

Yer Kabuğu Hareketlerinin Belirlenmesinde Web Tabanlı Çevrimiçi GNSS Servislerinin Performans Analizi

Merve ŞİMŞEK^{1*}, Seda ÖZARPACI², Uğur DOĞAN^{3*}

¹Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, İstanbul
(mrve.smsek@gmail.com) ORCID ID 0000 – 0001 – 6198 – 171X

²Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, İstanbul
(seda.ozarpaci@gmail.com) ORCID ID 0000 – 0002 – 1900 – 3725

³Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, İstanbul
(dogan@yildiz.edu.tr) ORCID ID 0000 – 0003 – 0927 – 0886

Öz

Bu çalışmada, web tabanlı çevrimiçi değerlendirme servislerinin tektonik uygulamalarda kullanılabilirliği ve doğruluk performanslarının ölçülmesi amaçlanmıştır. Bu amaç kapsamında, 23 Ekim 2011 Van depreminin deprem anı yatay deformasyonlarının belirlenmesi için deprem bölgesinde bulunan TUSAGA-AKTİF ağına ait 12 GNSS istasyonunun gözlem verisi web tabanlı çevrimiçi değerlendirme servislerinden AUSPOS, OPUS ve CSRS-PPP ile analiz edilmiştir. Web tabanlı çevrimiçi değerlendirme servislerinin doğruluk performanslarını ölçmek için, aynı istasyonların verileri GAMIT/GLOBK yazılımı ile değerlendirilip deprem anı yatay deformasyonlar belirlenerek iki çözüm arasındaki sonuçlar karşılaştırılmıştır.

GAMIT/GLOBK yazılımından elde edilen deprem anı yatay deformasyonlar ile belirtilen servislere göre elde edilen sonuçlar incelendiğinde, istasyonların yer değiştirme vektör büyüklükleri ve yönleri bakımından uyumlu olduğu, iki çözüm arasındaki yatay deformasyon farklarının istatistiksel olarak anlamsız olduğu saptanmıştır. Ayrıca, her iki çözüm ile elde edilen deprem anı yatay deformasyonlar kullanılarak iki boyutlu gerinim analizi yapılmıştır. Gerinim analizi sonucunda çözümlerden elde edilen asal gerinim parametrelerinin genel olarak uyumlu oldukları ve asal gerinim parametreleri arasındaki farkların 0.04 μ strain değerinin altında olduğu görülmüştür.

Elde edilen sonuçlara göre, sürekli istasyonların, web tabanlı çevrimiçi değerlendirme servisleri tarafından elde edilen koordinat çözümleri tektonik çalışmalarda kullanılacak düzeyde yüksek doğrulukta olduğu saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: 23 Ekim 2011 Van Depremi, Deprem Anı Deformasyonu, GAMIT/GLOBK, Gerinim Analizi, Web Tabanlı Çevrimiçi GNSS Değerlendirme Servisleri

Performance Analysis of Web-Based Online GNSS Services in Determination of Crustal Movements

Abstract

In this study, to measure usability and accuracy performances of web based online GNSS processing services in tectonic studies is aimed. In this scope, for the determination of the horizontal deformations of Van earthquake, October 23th, 2011, the observation data of 12 GNSS stations which belong to TUSAGA-Active network in the earthquake zone were analyzed with AUSPOS, OPUS and CSRS-PPP from web based online

* Sorumlu Yazar

processing services. In order to examine the accuracy performances of web based online processing services, the data of the same stations were processed using GAMIT/GLOBK software and the horizontal co-seismic deformation were calculated and the results were compared.

When the difference between co-seismic horizontal deformations required from GAMIT/GLOBK software and the online processing services were examined, it was found that the differences are statistically insignificant and the displacement vector sizes and directions are compatible. In addition, two-dimensional strain analysis was performed by using co-seismic horizontal deformation obtained by both solutions. As a result of the strain analysis, it was seen that the principal strain parameters obtained from the solutions were generally compatible and the differences between the principal strain parameters were below the value of 0.04 µstrain. According to the results obtained, it was found that, the coordinate solutions of the continuous stations obtained by the web based online evaluation services, were highly accurate to be used in tectonic studies.

Keywords: October 23th 2011 Van earthquake, Co-seismic Deformation, GAMIT/GLOBK, Strain Analysis, Web Based Online GNSS Processing Service

1. GİRİŞ

Günümüzde gelişen teknolojiye bağlı olarak GNSS (Global Navigation Satellite System) veri işleme metodolojisindeki gelişmeler sayesinde konum belirleme konusunda kullanıcılara yeni kolaylıklar sunulmaktadır. Bu doğrultuda çeşitli araştırma merkezleri, üniversiteler ya da kurumlar web tabanlı çevrimiçi GNSS veri analizi servisleri geliştirmişlerdir. Bu çevrimiçi veri değerlendirme servislerinin genellikle ücretsiz olması, kullanım için internet bağlantısı ve web tarayıcısının yeterli olması, kullanıcıdan minimum seviyede veri ve bilgi alacak şekilde tasarlanmış olması, yaygın olarak kullanımlarının artmasına neden olmaktadır (Tsakiri, 2008; Subaşı, 2011; Bahadur ve Üstün, 2014; Mahmoud, 2018).

