Merkezinin (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts-ECMWF) hazırlamış olduğu ERA40

(Yaklaşık 40 yıllık verinin yeniden analizine yönelik proje) veri setinden yararlanarak hazırlanan VMF1 (Boehm, Werl ve Schuh, 2006), tüm dünya için 2.5 x 2 derece çözünürlüğünde ve grid yapısında sunulmaktadır.

Öncül troposferik parametreler icin 5 x 5 derece çözünürlüğünde ve grid yapısındaki dosyası kullanılmıştır apt2 5.grd (Lagler. Schindelegger, Böhm, Krásná ve Nilsson, 2013). Söz konusu dosyada, tüm dünya için basınç, sıcaklık (yükseklikle değişimi dâhil) ve su buharı basıncı gibi parametreler yıllık değişimleriyle katsayılar halinde bulunmaktadır. birlikte Troposferik parametre kestirimi aralığı 2 saat alınırken, ikinci ve üçüncü derece iyonosferik düzeltmelerin çözüme katkısı çok küçük olduğu için analize dahil edilmemiştir.

- Gelgitsel (Günlük (S1) ve yarım günlük (S2) periyotlu) ve gelgitsel olmayan Atmosferik Yükleme Etkilerinin her ikisi de grid dosyalar kullanılarak dikkate alınmıştır (Tregoning ve Van Dam, 2005). Okyanus Yüklemesi Düzeltmesi için de FES2004 grid dosyası kullanılmıştır (Lyard, Lefèvre, Letellier ve Francis, 2006).

Veri değerlendirme stratejileri özet olarak Tablo 2'de sunulmuştur.

3. SABİT VE KAMPANYA GPS ÖLÇÜLERİNİN BIRLİKTE DENGELENMESİ

Türkiye ve Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti'nde 1992-2019 yılları arasında gerçekleştirilen 214 adet GNSS kampanya ölçüsü ve 256 adet sabit GNSS istasyonların aylık çözümleri ile toplam 470 çözüm birlikte dengelenerek sonuç çözüm elde edilmiştir. Uzun süreli GNSS kampanyaları 15 günlük bölümlere ayrılmıştır. Kampanya çözümlerinin birlikte dengelenmesinde GAMIT-GLOBK (V 10.70) yazılımının GLOBK (Global Kalman Filtreleme) modülü kullanılmıştır. Kampanya tarihleri birbirine çok yakın veya aynı olan kampanyalar GLOBK aşamasında birleştirilmiştir.

GLOBK, farklı yazılımlarla oluşturulmuş çözümleri Kalman Filtreleme tekniği ile istenilen bir referans koordinat sisteminde birleştirilmesini sağlayan, nokta koordinat zaman serilerini oluşturan ve sonuç hızları hesaplayan bir modüldür. GLOBK çözümü iki aşamalı olarak incelenebilir. Birinci aşamada tüm noktalara yüksek öncül varyans (± 100 m) tanımlanarak gevşek-kısıtlı çözüm Kalman Filtreleme tekniği ile elde edilmiştir (Herring ve diğerleri, 2018).

Tablo 2. Veri Değerlendirme Stratejileri.	
---	--

Yazılım	GAMIT/GLOBK V10.70
Modellenen Gözlemler	Çiftli Farklar
En düşük uydu yükseklik açısı (cut-off angle)	3 derece
Uydu Yörüngeleri	IGS hassas efemerisi (final SP3)
Yer Dönme Parametreleri	USNO bull_b
Troposferik İndirgeme Fonksiyonu	VMF1 (Kuru ve ıslak bileşenler için)
Troposferik öncül veri kaynağı	gpt2_5.grd (global basınç sıcaklık)
Troposferik parametre kestirimi aralığı	2 saat
Okyanus Yüklemesi Düzeltmesi	otl_FES2004.grid
Atmosferik Yükleme Etkisi (non-tidal loading)	atmfilt_cm.YYYY (grid dosya)
Atmosferik Yükleme Etkisi (tidal loading)	ANU100826_grid.atl (grid dosya)
Manyetik Model	IGRF12 modeli
Kullanılan IGS İstasyonu	33 İstasyon
Anten Faz Merkezi Düzeltmeleri	Mutlak (IGS14 modeli)
Öncül Koordinatlar	ITRF2014 (igs14_comb.apr)
Stabilizasyon	Bölgesel
Dönüşüm	6 Parametreli (3 Kayıklık + 3 Dönüklük)
Referans Çerçevesi	ITRF2014 (Altamimi ve diğerleri, 2016)
Ulusal Datum	TUREF (ITRF96 Epok 2005.0)

İkinci aşamada gevşek kısıtlı çözüm ile referans koordinat sistemi tanımlanması için seçilen 33 IGS istasyonunun (Şekil 2) ITRF2014 koordinat ve hızları arasında 12 parametreli (3 öteleme, 3 dönüklük, 3 öteleme hızı, 3 dönüklük hızı) Helmert dönüşümü uygulanmıştır. ITRF2014 koordinat ve hız alanı Massachusetss Teknoloji Enstitüsü (Massachusetss Institute of Technology-MIT) tarafından ITRF, IGS, EPN ve NGS çözümlerinin ITRF2014 gerçekleştirilmesi için birleştirildiği "igs14 comb.apr" dosyasından (Herring ve diğerleri, 2018) elde edilmiştir. igs14_comb.apri koordinat dosyası, yukarıda belirtilen kurumlar tarafından global ve bölgesel GNSS istasyonlarının ITRF2014'e dayalı olarak çözümlerinin MIT yayımlanan tarafından birleştirilmiş bir koordinat ve hız listesidir. Söz

konusu dosyadan alınan 33 IGS istasyonunun 1992-2019 yılları arasında donanım, yazılım, yer değişikliği, depremsel ve lokal etkiler vb. nedenlere bağlı olarak koordinatlarında meydana gelen değişimlerin belirtildiği "igs14_comb.eq" dosyası (Herring ve diğerleri, 2018) da dikkate alınmıştır.

Sonuç olarak, tüm kampanyalardan oluşan gevşek kısıtlı çözüm, 33 IGS istasyonunun koordinat ve hızlarına minimum kısıt verilerek ITRF2014 datumunda dengelenmiş ve elde edilen koordinat ve hızlar için hesaplanan Karesel Ortalama Hatalar (KOH) Tablo 3'de Aktuğ ve diğerleri (2011) çalışmasıyla karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

		Aktuğ ve diğerleri (2011)	Bu Çalışma	
		1.87 mm	1.26 mm	
Konum İstatistikleri (WRMS)	D	2.65 mm	0.90 mm	
		10.67 mm	4.20 mm	
		0.64 mm/yıl	0.21 mm/yıl	
Hız İstatistikleri (WRMS)	VD	1.26 mm/yıl	0.20 mm/yıl	
· · · ·		0.98 mm/yıl	0.53 mm/yıl	
Referans İstasyon				
Koordinatlarının Dengeleme		1.73 mm	2.19 mm	
Sonrası Karesel Ortalama Hatası				
Referans İstasyonlarının				
Hızlarının Dengeleme Sonrası		0.61 mm/yıl	0.59 mm/yıl	
Karesel Ortalama Hatası				

Tablo 3. Yeniden veri değerlendirmede elde edilen istatistik sonuçlar (K:Kuzey-Güney, D:Doğu-Batı, Y:Yükseklik bileşenleri).

4. DEPREMLER NEDENİYLE OLUŞAN DEFORMASYONLARIN İNCELENMESİ

Jeodezik nokta koordinatlarında değişikliğe neden olan depremlerin fay düzlemi geometrisi ve parametreleri bilinirse, elastik yarı-uzay modelleri ile depremin neden olduğu yüzey yer değiştirmeleri hesaplanabilir (Aktuğ, 2003).