Ayrıca, bu çevrimiçi veri değerlendirme servislerinin bir kısmı noktaların mutlak anlamda konumlarını belirleyen PPP (Precise Positioning System) ve diğer bir kısmı da bağıl yöntemle konum belirleyen tekniklerle koordinat hesaplanmasına olanak sağlamaktadır. Her iki tekniği kullanan çevrimiçi servislerin performanslarını incelemeye yönelik birçok çalışma gerçekleştirilmiştir (Ghoddousi ve Dare , 2006; Tsakiri, 2008; Subaşı ve Alkan, 2011; Ocalan, vd., 2013; Doğru, vd., 2018).

Ghoddousi ve Dare 2006'da, bir istasyonun bilinen koordinatları ile CSRS-PPP, Auto-GIPSY, SCOUT ve AUSPOS değerlendirmeleri sonucunda hesaplanan koordinatları karşılaştırmış ve 10 saatlik veri seti için çift frekanslı alıcı kullanılarak

güvenilir sonuçlar elde edilebileceği sonucuna ulaşmıştır.

Tsakiri, 2008 yılında yaptığı çalışmada; 8 IGS istasyonuna ait gözlem verisini, 24, 6 ve 1'er saatlik ölçme aralıklarına bölerek, farklı veri süreleriyle, OPUS, AUSPOS, SCOUT ve CSRS-PPP çevrimiçi servislerinin statik ve ayrıca CSRS-PPP'nin kinematik değerlendirme performanslarını incelemiştir. Bu çalışma sonucunda, 24 saatlik veri ile statik değerlendirmede 3-4 cm ve CSRS-PPP yardımıyla 30 saniyelik veri ile kinematik değerlendirmede 5-10 cm doğruluk sağlandığı gösterilmiştir.

Subaşı ve Alkan 2011'de İSKİ-UKBS ağına ait 6 sürekli istasyonun 24 saatlik verisini OPUS, SCOUT ve AUSPOS servislerinde değerlendirmiş ve birkaç cm doğrulukla noktaların konum ve yüksekliklerinin belirlenebileceğini göstermiştir.

Abdallah ve Schwieger, 2016'da yaptıkları çalışmada, Afrika'nın farklı bölgelerinde bulunan 6 istasyon için çevrimiçi PPP servislerinin (APPS-PPP, GAPS-PPP, CSRS-PPP) farklı ölçü süreleri ve farklı enlemlerdeki performanslarını karşılaştırmışlardır. CSRS-PPP ve APPS-PPP servislerinin ekvatorial bölgeler için en iyi çözümü verdiğini, GAPS-PPP servisinin ekvator bölgesinde kullanılmasının uygun olmadığını göstermiştir.

Ayrıca, web tabanlı çevrimiçi veri değerlendirme servislerinin, heyelanlar sonucu oluşan deformasyonların belirlenmesi ve yapı sağlığının izlenmesi gibi çalışmalarda kullanılabilirliği ile ilgili araştırmalar da yapılmıştır (Zhang vd., 2005; Wang ve Soler,

2012, 2013, 2015; Yigit, 2016; Aydın, vd., 2017).

Zhang vd., 2005'te yaptıkları çalışmada, AUSPOS yardımıyla deformasyon analizi için CORS (Continuously Operating Reference Stations – Sürekli Çalışan Referans İstasyonları) istasyonlarının kullanılabilirliğini incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre, AUSPOS tarafından 24 saatlik verilerin değerlendirilmesi ile elde edilen koordinat doğruluğunun 3-5 mm olarak bildirmiş ve bu doğruluğun deformasyon analizi için uygun olduğunu belirtmiştir.

Wang ve Soler 2012 yılında Porto Riko ve Virgin adalarında meydana gelen heyelanları 2 yıl boyunca incelemiş; tek GPS alıcısı ve web tabanlı konumlandırma servisi (OPUS) kullanarak heyelanların yatay doğrultuda cm doğrulukla izlenebileceğini göstermiştir.

Wang ve Soler 2013 yılında çökme hareketini izlemek için Houston'da kurulan CORS ağındaki GNSS verilerini hem OPUS hem GIPSY yardımıyla değerlendirmiş ve OPUS'un günlük verileri değerlendirme performansının düzeyde 1 cm'lik doğruluğa ulaştığını saptamıştır. Wang ve Soler 2015'te, Texas'taki bir çökme alanı ve Porto Riko, Ponce'daki bir heyelan alanında uzun süreli GNSS gözlemlerini kullanarak arazi çökmesini gözlemlemiştir. Alınan GNSS verilerini GIPSY/OASIS ve OPUS yardımıyla analiz etmiş ve iki değerlendirme sonucu arasında anlamlı bir farklılığın olmadığını gözlemlemiştir.

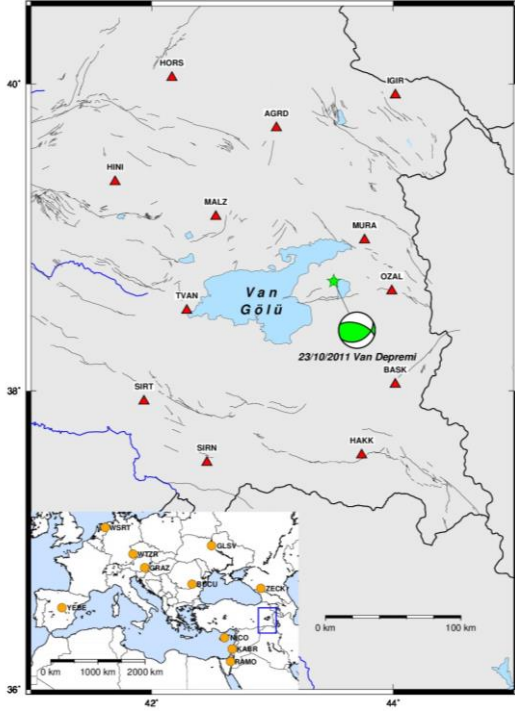
Bu çalışmada ise, web tabanlı çevrimiçi değerlendirme servisleri ile 23 Ekim 2011 (Mw = 7.2) Van depremi (Altınar, vd., 2013; Elliot, vd., 2013; Dogan, vd., 2014; Wang, vd., 2015; Tiryakioğlu, vd., 2017) sonucu bölgede meydana gelen deprem anı (co-seismic) yatay deformasyonların ve gerinim parametrelerinin belirlenmesi ve belirtilen servislerin doğruluk performanslarını ölçmek için GAMIT/GLOBK yazılımı ile değerlendirme sonuçlarının irdelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç kapsamında elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak web tabanlı çevrimiçi veri değerlendirme servislerinin tektonik çalışmalarda kullanılabilirliği incelenmiştir.

2. YÖNTEM

Web tabanlı çevrimiçi veri değerlendirme servislerinin tektonik çalışmalarda kullanılabilirliğini araştırmak ve bu kapsamda doğruluk performanslarını ölçmek için 23 Ekim 2011 (Mw = 7.2) Van Depremi örnek uygulama olarak seçilmiştir. Deprem sonucu bölgede meydana gelen deprem anı yatay deformasyonların belirlenmesi kapsamında Van ili ve çevresinde bulunan TUSAGA-Aktif ağına ilişkin 12 GNSS istasyonunun (Şekil 1) RINEX (Receiver Independent Exchange) verisi depremden bir gün önce (2011 yılı 295. GNSS günü – t_1) ve depremden bir gün sonra (2011 yılı 297. GNSS günü – t_2) AUSPOS, OPUS ve CSRS-PPP çevrimiçi servisleri ve GAMIT/GLOBK programı kullanılarak değerlendirilmiştir.

2.1. GNSS Ölçülerinin GAMIT/GLOBK Yazılımı ile Değerlendirilmesi

GNSS ölçüleri MIT (Massachusetts Institute of Technology-ABD) tarafından geliştirilen GAMIT/GLOBK GNSS yazılımı ile değerlendirilmiştir (Herring vd., 2015). GAMIT çözümü sonucu gözlem noktalarına ait istasyon koordinatları ile zenit gecikmeleri ve yer küre dönme parametreleri elde edilmiştir. Bu aşamada değerlendirmeye her çözüm günü için 10 IGS (International GNSS Service) istasyonu da dahil edilerek bölgesel ve küresel ağ ilişkilendirilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Van Gölü etrafındaki 12 TUSAGA – Aktif sürekli GNSS istasyonu (kırmızı üçgenler). Sol alt köşede gösterilen istasyonlar (turuncu yuvarlak istasyonlar) GAMIT/GLOBK değerlendirme işlemi sırasında referans olarak kullanılan IGS istasyonlarıdır. Gri süreksiz çizgiler aktif fay hatlarını (Emre vd., 2013), yeşil yıldız Van depreminin mekanizma çözümü ve odak noktasının yerini göstermektedir.

Değerlendirmenin GAMIT çözümü aşamasında aşağıdaki strateji izlenmiştir:

- Hassas yörünge bilgisi, IGS duyarlı yörünge bilgisi, Standard Ürün 3 (Standard Product 3 – SP3) olarak Scripps Institution of Oceanography (SIO) üzerinden Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC)'a ait <ftp://garner.ucsd.edu/pub/products> web adresinden alınmıştır.
- Yer dönme parametreleri (EOPS-Earth Orientation Parameters), USNO bull_b (United States Naval Observatory bulletin_b) değerlerinden alınmıştır.
- Tüm IGS istasyonlarının GNSS verileri SOPAC arşivinden; <ftp://garner.ucsd.edu/pub/rinex> yapısı içinden indirilmiştir.
- Referans sistemi tanımlamada ITRF2008 koordinat çözümü kullanılmıştır. (Web tabanlı

çevrimiçi değerlendirme servisleriyle aynı sistem kullanılmıştır.)

- Zenit gecikme bilinmeyenleri Saastamoinen öncül standart troposfer modeline dayalı olarak 2 saatlik aralıklarla hesaplanmıştır.
- Atmosferin kuru ve ıslak kısımları için GMF (Global Mapping Function) uygulanmıştır.
- Mapping function, eğim açısına bağlı olarak değişen sinyal yolu eğriliği için zenit gecikme değerlerinin modellenmesi için kullanılmıştır.
- Değerlendirmede L1 ve L2 taşıyıcı dalga fazlarının iyonosferden bağımsız LC (L3) doğrusal lineer kombinasyonu kullanılmıştır (Herring vd., 2015).

GAMIT sonucunda Q ve H adı verilen iki adet sonuç dosyası elde edilmektedir. Q-dosyasında, tam sayı belirsizliklerinin çözümü ve sonuçların hataları bulunur. Bu dosya sayesinde veri işlemin nasıl gerçekleştirildiği adım adım incelenebilmektedir. H-dosyalarında ise dengeleme sonrası türetilmiş ölçüler ve kovaryans matrisleri bulunmaktadır. Bu dosyalar veri işlemin diğer bir kısmı olan GLOBK için girdi oluşturmaktadır.