Herring ve diğerleri (2016), Kuzey Amerika Kıtasının en büyük jeodezik ağı olan Plaka Sınır Gözlemevi (Plate Boundary Observatory-PBO) kapsamında kurulan GNSS istasyonlarını, toplanan verileri, gerçekleştirilen analizleri ve sonuç ürünlerini (koordinat zaman serileri, konum ve hız bilgileri, atmosferik parametreler vb.) detaylı olarak raporlamıştır. Burada, zaman serilerindeki depremlerden kaynaklanan etkiler incelenirken depremin büyüklüğü (M) ve dış merkezine olan uzaklığı arasında aşağıdaki deneysel formül kullanılmıştır.

$$d = 2.5 * 10^{-3} * 5^{M} \tag{1}$$

Depremin etki alan yarıçapını kilometre biriminde yaklaşık olarak veren bu bağıntıdan yararlanarak büyük depremlerin bu alana giren istasyonların konumlarında meydana getirdiği deprem anı (kosismik) olası yer değiştirmeler, zaman serileri üzerinde incelenmiştir.

Türkiye'de meydana gelen depremlerin TUTGA meydana nokta konumlarında getirebileceği miktarlarını yer değiştirme dolayısıyla koordinat kestirebilmek, zaman serilerini daha iyi yorumlayabilmek maksadıyla, Okada (1992) modeline dayanan Hdef (Halfspace Deformation Toolbox) kullanılmıştır (Herman ve diğerleri,2014; Herman ve diğerleri,2016). Program ile meydana gelen herhangi bir depreme ait fay düzlemi parametreleri mevcutsa depremin merkez üssünün çevresinde meydana getireceği olası yer değiştirmeler (displacement), gerilim (stress) ve gerinimler edilebilmektedir. (strain) tahmin Deprem noktasının çevresinde TUTGA örneğindeki gibi nirengi noktaları mevcutsa, söz konusu noktaların konumları girilerek ya da grid yapısında bir konum dosyası tanımlanarak yer değiştirmeler elde edilebilmektedir. Sonuçlar GMT (Wessel, Smith, Scharroo, Luis ve Wobbe, 2013) yazılımı yardımıyla haritalanabilmektedir.

Yazılımda, P ve S deprem dalga hızları sırasıyla 6.8 ve 3.926 km/sn, Yer kabuğu yoğunluğu ise 3000 kg/m³ (3 gr/cm³) olarak alınmaktadır. Fay düzlemi parametreleri grafik olarak Şekil 3'de sunulmuştur.



Şekil 3. Fay düzlemi parametreleri.

Bu çalışmada, Okada (1992)'de verilen modele dayalı Hdef programı ile Herring ve diğerleri (2016)'daki deneysel formülden hesaplanan yarıçap kullanılarak depremlerin etki alanları yorumlanmış, etkilendiği değerlendirilen noktalara ilgili tarihlerde kesiklikler uygulanmıştır.

Tablo 4'de verilen ve yer değiştirmeler açısından göz önüne alınan depremlere ilişkin kullanılan Fay Düzlemi Çözümleri;

- [1] Türkiye Sismotektonik Haritasının Fay Düzlemi Çözüm Kataloğu Eki'nden (Kılıç, Kartal, Kadirioğlu, Duman ve Özalp, 2017),

- [2] Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı Fay Çözümleri veri tabanından ("AFAD Fay Çözümleri", 2020),

- [3] B.Ü. Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü'ne ait deprem bülteninden ("Kandilli BDTİM", 2020) alınmıştır. Şekil 4'de ise Hdef programı ile hesaplanan Düzce Depremi (12 Kasım 1999) etki alanı örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 4. Half-space Deformation Toolbox-Hdef yazılımı ile hesaplanan Düzce Depremi (12 Kasım 1999) etki alanı.

Deprem	Boylam	Enlem	Derinlik (km)	Strike	Dip	Rake	Mw	Tarih	Saat	Deprem Kodu
İzmit [1]	30.004	40.770	15.0	182	74	3	7.6	17.08.1999	00:01:39	IZ
Düzce [1]	31.226	40.806	11.0	268	54	-167	7.2	12.11.1999	16:57:21	DU
Çerkeş [1]	33.005	40.734	7.0	356	39	-47	6.0	06.06.2000	02.41.51	CE
Sultandağı [1]	31.202	38.520	22.1	269	37	-71	6.5	03.02.2002	07:11:31	SU
Bingöl [1]	40.460	39.010	10.0	333	67	-171	6.3	01.05.2003	00:27:05	BI
Urla [1]	26.728	38.172	7.3	231	76	-177	5.8	17.10.2005	05:45:16	UR
Kovancılar [1]	40.070	38.770	5.0	320	66	-174	6.1	08.03.2010	02.32:00	ко
Van [1]	43.466	38.689	19.0	285	60	105	7.2	23.10.2011	10:41:00	VA
Gökçeada [2]	25.452	40.311	23.0	65	59	-146	6.7	24.05.2014	09:25:01	GA
Karaburun [3]	26.313	38.849	10.0	114	43	-78	6.2	12.06.2017	12:28:37	KB
Bodrum [3]	27.443	36.920	6.0	275	38	-80	6.5	20.07.2017	22:31:09	BO

Tablo 4. Fay düzlemi çözümleri ve iki karakter deprem kodları.

5. HIZ KESTİRİMLERİ

Yukarıda belirtilen işlemler sonucunda tüm Türkiye ve KKTC'ye dağılmış GNSS noktalarının zaman serileri ve tektonik uyumları dikkate alınarak Türkiye ve çevresindeki GNSS noktalarının yüksek duyarlıklı koordinatları ve hızları ITRF2014 datumunda elde edilmiştir. Türkiye ve KKTC'de çözüme giren tüm noktaların tekrarlılık ve tektonik açıdan uyumlu bulunanların ITRF2014'de belirlenen hızları Şekil 5'de verilmektedir.

Şekil 5'de verilen hız alanı sıfır-net-dönüklük ve NUVEL-1A modeline göre tanımlıdır. Avrasya-

sabit bir sistemde hız alanı tanımlamak için MIT tarafından aynı referans noktalarının Avrasya levhasına göre artık hızları ile oluşturulan "igs14_comb_eura.apr" dosyası (Herring ve diğerleri, 2018) kullanılmıştır. Bu şekilde elde edilen hızlar Şekil 6'da gösterilmektedir.

Bu çalışma kapsamında, hız belirlemek için yeterli veriye sahip olmayan noktalarda hız kestirimi çalışması nokta bazlı olarak yapılmış, Türkiye için hız alanı modelinin oluşturulması sonraki çalışmaya bırakılmıştır.



Şekil 5. Çözüme giren tüm noktaların ITRF2014 datumunda hızları.



Şekil 6. Çözüme giren tüm noktaların Avrasya sabit datumunda hızları.