Veri işleminin GLOBK aşamasında ise, GAMIT ile her bir oturum için elde edilen H-dosyaları, küresel çözümlerle birleştirmek için genel veri merkezlerince oluşturulmuş günlük H-dosyaları ile beraber analiz edilmekte ve her bir istasyon için zaman serileri oluşturulmaktadır. Elde edilen zaman serileri yardımıyla her bir istasyonun kuzey-güney, doğu-batı ve düşey koordinat bileşenlerinin ve gerektiğinde baz bileşenlerinin zamana bağımlı değişimleri incelenebilmektedir (Herring vd., 2015).

2.2. GNSS Ölçülerinin Web Tabanlı Çevrimiçi Servisler ile Değerlendirilmesi

Bu çalışma kapsamında örnek olarak, bağlı yöntemle değerlendirme yapan OPUS ve AUSPOS çevrimiçi servisleri ve PPP yöntemi ile çözüm üreten CSRS-PPP çevrimiçi servisi kullanılmıştır.

National Geodetic Survey (NGS) tarafından işletilen OPUS (Online Positioning User Service) çevrimiçi veri değerlendirme servisi konumu belirlenecek ölçme noktasına en

yakın belirli sayıda IGS referans istasyonunu baz alarak bağıl yöntemle (hızlı-statik ve statik) ve PAGES yazılımı kullanarak değerlendirme yapmaktadır. Kullanıcılar ilgili servisin web adresine, ölçme noktasına ilişkin RINEX (Receiver Independent Exchange) formatındaki verisini yüklemekte ve değerlendirme sonucunda elde edilen analiz sonuçları kayıt anında belirtilen e-posta adresine gönderilmektedir (Tablo 1).

Geoscience Australia tarafından işletilen AUSPOS çevrimiçi veri değerlendirme servisi konumu belirlenecek ölçme noktasına uygun yakınlıktaki IGS referans istasyonlarını baz alarak bağıl yöntemle, IGS'in yayımlandığı duyarlı uydu yörünge ve saat bilgilerini ve Bernese 5.2 (Dach vd., 2015) yazılımını kullanarak değerlendirme yapmaktadır. Değerlendirme sonucunda sunulan raporda, referans alınan IGS istasyonları, ITRF08

datumundaki koordinatlar ile standart sapmaları verilmektedir. Bu rapor kullanıcının kayıt anında belirttiği e-posta adresine gönderilmektedir (Tablo 1).

Natural Resources Canada (NRCAN) tarafından geliştirilmiş CSRS-PPP çevrimiçi veri değerlendirme servisi ile, GNSS verileri statik veya kinematik olarak değerlendirilmektedir. Kullanıcılar ilgili servisin web adresine ölçme noktasına ilişkin RINEX formatındaki verilerini yüklemekte, yüksek doğruluğa sahip duyarlı uydu yörünge ve saat bilgileri kullanılarak PPP yöntemi ile nokta koordinatları hesaplanmaktadır.

Değerlendirme sonucunda elde edilen analiz sonuçları kayıt anında belirtilen e-posta adresine gönderilmektedir (Tablo 1)

Tablo 1. Web çevrimiçi veri değerlendirme servislerinin kullandıkları parametreler (Mulic vd., 2013; Jamiesen vd., 2018).

Parametreler	OPUS	AUSPOS	CSRS-PPP
Referans çerçeve	ITRF08	ITRF08	ITRF08
Koordinat formatı	Jeodezik /XYZ	Jeodezik /XYZ	Jeodezik /XYZ
Anten düzeltmesi	IGS	IGS	IGS
Uydu yörünge ve saat bilgisi	IGS	IGS	IGS
Uydu yükseklik açısı	10 derece	7 derece	10 derece
GNSS sistemi	GPS	GPS	GPS + GLONASS
Yazılım	PAGES	BERNESE	CRSS-PPP
Gözlem verisi	Çift frekans, statik	Çift frekans, statik	Tek ve Çift frekans, statik ve kinematik
Data transfer	e-posta	e-posta ve ftp	e-posta
Data formatı	RINEX 2.0, 2.11	RINEX 2.0, 2.11	RINEX 2.0, 2.11
Troposfer modeli	GMF	GMF	GMF

2.3. Gerinim Analizi

Gerinim, yeryuvarının bölgesel olarak farklı doğrultulardaki hareketi sonucu meydana gelen jeodezik bir problem olduğundan jeodezik gözlemlerle doğrudan ilişkilidir. Bu çalışmada GNSS ile elde edilen deprem anı yer değiştirme vektörleri kullanılarak 2-boyutlu gerinim parametreleri hesaplanmıştır.

Homojen gerinim teorisine göre bağıl konum değişim vektörü :

$$\begin{bmatrix} d_x \\ d_y \end{bmatrix} = (E + dR) \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

olarak verilmektedir (Kakkuri ve Chen, 1990). Burada, $dx=x_{t2} - x_{t1}$, $dy=y_{t2} - y_{t1}$ t_1 ve t_2 zamanlarda ölçülen bir noktanın konum değişimlerini, $[t_x \ t_y]^T$ tüm noktalar için geçerli olan katı blok kuvveti hareketi (öteleme), E simetrik gerinim tensörü, dR ters simetrik dönme tensörü ve $[x \ y]^T$ ise koordinatları göstermektedir.

Gerinim tensörü E , köşegen elemanları (e_{xx} , e_{yy}) koordinat eksenleri boyunca birim uzunlukta oluşan değişimi, köşegen dışındaki elemanları (e_{xy}) ise koordinat eksenlerine göre deformasyon sonucu ortaya çıkan küçük açısal bozulmaları tanımlar:

$$E = \begin{bmatrix} e_{xx} & e_{xy} \\ e_{xy} & e_{yy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Dönme tensörü dR , ilgili koordinat eksenlerini içeren düzlemde deformasyon nedeniyle oluşan katı bloğun diferansiyel dönmesini gösterir:

$$dR = \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Gerinim tensör parametreleri göz önüne alınarak maksimum ve minimum asal gerinim parametreleri (ϵ_{max} , ϵ_{min}) ile maksimum gerinim yönü (φ)

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{max} \\ \epsilon_{min} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left[(e_{xx} + e_{yy}) \pm \sqrt{(e_{xx} - e_{yy})^2 + 4e_{xy}^2} \right] \quad (4)$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{e_{xx} - e_{yy}}{2e_{xy}} \right) \quad (5)$$

olarak belirlenir (Prescott vd., 1976; Brunner, 1979; Feigl vd., 1997).

3. DEFORMASYONLARIN BELİRLENMESİ VE ANALİZ SONUÇLARI

Değerlendirmeler sonucu elde edilen bir i istasyonuna ilişkin kuzey-güney (x_i) ve doğu-batı (y_i) koordinat çözümleri arasındaki farklar

$$\begin{aligned} dx_i &= x_i(t_2) - x_i(t_1) \\ dy_i &= y_i(t_2) - y_i(t_1) \end{aligned} \quad (6)$$

olarak hesaplanıp bu istasyona ait deprem anı (co-seismic) yatay yer değiştirmeler bulunmuştur. Burada t_1 ve t_2 deprem öncesi ve sonrası zamanları göstermektedir.

GAMIT/GLOBK yazılımına göre yapılan değerlendirme sonuçlarına göre (Şekil 2,3 ve 4) en büyük yatay deformasyonun MURA noktasında meydana geldiği görülmektedir (kuzey-güney doğrultusunda -56.02 ± 4.05 mm, doğu batı doğrultusunda -21.83 ± 4.19 mm). Depremin olduğu bölgeden (Şekil 1 ve Şekil 5'te görülen yeşil yıldızlar depremin odak noktasının yerini göstermektedir) uzaklaştıkça deformasyon miktarlarının azaldığı görülmektedir. Örneğin, HINI noktasında kuzey-güney bileşeninde -5.41 ± 3.29 mm, doğu-batı bileşeninde 0.63 ± 3.75 mm yer değiştirme belirlenmiştir.

GAMIT/GLOBK yazılımı ile gerçekleştirilen değerlendirme sonucunda elde edilen deprem anı yatay deformasyonları doğru kabul edilerek, web tabanlı çevrimiçi GNSS değerlendirme servisleri kullanılarak elde edilen sonuçlar bu büyüklüklerle karşılaştırılmıştır.

Öncelikle, GNSS istasyonlarına ait veriler AUSPOS çevrimiçi veri değerlendirme servisi ile değerlendirilmiş ve sonuçlar GAMIT/GLOBK sonuçlarıyla

karşılaştırılmıştır (Şekil 2). Her iki çözümden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, istasyonların yer değiştirme vektör büyüklükleri ve yönleri bakımından uyumlu olduğu, bazı noktalarda (MURA, AGRD, OZAL) küçük dönüklükler olduğu görülmektedir (Şekil 2a). Bu dönüklüklerin iki çözüm arasındaki datum etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Ayrıca, AUSPOS ve GAMIT/GLOBK çözümlerinden elde edilen deformasyon büyüklüklerinin farkları da Şekil 2b'de verilmiştir. Şekil 2b'ye göre, iki farklı çözümden elde edilen yatay deformasyon büyüklüklerin kuzey-güney bileşeninde 0.29 – 6.21 mm, doğu-batı bileşeninde 0.78 – 4.00 mm arasında farklar bulunmuştur. İki çözüm arasında elde edilen en büyük fark HORS noktasında (kuzey-güney doğrultusunda 6.21 mm, doğu batı doğrultusunda 1.46 mm) iken en küçük fark BASK noktasında (kuzey-güney doğrultusunda 0.76 mm, doğu-batı doğrultusunda 0.78 mm) hesaplanmıştır. Belirlenen farkların istatistiksel olarak anlamsız olduğu görülmektedir (Şekil 2b).

İkinci olarak, GNSS istasyonlarına ait veriler OPUS çevrimiçi veri değerlendirme servisi ile analiz edilerek istasyonlara ilişkin deprem anı yatay yer değiştirme değerleri belirlenmiş ve GAMIT/GLOBK yazılımı ile yapılan değerlendirme sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır (Şekil 3). Her iki çözümden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, istasyonların yer değiştirme vektör büyüklükleri ve yönleri bakımından uyumlu olduğu, SORN istasyonu hariç diğer istasyonlarda vektörler arasında herhangi bir dönüklük olmadığı da görülmektedir (Şekil 3a).