Tektonik olarak hızı bölgesiyle uyuşumsuz olan noktalar çapraz doğrulama tekniği ile tespit edilmiştir. Bu kapsamda noktaların doğu-batı, kuzey-güney ve yükseklik hız bileşenleri Krigging yöntemi ile ayrı ayrı gridlenmiş ve çapraz doğrulama yöntemi ile artık değerler hesaplanmıştır. Çapraz doğrulama sonrası yatay hız artık değerleri 2 mm/y'dan büyük olan noktalar Çapraz verilmiştir. Sekil 7'de doğrulama hatlarının uygulanırken ana fay dikkate alınmamasından dolayı özellikle KAF Zonu ve DAF Zonu Bölgelerinde artık hızların büyüdüğü dikkati çekmektedir. Bunun sebebi, çapraz doğrulama tekniğinde her noktanın çevresindeki noktalarla beraber değerlendirmeye alınmasıdır. Deformasyon bölgelerinin dikkate alınmaması daha dikkatli bir incelemeyi gerektirmektedir. Uyuşumsuz bulunan noktaların çoğunlukla yamaç veya tarım arazisi gibi tektonik etkiden farklı deformasyon gösteren (heyelan, yer altı suyu çekilmesi vb.) bölgelere kuruldukları ve örneğin yamacın eğimi istikametinde hareket ettikleri görülmektedir. Bu özellikteki 15 nokta, referans temsil etme özelliklerinin olmaması ağını nedeniyle TUTGA ağından çıkarılmıştır. Ayrıca, tahrip olan TUTGA noktaları da konum ve hız bilgileri arşivlenmekle birlikte referans ağı güncel nokta listesinden çıkarılmıştır.

Hız parametresi kestirilmeye yetecek kadar ölçüsü olmayan (2 epoklu ya da daha fazla ölçüsü olup da ilk ve son ölçü aralığı 2 yıldan az olan) TUTGA noktaları için yukarıda da belirtildiği gibi nokta bazlı bir yaklaşım uygulanmıştır. Hızı kestirilecek olan noktalar tek tek incelenerek noktanın özelliğine göre hız parametreleri tahmin edilmiştir. Nokta tahrip bir noktanın yerine tesis edilmiş ve bir veya hız belirlemeye yetmeyecek kadar birbirine süre olarak yakın birkaç ölçüsü varsa öncelikle tahrip olan noktanın hızı incelenmiş; eğer bölgesiyle uyumlu bir hız ise yeni noktaya tahrip olan noktanın hızı verilmiştir. Nokta herhangi bir deprem nedeniyle kosismik bir etki görmüşse, yeni koordinatına postsismik etki dikkate alınarak deprem öncesi lineer hızı verilmiştir. Eğer noktanın deprem veya lokal etki atımı sonrasında hız belirlemek için atım öncesine göre daha fazla sayı ve dağılımda ölçüsü varsa noktanın deprem öncesi hızı olarak deprem sonrası hızı verilmiştir.



Şekil 7. Yatay artık hızları 2 mm/y'dan büyük olan noktaların dağılımı.

Eğer nokta yeni tesis edilmişse ve yakın çevresinde doğrudan hız verilebilecek bir nokta yoksa, fay hatları göz önüne alınarak noktaya en vakın en az 3 nokta seçilerek hız kestirilmiştir. Hız işlemi kestirme MATLAB vazılımında "scatteredInterpolant" fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu fonksiyon, herhangi bir gridlemeye gerek kalmadan dağınık halde bulunan noktalardan enterpolasyonu kolayca vapabilmektedir. Söz konusu fonksiyon, dağınık halde bulunan noktalardan Delaunay üçgenlemesini kullanarak istenen nokta için enterpolasyon yapabilmektedir. TUTGA'nın kartezyen hızları kullanıma sunulacak olduğu için, bu aşamada, kestirimde kullanılan noktaların kartezyen hızları ve hataları ayrı ayrı lineer enterpolasyona tabii tutulmuştur.

6. TÜRKİYE ULUSAL REFERANS ÇERÇEVESİ (TUREF) TANIMLANMASI

Klasik bir yaklaşımla jeodezik datum, yer merkezli yere bağlı bir referans sisteminde tanımlanan, genellikle başlangıç noktası, yönlendirilmesi ve ölçeği ile büyüklüğü ve şekli belli olan bir dönel elipsoidin seçildiği bir referans yüzeyidir.

Statik ve kinematik olmak üzere iki tür jeodezik datumdan söz edilebilir. Literatürde kinematik datum yerine dinamik datum da kullanılabilmektedir. Geometrik referans sistemleri konusunda, fiziksel kuvvetlere (kuvvetler ya da torklar) veya hareketlerin kaynağına ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu sebeple "kinematik" datum teriminin kullanılması daha doğru olmaktadır.

Statik datum, tüm noktaların koordinatlarının sabit ya da zamanla değişmediği geleneksel bir jeodezik datum olarak düşünülebilir. Bu varsayım, tektonik hareketler nedeniyle yer yüzeyinin düzenli bir şekilde değişmesinden dolayı tam olmayan bir yaklaşımdır. Jeodezik ağda önemli bir dereceye kadar iç deformasyon oluşmasa da, litosferik levha üzerine kurulu olan jeodezik ağ Yer'in astenosferik mantosu üzerinde katı bir cisim olarak hareket etmektedir. Statik datumun bir GNSS bazlarının diğer kısıtlaması, uzun değerlendirilmesiyle ortaya çıkmaktadır. Eğer bir referans istasyonun statik koordinatları sabit alınırsa uzun bazın katı levha dönüklüğü, nokta konumlama hesabının duyarlığını zamanın bir fonksiyonu olarak azaltacaktır.

Kinematik ve yarı-kinematik koordinat referans sistemlerindeki temel farklılık, gözlemlerden sonra koordinatların nasıl ifade edildiği ile ilgilidir. Her iki durumda da koordinatlar kinematik küresel bir referans koordinat sisteminde gözlem epoğunda hesaplanmakta, kinematik sistemde tüm koordinatlar zamana bağlı olarak gözlem epoğunda tutulmaktadır. Yarı-kinematik datumda ise koordinatlar belli bir epoğa taşınmaktadır.

Yarı-kinematik datum modelinde deformasyon modeli, uzay teknikleri ile elde edilen kinematik koordinatların sabit bir referans epoğuna sürekli ve yüksek doğrulukla dönüştürülmesini sağlayan, datumun ayrılmaz bir bileşenidir. Ana levha sınırlarını barındıran birçok ülke, sürekli devam eden kabuk deformasyonlarının datumu zamanla bozmasını önlemek amacıyla yarı-kinematik datumu benimsemiştir.

Yersel Referans Sisteminin belirli bir epokta gerçekleştirilmesi (realizasyonu) için 3 öteleme, 1 ölçek ve 3 dönüklük olmak üzere toplam 7 parametreve ihtivac vardır. Yersel Referans Sisteminin doğal merkezi Yerin ağırlık merkezidir. Bu merkez, katı Yer kütlesine ilaveten Yer'in akışkan çevresini oluşturan okyanuslar, atmosfer ve kıta içi suları da ihtiva etmektedir. Uydu teknikleri yerin ağırlık merkezine duyarlı oldukları için yer merkezi bu gözlemlerden elde edilebilmektedir. Ölçü içindeki gürültü ve kısmen tamamlanmamış indirgemeler ve hesaplama modelleri (yörünge modellemesi, küçük-ölçekli kütle yükleme etkileri vb.) referans sistemi hata sınırları merkezinin belli içerisinde belirlenebilmesini mümkün kılmaktadır. Referans sisteminin ölçeği, yine yukarıda belirtilen hata kaynakları ile kısmen varsayımlara dayalı olarak hesaplanan yerçekimi sabitesi GM ve hesaplamalardaki indirgemelerinden veri (troposferik ve iyonosferik modellemeler, uydu ve alıcı anten faz merkezi değişimleri vb.) kaynaklı hatalar nedeniyle belli hata sınırlarında belirlenmektedir. Merkez ve ölçeğin tersine, ağın dönüklükleri uvdu teknikleri ile belirlenememekte ve bu sebeple 3 dış kısıtlama ile tanımlanmaktadır (Rülke, Dietrich, Fritsche, Rothacher ve Steigenberger, 2008).