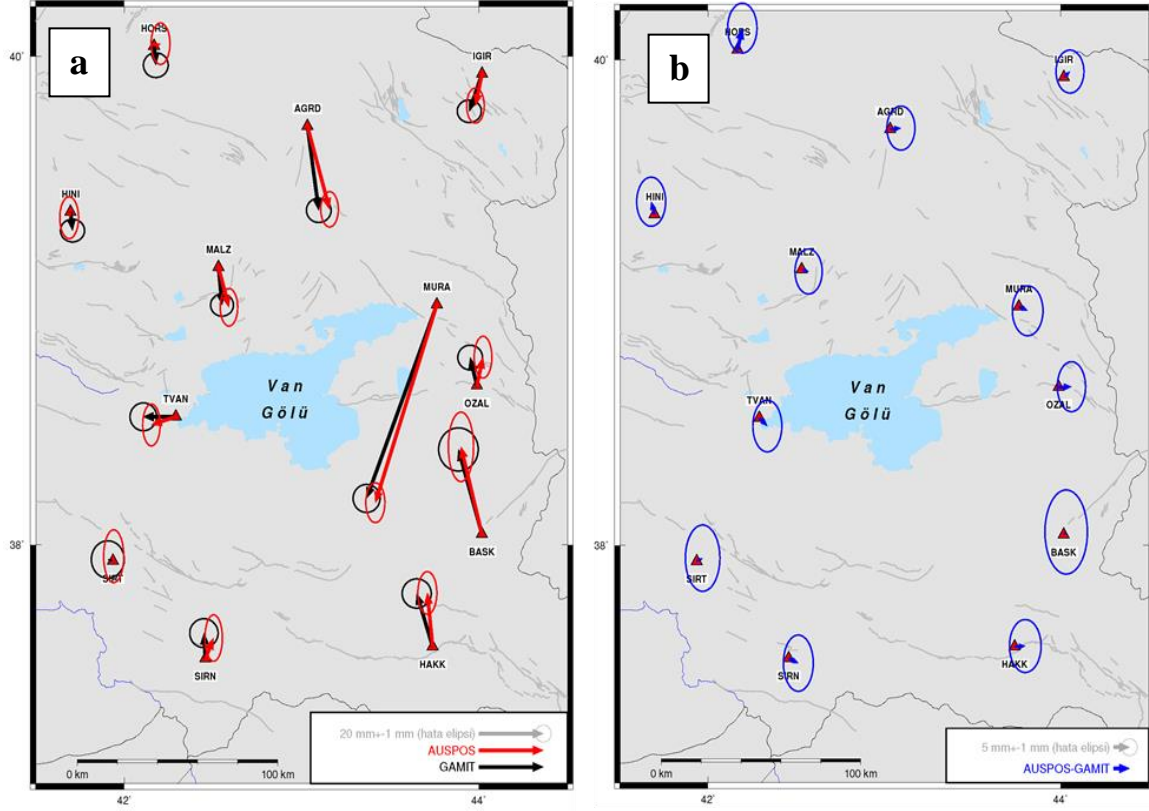
OPUS ve GAMIT/GLOBK çözümlerinden elde edilen deformasyon büyüklüklerinin farkları da Şekil 3b'de verilmiştir. Şekil 3b'ye göre, iki farklı çözümden elde edilen deformasyon büyüklüklerin kuzey-güney bileşeninde 0.61 – 7.92 mm, doğu-batı bileşeninde 0.05 – 3.15 mm arasında farklar bulunmuştur. İki çözüm arasında elde edilen en büyük fark SIRT noktasında (kuzey-güney doğrultusunda 7.92 mm, doğu-batı doğrultusunda -1.39 mm) iken en küçük fark IGIR noktasında (kuzey-güney doğrultusunda -0.03 mm, doğu-batı doğrultusunda -0.61 mm) hesaplanmıştır. Belirlenen farkların

istatistiksel olarak anlamsız olduğu görülmektedir (Şekil 3b).

Son olarak, TUSAGA-Aktif ağının istasyon verileri CRSS-PPP çevrimiçi veri değerlendirme servisi ile analiz edilerek istasyonlara ilişkin deprem anı yatay yer değiştirme değerleri, GAMIT/GLOBK yazılımıyla yapılan değerlendirme sonuçları ile birlikte Şekil 4'de gösterilmiştir. Her iki çözümden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, istasyonların yer değiştirme vektör büyüklükleri ve yönleri bakımından uyumlu olduğu, AUSPOS çözümünde de olduğu gibi, bazı noktalarda (MURA, AGRD, OZAL) küçük dönüklükler olduğu görülmektedir. Bu dönüklüklerin de iki çözüm arasındaki datum etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

CSRS-PPP ve GAMIT/GLOBK çözümlerinden elde edilen yatay deformasyon büyüklüklerinin farkları Şekil 4b'de verilmiştir. İki farklı çözümden elde edilen deformasyon büyüklüklerin kuzey-güney bileşeninde 0.04 – 2.61 mm, doğu-batı bileşeninde 0.44 – 6.19 mm arasında farklar bulunmuştur. İki çözüm arasında elde edilen en büyük fark TVAN noktasında (kuzey-güney doğrultusunda -1.94 mm, doğu-batı doğrultusunda 6.19 mm) iken en küçük fark HINI noktasında (kuzey-güney doğrultusunda 0.37 mm, doğu-batı doğrultusunda 0.44 mm) hesaplanmıştır. Belirlenen farkların istatistiksel olarak anlamsız olduğu görülmektedir (Şekil 4b).