Sonuç olarak iki farklı Yersel Referans Sistemi gerçekleştirilmesinin belirli epokta bir dönüşüm parametresinin karşılaştırılması 7 gerektirmektedir. belirlenmesini ITRF'in gerçekleştirilmesi ele alındığında, herhangi bir epoktaki nokta koordinatları noktanın belirli bir epoktaki koordinatları ve hızları yardımıyla hesaplanabilmektedir. En basit yaklaşım olarak, 7 parametrenin doğrusal hızları ile birlikte toplam 14 parametrenin kullanılmasını gerektirmektedir (Altamimi, Rebischung, Métivier ve Collilieux, 2016).

Referans koordinat sistemi tanımlamak için gerçekleştirilen dönüşüm modeli, 14 parametreli Helmert dönüşüm modeli olup, 7 parametreli Helmert dönüşüm modelinin zamana göre diferansiyeli alınarak elde edilebilir (Altamimi ve diğerleri, 2016). Konum vektörleri arasında \vec{X}_1 'den \vec{X}_2 'ye standart Helmert Dönüşümü;

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_1 + T + D\vec{X}_1 + R\vec{X}_1$$
(2)

şeklinde tanımlandığında öteleme ve dönüklük matrisleri,

$$T = \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{bmatrix} \text{ ve } R = \begin{bmatrix} 0 & -R_3 & R_2 \\ R_3 & 0 & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & 0 \end{bmatrix}$$
(3)

olup T öteleme vektörü, R₁, R₂, R₃ sırasıyla X, Y ve Z eksenlerindeki dönüklük açıları ve D ölçek faktörüdür. (2) eşitliğinin zamana göre türevi alındığında;

$$\dot{X}_2 = \dot{X}_1 + \dot{T} + \dot{D}X_1 + D\dot{X}_1 + \dot{R}X_1 + R\dot{X}_1$$
(4)

R ve D nin çok küçük olduğu ve bunların nokta hızlarını ifade eden \dot{X} ile çarpımının ihmal edilebilir düzeyde olduğu göz önünde tutulursa, (4) eşitliği,

$$\dot{X}_2 = \dot{X}_1 + \dot{T} + \dot{D}X_1 + \dot{R}X_1 \tag{5}$$

olur (Altamimi ve diğerleri, 2016).

Koordinat ve hız alanının belirlenmesi amacıyla (4) ve (5) eşitlikleri kullanılarak gevşekkısıtlı çözümlerde bulunan 33 IGS noktasından yararlanarak tüm çözüm ITRF2014 koordinat ve hız kümesine dönüştürülmüştür.

Türkiye Ulusal Datumu olarak islev dört boyutlu, global referans görebilecek, sistemleri ile ilişkileri yüksek duyarlıkla 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 petrol boru hatları, tüm doğal gaz şebekeleri, demiryolu hatları, Türkiye Kadastrosu gibi büyük projelere altlık oluşturduğu dikkate alındığında, yeni tanımlanacak bir referans çerçevesinin TUTGA-99A dolayısıyla ITRF-96 ile çakışık bir referans sistemi olması gerektiği değerlendirilmiştir. Diğer yandan, gerek Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgilerini Üretim (BÖHHBÜY) Yönetmeliği kapsamında sıklaştırılan yeni ağ noktalarının, gerekse diğer sayısal ve basılı ürünlerin tek anlamlı bir şekilde ilgili alınabilmesi, idarelerce teslim 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 (Aktuğ ve diğerleri, 2011).

Diğer bir yandan, ITRS'in en güncel sürümü en fazla sayıda nokta ve ölçü içerdiğinden IGS noktalarının koordinat ve hız bilgileri en yüksek duyarlıklı olarak en güncel sürümde bulunacaktır. Günümüzde en güncel ITRF sürümü ITRF2014 olup, tüm çözüm ITRF2014'e dayalı olarak gerçekleştirilmiş daha sonra TUREF'e dönüştürülmüştür. TUREF'e dönüştürmek amacıyla ITRF2014 ile ITRF96 arasındaki 14 dönüşüm parametresine ihtiyaç vardır.

("Transformation parameters from ITRF14", 2020)'deki parametreler kullanılarak ITRF2014 koordinat ve hızlarından ITRF96 koordinat ve hızlarına dönüşüm, "t" hesap epoğu olmak üzere aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmiştir:

- ("Transformation parameters from ITRF14", 2020)'de verilen parametreler 2010.0 epoğunda olduğu için öncelikle söz konusu parametrelerin yine aynı tabloda verilen hızları kullanılarak dönüşüm parametreleri hesap epoğuna (t) getirilmiştir.

$$\begin{bmatrix} T_{X} \\ T_{Y} \\ T_{Z} \\ D \\ R_{X} \\ R_{Y} \\ R_{Z} \end{bmatrix}_{t} = \begin{bmatrix} T_{X} \\ T_{Y} \\ T_{Z} \\ D \\ R_{X} \\ R_{Y} \\ R_{Z} \end{bmatrix}_{2010.0} + \begin{bmatrix} T_{X} \\ \dot{T}_{Y} \\ \dot{T}_{Z} \\ \dot{D} \\ \dot{R}_{X} \\ \dot{R}_{Y} \\ \dot{R}_{Z} \end{bmatrix} . (t - 2010.0)$$
(6)

- -

- Hesap epoğuna getirilen dönüşüm parametreleri kullanılarak, ITRF2014 datumunda elde edilen tüm TUTGA koordinatları aşağıdaki dönüşüm modeli kullanılarak hesap epoğunda ITRF96 koordinatlarına dönüştürülmüştür.

$$\begin{bmatrix} X^{96} \\ Y^{96} \\ Z^{96} \end{bmatrix}_t = \begin{bmatrix} X^{14} \\ Y^{14} \\ Z^{14} \end{bmatrix}_t + \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{bmatrix}_t + \begin{bmatrix} D & -R_Z & R_Y \\ R_Z & D & -R_X \\ -R_Y & R_X & D \end{bmatrix}_t \begin{bmatrix} X^{14} \\ Y^{14} \\ Z^{14} \end{bmatrix}_t$$
(7)

- Aşağıda verilen dönüşüm kullanılarak noktaların ITRF2014 hızlarından ITRF96 hızları elde edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix}_{96} = \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix}_{14} + \begin{bmatrix} \dot{T}_X \\ \dot{T}_Y \\ \dot{T}_Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{D} & -\dot{R}_Z & \dot{R}_Y \\ \dot{R}_Z & \dot{D} & -\dot{R}_X \\ -\dot{R}_Y & \dot{R}_X & \dot{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^{14} \\ Y^{14} \\ Z^{14} \end{bmatrix}_t$$
(8)

- Son olarak (7) ile hesap epoğunda elde edilen ITRF96 koordinatları, (8) ile bulunan ITRF96 hızları kullanılarak aşağıda verilen dönüşüm modeli ile 2005.0 epoğunda TUREF koordinatlarına dönüştürülmüştür.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{TUREF} = \begin{bmatrix} X^{96} \\ Y^{96} \\ Z^{96} \end{bmatrix}_t + \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix}_{ITRF96} . (2005 - t)$$
(9)

TUTGA noktalarının kartezyen koordinatları TUREF datumunda hesaplanmasını müteakip GRS80 elipsoidine göre coğrafi koordinatlara dönüştürülmüştür.

Enlem ve boylamın standart sapmalarını bulmak için hata yayılma yasası uygulanmıştır. Hata yayılma yasasının uygulanmasında ihtiyaç duyulan Jakobien matrisi (Thomson, Krakiwsky ve Steeves, 1977)'den alınmış ve (10)'da verilmiştir.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{-\sin\varphi\cos\lambda}{(M+h)} & \frac{-\sin\varphi\sin\lambda}{(M+h)} & \frac{\cos\varphi}{(M+h)} \\ \frac{-\sin\lambda}{(N+h)\cos\varphi} & \frac{\cos\lambda}{(N+h)\cos\varphi} & 0 \\ \cos\varphi\cos\lambda & \cos\varphi\sin\lambda & \sin\varphi \end{bmatrix}$$
(10)

Kartezyen koordinatlarının varyans-kovaryans matrisi, koordinat bileşenlerinin standart sapmaları ve çözüm dosyasından alınan korelasyon katsayıları kullanılarak (11)'deki gibi kurulmuştur.

$$C_{XYZ} = \begin{bmatrix} \sigma_X^2 & \rho_{xy}\sigma_X\sigma_Y & \rho_{xz}\sigma_X\sigma_Z \\ \rho_{xy}\sigma_X\sigma_Y & \sigma_Y^2 & \rho_{yz}\sigma_Y\sigma_Z \\ \rho_{xz}\sigma_X\sigma_Z & \rho_{yz}\sigma_Y\sigma_Z & \sigma_Z^2 \end{bmatrix}$$
(11)

(10) ve (11) ile verilen jakobien ve varyanskovaryans matrisleri kullanılarak coğrafi koordinatların varyans-kovaryans matrisi hata yayılma yasası uygulanarak (12)'deki gibi elde edilmiştir.

$$C_{\varphi\lambda h} = J \ C_{XYZ} \ J^T \tag{12}$$

Daha önceki çalışmalarda enlem ve boylam hataları toposentrik yerel koordinat sisteminde metre biriminde verilmiştir. Bu çalışmada coğrafi koordinatların hataları derece saniyesi cinsinden de verilmiştir. Bu amaçla (12) ile elde edilen standart sapmalar (13) ile metre birimine dönüştürülmüştür. Sonuç olarak bu çalışmada enlem ve boylamın standart sapmaları hem derece saniyesi hem de metre biriminde verilmiştir.

$$\sigma_{\varphi}^{Dizlem} = \left(\sigma_{\varphi}/\rho^{"}\right) x \ 6378137.0$$

$$\sigma_{\lambda}^{Dizlem} = \left(\sigma_{\lambda}/\rho^{"}\right) x \ 6378137.0 \ x \ \cos\varphi \tag{13}$$

TUTGA nokta koordinatlarında depremler ve lokal etkiler nedeniyle oluşan değişimler, noktaların zamansal kullanımını gerektirmektedir. Dolayısıyla, tektonik veya lokal etkiden önceki ve sonraki koordinatlarının ayrı ayrı ele alınması gerekmektedir. Koordinat ve hız hesaplamalarında dikkate alınan depremler Tablo 4'de listelenmiştir. Depremden etkilenen noktaların ayırt edilmesi maksadıyla TUTGA noktalarının dört karakter kısaltmalarının yanına iki karakterli deprem kodu kısaltması tanımlanmıştır (Tablo 4). Örneğin, YENF_GPS noktasının Karaburun-İzmir depreminden etkilendiğini belirtmek için, deprem sonrası koordinat ve hızı YENF_GKB ismi ile verilmiştir.

TUTGA koordinatları, iki karakter deprem kısaltmasına göre verilen tarih aralığına göre kullanılmalıdır. Örneğin ABNT noktasının ABNT_GPS noktasından sonra ABNT_GIZ ve ABNT_GDU noktaları gelmektedir. Dolayısıyla 17 Ağustos 1999 tarihinden önce ABNT_GPS, 17 Ağustos 1999 – 12 Kasım 1999 tarihleri arasında ABNT_GIZ, 12 Kasım 1999 tarihinden sonraki çalışmalar için ise ABNT_GDU koordinatları kullanılmalıdır.

Bu çalışmada iki karakter deprem kısaltması olmayıp da 2PS uzantısı verilen bazı noktalar da mevcuttur. Bunlardan bir kısmı, bölgesel olarak depremlerin etki alanında olabileceği fakat yakın deprem aralıkları arasında verisi olmayan ve dolayısıyla hangi depremden etkilendiği tam olarak kestirilemeyen noktalardır. Örneğin PAZR noktasının Düzce ya da Çerkeş depremlerinin aralığında verisi olmadığından hangisinden etkilenmiş olabileceğine karar vermek yerine en son depremin tarihi baz alınarak 2PS olarak uzantısı değiştirilmiştir.

Bazı noktaların tektonik hareketlerden ziyade etkilerden bir atım oluşturdukları lokal değerlendirilmiş, bunların bir kısmı süreklilik arz edebileceği düşünülerek uyuşumsuz nokta olarak nitelendirilmiş ve arşivde tutulmaya devam edilmekle birlikte güncel TUTGA listesinden çıkarılmıştır. Bu noktaların çoğunluğunun bir tepenin yamacı üzerine kurulmuş olduğu ve yamaçtaki yavaş toprak kayması ile uyumlu hareket ederek bölgesel tektonik hızdan uzaklaştıkları tespit edilmiştir. Bazı noktaların ise böyle bir konumu olmayıp bir seferlik bir lokal etki çarpması vb.) görmüş olabileceği (traktör değerlendirilerek bu noktaların da atım tarihlerinden sonraki dönem için 2PS uzantısının verilmesinin uygun olacağı değerlendirilmiştir. Bu noktaların ileriki dönemlerde yeni ölçülerle takip edilerek bölgesel uyuşumunun kontrol edilmesi gerekmektedir.

7. ÖNCEKİ ÇÖZÜMLER İLE KARŞILAŞTIRMA

TUTGA tesis ve ölçüm çalışmalarının 1997-1999 yılları arasında tamamlanmasından sonra 2000 yılında TUTGA99 ismiyle ITRF-96 datumunda ve 1998.0 epoğunda; daha sonra 2000 ve 2001 yıllarında yapılan yeni ölçüler ile güncellenerek TUTGA-99A ismiyle 2002 yılında aynı datum ve epokta yayımlanmıştır (Ayhan ve diğerleri, 2002). 2004 yılında Aktuğ ve diğerleri (2004) ile yayımlanan TUTGA koordinat ve hızları ITRF-2000'de hesaplanmakla birlikte ITRF-96'ya dönüştürülerek sunulmuştur. Müteakiben 1992-2009 yılları arasındaki tüm TUTGA kampanyaları birleştirilerek TUREF datumunda (ITRF-96 Epok 2005.0) yayımlanmıştır (Aktuğ ve diğerleri, 2011). Söz konusu çalışmada, kampanyaların gevşek kısıtlı çözümlerinin birleştirilmesinin ardından ITRF2005 datumunda tüm koordinat ve hızlar belirlenmiş; IGS tarafından yayımlanan dönüşüm parametreleri kullanılarak koordinatlar ve hızlar TUREF datumuna dönüştürülmüştür.

Aktuğ ve diğerleri (2011) çalışmasında da önceki çalışmalara benzer şekilde kampanya bazlı olarak BERNESE yazılımında değerlendirilen gevşek çözümleri kampanyaların kısıtlı kullanılmıştır. Yani kampanyanın değerlendirildiği dönemdeki uydu yörüngeleri ve yer dönme Önceki parametreleri aynen kullanılmıştır. bölümlerde detaylı olarak anlatıldığı gibi bu çalışmada tüm kampanyalar güncellenen veriler ve veri değerlendirme stratejileri kullanılarak GAMIT-GLOBK vazılımıyla veniden değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra TUTGA noktalarında da önemli derecede veri artışı olmuştur. 2015 ve 2018 yılları arasında tüm ağın yeniden ölçülmesiyle hem konumsal hem de zamansal çözünürlük açısından oldukça iyi bir veri seti elde edilmiştir.