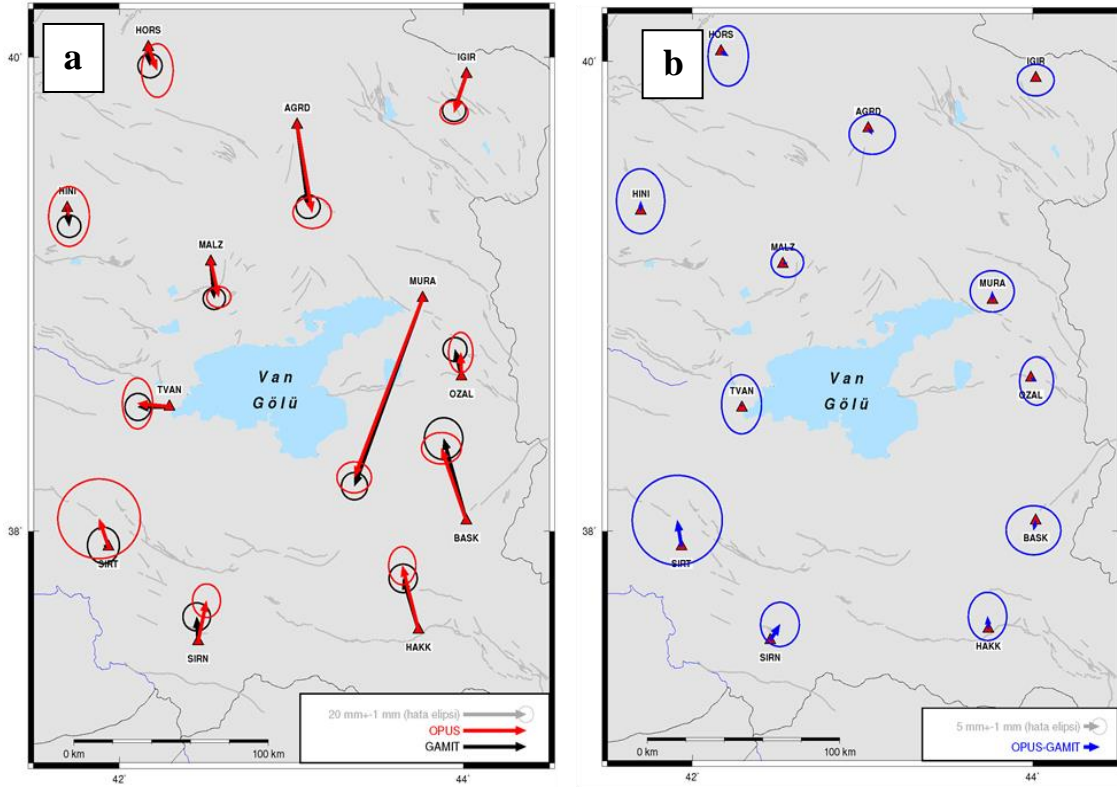
Koordinatlar seçilen datuma bağlı olarak belirlenen parametreler olduğundan dolayı, datumdan bağımsız bir parametre olan baz vektör uzunlukları ile çözüm sonuçları karşılaştırılarak, farklar incelenmiştir. Bu analiz için, hem çalışma bölgesine olan mesafesi hem de veri kalitesine bakılarak IGS istasyonlarından biri olan ZECK (URL1) istasyonu tercih edilmiştir. ZECK istasyonuna göre diğer istasyonlar arasındaki bazların depremden bir gün önce (2011, 295. GNSS günü) ve depremden bir gün sonra (2011, 297. GNSS günü) elde edilen değerleri arasındaki farklar hesaplanarak, her bir çözüm için bulunan sonuçlar Tablo 2' de verilmektedir.



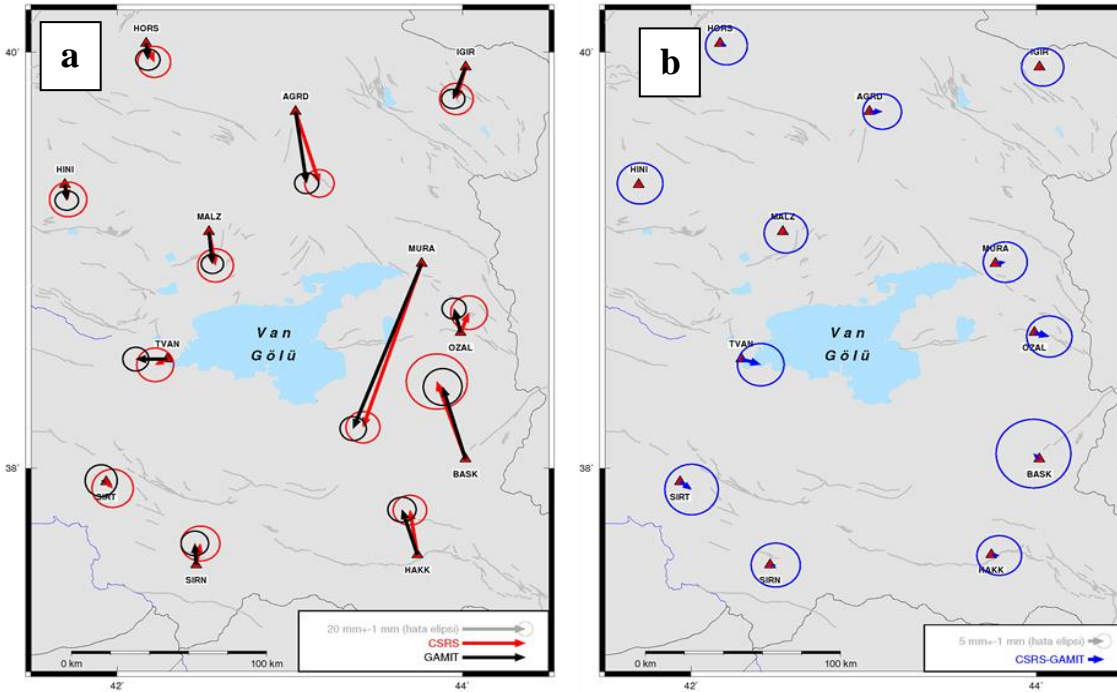
Şekil 2. a) AUSPOS ve GAMIT ile belirlenen deprem anı yatay yer değiştirme vektörleri ve hata elipsleri, b) iki çözüm arasındaki düzeltmeleri ve hata elipslerini, gri süreksiz çizgiler aktif fay hatlarını göstermektedir (Emre vd., 2013).