Aktuğ ve diğerleri (2011) ile bu çalışma arasındaki koordinat ve hız farklarına ilişkin olarak aşağıdaki hususlar göz önünde bulundurulmalıdır:

- Bu çalışmada, TUTGA noktalarının başka çalışmalarda yapılmış ölçüleri de değerlendirmelere dâhil edilmiştir. Bu sayede zamansal çözünürlüğün artırılması hedeflenmiştir.

- Önceki çalışmada hızlar Marmara depremleri öncesi ve sonrası olmak üzere ikiye ayrılmıştır. 1999 öncesi çoğu noktanın ölçü epokları hız belirlemek için yeterli değildir. Örneğin, FSTK (40°.48057-Kuzey 28°.88184-Doğu) noktasının 1997, 1998 ve 1999 olmak üzere üç epok ölçümü vardır. Fakat ilk ölçü ile son ölçü arasındaki zaman aralığı 1.685 yıldır. Bu sürenin doğrusal hız belirlemek için yeterli olmadığı değerlendirilmektedir.

Aktuğ ve diğerleri (2011) çözümünde özellikle Marmara Bölgesindeki ölçülerin 2004 yılında kesildiği ve deprem sonrası koordinat ve hızların belirlenmesinde kullanılan bu ölçülerin post-sismik aktiviteden yoğun olarak etkilendiği gözlenmektedir. Bu bölgede depremin merkez üssüne yakınlığına bağlı olarak noktaların 2008-2010 yıllarına kadar bu etki altında oldukları söylenebilir. Bu çalışmada mümkün olduğunca bu dönemlerdeki ölçülerden kaçınılarak daha güncel ve postsismik etkinin azaldığı zamanlardaki ölçülerin kullanılmasına özen gösterilmiştir. Bu bölgedeki farkların büyük olmasına neden olan en büyük etmenin bu olduğu değerlendirilmektedir.

Her ne kadar Aktuğ ve diğerleri (2011) çalışmasında TUTGA-99, TUTGA-99A ve TUTGA-2005 hesaplamalarına göre noktalarda daha fazla epok olsa da, çoğu noktanın tek epok, birden fazla epoğu olan noktaların da gözlem epoklarının nispeten birbirine yakın olması nedeniyle hız alanı belirlenmesinde hesaplamalarda kullanılan noktalar yetersiz kalmıştır. Fakat bu çalışmada neredeyse tüm noktaların uygun zamansal çözünürlükte daha fazla ölçüsünün olması sayesinde daha iyi hız kestiriminde bulunulmuştur. Bu sayede, bölgesiyle uyuşumsuz noktaların tespitinde önemli avantaj sağlamıştır.

- Bu çalışmadaki en büyük katkılardan birisi de TUSAGA-Aktif ağından elde edilen yaklaşık 10 yıllık veri olmuştur. Özellikle hız kestirimi ihtiyacı olan TUTGA noktalarında; TUTGA ve TUSAGA-Aktif ağlarının birleşimi ile oluşan konumsal çözünürlüğü daha yüksek olan bir ağdan yararlanılmıştır.

Aktuğ ve diğerleri (2011) çalışmasında elde edilen TUTGA noktalarının koordinat ve hızlarının bu çalışmadaki farklarının incelenmesi amacıyla, öncelikle tahrip olmamış ve uyuşumsuzluk tespit edilmemiş nokta kümesi belirlenmiştir. Koordinat ve hız karşılaştırmaları TUREF datumunda ve toplam 559 noktada yapılmıştır. Karşılaştırmaya ilişkin istatistik sonuçlar Tablo 5'de; yatay konum farkları Şekil 8'de, düşey konum farkları Şekil 9'da, yatay hız farkları Şekil 10'da ve düşey hız farkları Şekil 11'de sunulmuştur. Tablo 5. Aktuğ ve diğerleri (2011) ve Bu Çalışma çözümlerinin karşılaştırmalarının istatistikleri (Δ KG:Kuzey-Güney yönündeki konum farkları, Δ D: Doğu-Batı yönündeki konum farkları, Δ h: Düşey yöndeki konum farkları, Δ V_{KG}: Kuzey-Güney yönündeki hız farkları, Δ V_{DB}: Doğu-Batı yönündeki hız farkları, Δ V_h: Düşey yöndeki hız farkları).

	ΔKG	ΔDB	Δh	ΔV_{KG}	ΔV_{DB}	ΔV_h
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm/y)	(mm/y)	(mm/y)
Minimum	-47.91	-87.34	-139.15	-3.85	-13.38	-31.91
Maksimum	27.80	43.89	112.73	9.11	10.21	19.55
Ortalama	-6.37	-3.50	-7.60	1.60	-1.12	-2.32
Medyan	-6.43	-2.27	-7.40	1.60	-0.92	-1.89
Standart Sapma	6.94	9.56	29.91	1.43	2.20	6.59



Şekil 8. Bu çalışma ile Aktuğ ve diğerleri (2011) arasındaki yatay konum farkları.



Şekil 9. Bu çalışma ile Aktuğ ve diğerleri (2011) arasındaki düşey konum farkları.



Şekil 10. Bu çalışma ile Aktuğ ve diğerleri (2011) arasındaki yatay hız farkları.



Şekil 11. Bu çalışma ile Aktuğ ve diğerleri (2011) arasındaki düşey hız farkları.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; Türkiye ve Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti'nde TUTGA noktalarında 1992-2019 villari arasında gerçekleştirilen 214 adet GNSS ölçü kampanya verileri yeniden değerlendirilmiştir. Avrica TUSAGA ve TUSAGA-Aktif istasvonlarinin 1998-2019 yılları günlük çözümleri de yeniden yapılmış ve aylık olarak birleştirilen 256 adet sabit GNSS istasyonları aylık çözümleri ile toplam 470 çözüm birlikte dengelenerek 654 TUTGA noktasının koordinat ve hızları TUREF datumunda elde edilmiştir. Noktaların zaman serileri tektonik ve lokal etkiler açısından incelenmiş, hızları bölgesiyle uyuşumsuz noktalar tespit edilmiştir.

Yeterli epok ölçüsü olmayan noktalar için hız kestirimi noktasal bazda fay hatları göz önüne alınarak gerçekleştirilmiş, Türkiye için hız alanı modelinin oluşturulması, sonraki çalışmaya bırakılmıştır. Müteakip yıllarda, noktalardaki ölçü sayısı arttıkça, hızı kestirilen noktaların kontrol edilerek mümkün olduğunca kendi hızlarının kullanmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir.

Deprem etki alanlarının noktaların zaman serileri ile beraber incelenmesivle, noktalardan gereksiz yere ölçü çıkarılmasının önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Yoğun postsismik etkinin oluştuğu Marmara Depremleri sonrasında ölçülerin 2004 yılında kesildiği ve müteakip en yakın ölçünün yılında yapıldığı çoğu noktada 2016 görülmektedir. Postsismik etkinin deprem merkez üssüne yakınlığına bağlı olarak 2008-2010 yılına kadar devam ettiği görülmektedir. Üniversiteler ve diğer kurumlardan bu noktaların bazılarının 2010 sonrası ölçüleri elde edilerek bu noktalarda intersismik hız belirlenmiştir. Özellikle Marmara Bölgesindeki bu noktaların önümüzdeki yıllarda ölçü planlarına dâhil edilmesi ve böylece postsismik etki sonrası doğrusal hızın daha iyi belirlenmesi için zamansal çözünürlüğün artırılmasının uygun olacağı değerlendirilmektedir.

Önceki çalışmalarda TUTGA noktalarının enlem ve bovlam hataları toposentrik verel koordinat sisteminde metre biriminde verilmistir. Referans nokta koordinatlarını coğrafi olarak alan yazılımların kullanılması durumunda kullanıcıların bu hataları açı birimine çevirmeleri gerekmektedir. Bu işlem yükünü azaltmak amacıyla metre birimi yanında açı cinsinden de hatalar verilmiştir. Ayrıca önceki çalışmalarda 0.0001 m duyarlıkta verilen koordinat ve hızlar bu çalışmada 0.00001 m duyarlığında verilmiştir. Bu duyarlık derecesinin Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği (BÖHHBÜY) kapsamında yapılan çalışmalar için gerekli olmasa da bilimsel çalışmalar kapsamında kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

Koordinat ve hızların ITRF2014 datumunda hesaplanmasından sonra tüm koordinatlar TUREF'e dönüştürülmüştür. Bu amaçla, 14 parametreli standart Helmert Dönüşümü kullanılmıştır. Elde edilen koordinat ve hızların Aktuğ ve diğerleri (2011) ile karşılaştırılması sonrasında elde edilen farkların, özellikle Marmara Bölgesinde Kuzey Anadolu Fayı etrafında ve Aktuğ ve diğerleri (2011)'de hız kestirilen noktalarda büyüdüğü görülmektedir. Karşılaştırılan tüm noktalar için koordinat farklarının standart sapmaları, kuzey-güney bileşeninde 6.94 mm, doğu-batı bileşeninde 9.56 mm ve yükseklikte ise 29.91 mm bulunmuştur. Aynı şekilde hız farklarının, kuzey-güney bileşeninde 1.43 mm/yıl, doğu-batı bileşeninde 2.20 mm/yıl ve düşey hızlarda ise 6.59 mm/yıl olduğu görülmüştür. Doğu-batı bileşenindeki koordinat ve hız farklarının kuzey-güney bileşenindeki koordinat ve hız farklarından daha yüksek olmasının sebebinin, İzmit ve Düzce depremlerini oluşturan Kuzey Anadolu Fayının sağ yanal atımlı bir fay sistemi olması ve bu bileşeninin sistemin doğu-batı kuzey-güney bileseninden daha büyük olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Önceki çalışmalarda, özellikle fay bölgelerinde hız kestirimi yapılan ve koordinatları bu değerlere göre hesaplanan noktaların, yeni ölçülerin katılımıyla hızlarının daha doğru belirlenmesi ve koordinatların daha doğru hesaplanması sonucunda söz konusu farkların oluştuğu değerlendirilmektedir.

Aktuğ ve diğerleri (2011)'de Türkiye için hız belirlenmesinde fay hatları dikkate alanı alınmamıştır. Hâlihazırda yürürlükte olan Büyük ve Harita Bilgileri Üretim Ölçekli Harita Yönetmeliği (BÖHHBÜY)'ne göre üretilen C1, C2 ve C3 noktalarının hızlarının TUTGA ve TUSAGA-Aktif noktalarından belirlenmesi, idarenin uvgun göreceği enterpolasyon yöntemiyle kullanıcıya bırakılmış olup, hızların değişim gösterdiği ana fay sistemleri icin bir yöntem belirtilmemiştir. Dolayısıyla, kullanıcıların en yakın TUTGA noktalarını kullanma kaygısıyla belirleyeceği hızlarda hatalar meydana gelebileceği değerlendirilmektedir. Bu işlemin kullanıcıya bırakılmadan hazır bir deformasyon modeli sunulmasının, yeni noktalarda standart ve daha yapılmasını doğru kestirimler sağlayacağı değerlendirilmektedir. Türkiye için ana fay hatlarının dikkate alınacağı bölgeleme yöntemiyle yüksek doğruluklu bir hız modelinin oluşturulmasının ve yeni ölçülerle geliştirilmesinin ve en önemlisi de bu modelin BÖHHBÜY'e de ithal edilerek kullanıcılara sunulmasının yararlı olacağı değerlendirilmektedir.

Epok sayısı fazla, fakat epoklar arası sürenin kısa olduğu (2 yıldan az) ölçülerle belirlenen hızlarda, ölçü hatalarının hız tahmininde baskın olması sebebiyle yeterli duyarlık ve doğruluğun sağlanamadığı görülmektedir. Bu sebeple, noktaların bulunduğu bölgeye bağlı olarak noktalardaki ölçü aralıklarının 3-6 yıl arasında seçilmesinin hızın güvenirliğini artırması ve ekonomik olması açılarından daha uygun olacağı değerlendirilmektedir.

Özellikle, TUSAGA-Aktif ağının kurulmasıyla ülke genelinde sabit istasyon açısından önemli bir boşluğun dolduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra üniversiteler, belediyeler ve diğer kamu kurumlarının da işlettiği istasyonlar ve sabit GNSS ağları mevcuttur. Hız alanının belirlenmesinde bu istasyonların verilerinin de kullanılmasının önemli katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir. Ayrıca, IGS ağına 2018 yılında eklenen 3 TUSAGA-Aktif istasyonu (MERS, KRS1, IZMI), referans sistemi tanımlamada önemli faydalar sağlayacaktır. Bu sebeple Türkiye'den IGS ve EUREF ağlarına dâhil istasyon sayısının artırılmasının yararlı olacağı değerlendirilmektedir.

Bu çalışma kapsamında yapılan yeniden veri değerlendirme çalışmasının en önemli faydalarından birisi de tarihsel GPS verilerinin ve meta verilerinin sayısal ortamda hazır hale getirilmesi olmuştur. İleriki dönemlerde, veri değerlendirme yazılımlarının kullandıkları modellerde ve değerlendirme stratejilerindeki gelişmeler ışığında verilerin tekrar analiz edilmesinin uygun olacağı değerlendirilmektedir.

Günümüzde veri değerlendirme yazılımlarının kullanım kolaylığı ve yaygınlığı arttıkça hesap epoğunda koordinat belirleyebilmek oldukça kolaylaşmıştır. Fakat hesap epoğunda belirlenen koordinatların ülke datum epoğuna taşınması için doğrulukla bilinmesi hızların yüksek ve kullanıcıların her noktada standart bir hız modelini kullanmalarına ihtiyaç vardır. Ayrıca, TUREF'in ITRF96 datumunda tanımlandığı 2005 epoğundan gittikçe uzaklaştığı da göz önüne alındığında, söz konusu hız alanına olan ihtiyaç kaçınılmazdır. Eldeki tüm verilerin kullanılması ile ana fay hatları ile bölgelenmiş bir hız alanı modelinin kullanıcılara sunulmasının yararlı olacağı değerlendirilmektedir.

TEŞEKKÜR

TUTGA'nın kurulması, yaşatılmasında ve GNSS verilerinin yeniden değerlendirilmesinde emeği geçen Harita Genel Müdürlüğü personeline; TUTGA noktalarındaki ölçülerini . Harita Genel Müdürlüğü ile paylaşarak çalışmaya katkı sağlayan TÜBİTAK MAM Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi ve Afyon Kocatepe Üniversitesine teşekkür ederiz. Ayrıca bu çalışmayı hakem olarak inceleyen, zaman ve emek harcayarak yayının bilimsel kalitesinin artmasına yardımcı olan 3 Hakeme katkılarından dolayı teşekkürlerimizi sunarız.

ORCID

Ali İhsan KURT (D) https://orcid.org/0000-0003-2367-2152

Ayhan CİNGÖZ ^(D) https://orcid.org/0000-0002-4468-1309

Soner ÖZDEMİR D https://orcid.org/0000-0002-4836-4853

Selçuk PEKER D https://orcid.org/0000-0001-7763-8844

Özgür ÖZEL 🕩 https://orcid.org/0000-0001-5192-9985

Mehmet SİMAV D https://orcid.org/0000-0002-3963-3871

KAYNAKLAR

AFAD Fay Çözümleri. (2020). Erişim Adresi: https://deprem.afad.gov.tr/faycozumleri

- Aktuğ, B. (2003). Elastik yarı-uzay modelleri ve depremsel koordinat değişimlerine dinamik bir yaklaşım. *Harita Dergisi*, 129, 1-15. Erişim Adresi:https://www.harita.gov.tr/images/dergi/ makaleler/129_1.pdf
- Aktuğ, B., Ayhan, M.E. ve Demir, C. (2004). 1992-2004 yılları GPS kampanyalarının birleştirilmesi ve Türkiye hız alanının belirlenmesi (Rapor No. UZYTEK-05-4). Ankara: Harita Genel Komutanlığı.
- Aktuğ, B. (2005). Referans sistemlerinin zamansal evrimi ve Türkiye için ulusal bir model: Türkiye Ulusal Referans Sistemi-1996 (TURES-96). *Harita Dergisi*, 133, 1-26. Erişim Adresi: https://www.harita.gov.tr/images/dergi/makalel er/133_1.pdf
- Aktuğ, B., Sezer, S., Özdemir, S., Lenk, O. ve Kılıçoğlu, A. (2011). Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı güncel koordinat ve hızlarının hesaplanması. *Harita Dergisi*, 145, 1-14.Erişim Adresi:https://www.harita.gov.tr/images/dergi/ makaleler/145_1.pdf
- Aktuğ, B., Özener, H., Dogru, A., Sabuncu, A., Turgut, B., Halıcıoğlu, K., ... Havazlı, H. (2016). Slip rates and seismic potential on the East Anatolian Fault System using an improved GPS velocity field. *Journal of Geodynamics*, 94–95, 1-12. doi:10.1016/j.jog.2016.01.001
- Altamimi, Z., P. Rebischung, L. Métivier ve X. Collilieux (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 121, 6109– 6131. doi:10.1002/2016JB013098.
- Ayhan, M.E., Lenk, O., Demir, C., Kılıçoğlu, A., Kahveci, M., Türkezer, A., ... Fırat, O. (2001).
 Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı-1999 (TUTGA-99). Ankara: Harita Genel Komutanlığı.
- Ayhan, M.E., Demir, C., Lenk, O., Kılıçoğlu, A., Aktuğ, B., Fırat, O., ... Özerkan, A. (2002). Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı-1999A (TUTGA-99A). *Harita Dergisi*, Özel Sayı 16. Erişim Adresi: https://www.harita.gov.tr/images/dergi/c9cdb3 1dba480a4.pdf
- Boehm J., Werl B. ve Schuh H. (2006). Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data. *Journal of Geophysical Research*, 111, B02406. doi:10.1029/2005JB003629

- Dach, R., S. Lutz, P. Walser ve P. Fridez (Eds) (2015). Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual, Astronomical Institute, University of Bern. doi: 10.7892/boris.72297
- Duman, T.Y., Çan, T., Emre, Ö., Kadirioğlu, F.T., Başarır Baştürk, N., Kılıç, T., ... Kurt, A.İ. (2017). *Türkiye Sismotektonik Haritası ve Kitabı*. Ankara: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Özel Yayınlar Serisi-34, 137-162.
- Half-space Deformation Toolbox. (2020). Erişim Adresi:http://www.matthewwherman.com/soft ware.html
- Herman, M.W., Herrmann, R.B., Furlong, K.P. ve Benz, H.M. (2014). Using regional moment tensors to constrain the kinematics and stress evolution of the 2010–2013 Canterbury earthquake sequence, South Island, New Zealand. *Tectonophysics*, 633, 1-15. doi: 10.1016/j.tecto.2014.06.019
- Herman, M.W., Furlong, K.P., Hayes, G.P. ve Benz, H.M. (2016). Foreshock triggering of the 1 April 2014 Mw 8.2 Iquique, Chile, earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, 447, 119-129. doi: 10.1016/j.epsl.2016.04.020
- Herring, T. A., Melbourne, T.I., Murray M.H., Floyd, M.A., Szeliga, W.M., King, R.W., ... Wang, L. (2016). Plate Boundary Observatory and related networks: GPS data analysis methods and geodetic products. *Reviews of Geophysics*, 54, 759–808. doi:10.1002/2016RG000529
- Herring, T.A., King, R.W., M. A. Floyd ve McClusky, S.C. (2018). *GAMIT Reference Manual, GPS Analysis at MIT, Release 10.6.* Erişim Adresi: http://geoweb.mit.edu/gg/GAMIT Ref.pdf
- Kandilli BDTİM. (2020). Erişim Adresi: http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/tr/
- Kılıç, T., Kartal, R.F., Kadirioğlu, F.T., Duman, T.Y. ve Özalp, S. (2017). Türkiye ve yakın çevresi için düzenlenmiş moment tensor (1906-2012) kataloğu MW ≥ 4,0). Ankara: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.
- Lagler, K., M. Schindelegger, J. Böhm, H. Krásná, ve T. Nilsson (2013) GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques. *Geophysical Research Letters*, 40, 1069–1073. doi:10.1002/grl.50288.

- Lyard, F., Lefèvre, F., Letellier, T. ve Francis, O. (2006) Modelling the global ocean tides: a modern insight from FES2004. Ocean Dynamics, 56, 394-415. doi: 10.1007/s10236-006-0086-x
- Okada, Y., (1992). Internal Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *82*(2), 1018-1040. Erişim Adresi: https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/bssa/arti cle-abstract/82/2/1018/119580/Internaldeformation-due-to-shear-andtensile?redirectedFrom=fulltext
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Çakmak, R ... 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 Geophysical Research-Solid Earth*, 111, B5, doi:10.1029/2005JB004051
- Rülke, A., R. Dietrich, M. Fritsche, M. Rothacher, ve P. Steigenberger (2008). Realization of the Terrestrial Reference System by a reprocessed global GPS network. *Journal of Geophysical Research*, 113, B08403. doi:10.1029/2007JB005231
- Thomson, D.B., Krakiwsky, E.J. ve Steeves, R.R. (1977). A Manual For Geodetic Coordinate Transformations In The Maritime Provinces. Dept. of Surveying Engineering, University of New Brunswick, Technical Report No. 48 Erişim Adresi: https://www.researchgate.net/publication/5024 4825_A_Manual_for_Geodetic_Coordinate_Tr ansformations_in_the_Maritime_Provinces
- Transformation parameters from ITRF14. (2020). Erişim Adresi: http://itrf.ign.fr/doc_ITRF/ Transfo-ITRF2014_ITRFs.txt
- Tregoning, P. ve Van Dam T. (2005) Atmospheric Pressure Loading Corrections Applied to GPS Data at the Observation Level. *Geophysical Research Letters*, 32, L22310. doi:10.1029/2005GL024104
- Wessel, P., W. H. F. Smith, R. Scharroo, J. Luis, and F. Wobbe (2013). Generic Mapping Tools: Improved Version Released, EOS Trans. AGU, 94(45), 409–410. doi:10.1002/2013EO450001