Tablo 2. Deprem anı baz değişimleri ve standart sapmaları

Bazlar	Baz değişimleri ve standart sapmaları (mm)			
	GAMIT/GLOBK	AUSPOS	OPUS	CSRS-PPP
ZECK – AGRD	24.17 ± 2.7	24.96 ± 3.1	26.49 ± 3.4	25.49 ± 3.2
ZECK – BASK	-25.11 ± 3.8	-25.42 ± 4.2	-22.95 ± 4.8	-28.14 ± 4.9
ZECK – HAKK	-16.29 ± 3.2	-15.46 ± 4.2	-19.83 ± 3.8	-15.31 ± 3.5
ZECK – HINI	4.89 ± 2.6	1.28 ± 3.2	2.31 ± 3.9	4.90 ± 3.7
ZECK – HORS	5.37 ± 2.7	7.06 ± 3.2	7.09 ± 3.9	6.55 ± 3.8
ZECK – IGIR	8.15 ± 2.4	8.86 ± 3.5	9.04 ± 3.7	8.70 ± 3.4
ZECK – MAZL	10.83 ± 2.4	12.07 ± 2.9	10.98 ± 4.2	11.59 ± 4.0
ZECK – MURA	45.54 ± 2.7	48.13 ± 4.1	43.74 ± 4.5	46.40 ± 4.2
ZECK – OZAL	-8.87 ± 2.7	-7.48 ± 3.4	-7.37 ± 4.2	-5.93 ± 2.9
ZECK – SIRN	-7.63 ± 3.1	-5.74 ± 3.6	-11.44 ± 4.7	-7.18 ± 3.4
ZECK – SIRT	-0.06 ± 4.3	-1.00 ± 4.2	-9.16 ± 5.3	0.45 ± 3.9
ZECK – TVAN	1.36 ± 3.0	1.80 ± 4.4	-2.35 ± 5.1	1.41 ± 3.4



Şekil 3. a) OPUS ve GAMIT ile belirlenen deprem anı yatay yer değiştirme vektörleri ve hata elipsleri, b) iki çözüm arasındaki düzeltmeleri ve hata elipslerini, gri süreksiz çizgiler aktif fay hatlarını göstermektedir (Emre vd., 2013).



Şekil 4. a) CSRS ve GAMIT ile belirlenen deprem anı yatay yer değiştirme vektörleri ve hata elipsleri, b) iki çözüm arasındaki düzeltmeleri ve hata elipslerini, gri süreksiz çizgiler aktif fay hatlarını göstermektedir (Emre vd., 2013).

Tablo 2'ye göre; GAMIT/GLOBK ile AUSPOS çözümlerinden elde edilen

deformasyon büyüklükleri arasında maksimum 3.61 mm, GAMIT/GLOBK ile OPUS çözümlerinden elde edilen deformasyon büyüklükleri arasında maksimum 9.10 mm ve GAMIT/GLOBK ile CSRS-PPP çözümlerinden elde edilen deformasyon büyüklükleri arasında maksimum 3.03 mm olarak bulunmuştur. Genel olarak, AUSPOS ile CSRS-PPP çözümünden elde edilen baz değişimleri arasındaki farkların daha uyumlu olduğu görülmektedir.

Çalışma kapsamında kullanılan TUSAGA-Aktif GNSS istasyonlarına ait GNSS verileri web tabanlı çevrimiçi veri değerlendirme servislerinden AUSPOS, OPUS ve CSRS-PPP ile analiz edilerek bölgeye ilişkin deprem anı yatay yer değiştirme değerlerinden 2-boyutlu gerinim analizi yapılmıştır. Web tabanlı çevrimiçi veri değerlendirme servislerinin sonuçlarından elde edilen deprem anı gerinim parametreleri, GAMIT/GLOBK yazılımı ile elde edilen 2-boyutlu deprem anı gerinim parametreleri ile karşılaştırılarak, çevrimiçi servislerden elde edilen sonuçların doğruluk performanslarıyla ilgili analizler paylaşılmıştır.

Bölgeye ilişkin 2-boyutlu gerinim analizi için, analize konu olan istasyonların deprem anı deformasyonları ve doğruluk ölçütleri kullanılarak, delaunay yöntemine göre oluşturulan üçgenlerin ağırlık merkezi koordinatları yerel koordinat sistemine (kuzey-güney, doğu-batı) dönüştürülmüş ve gerinim parametreleri hesaplanmıştır.

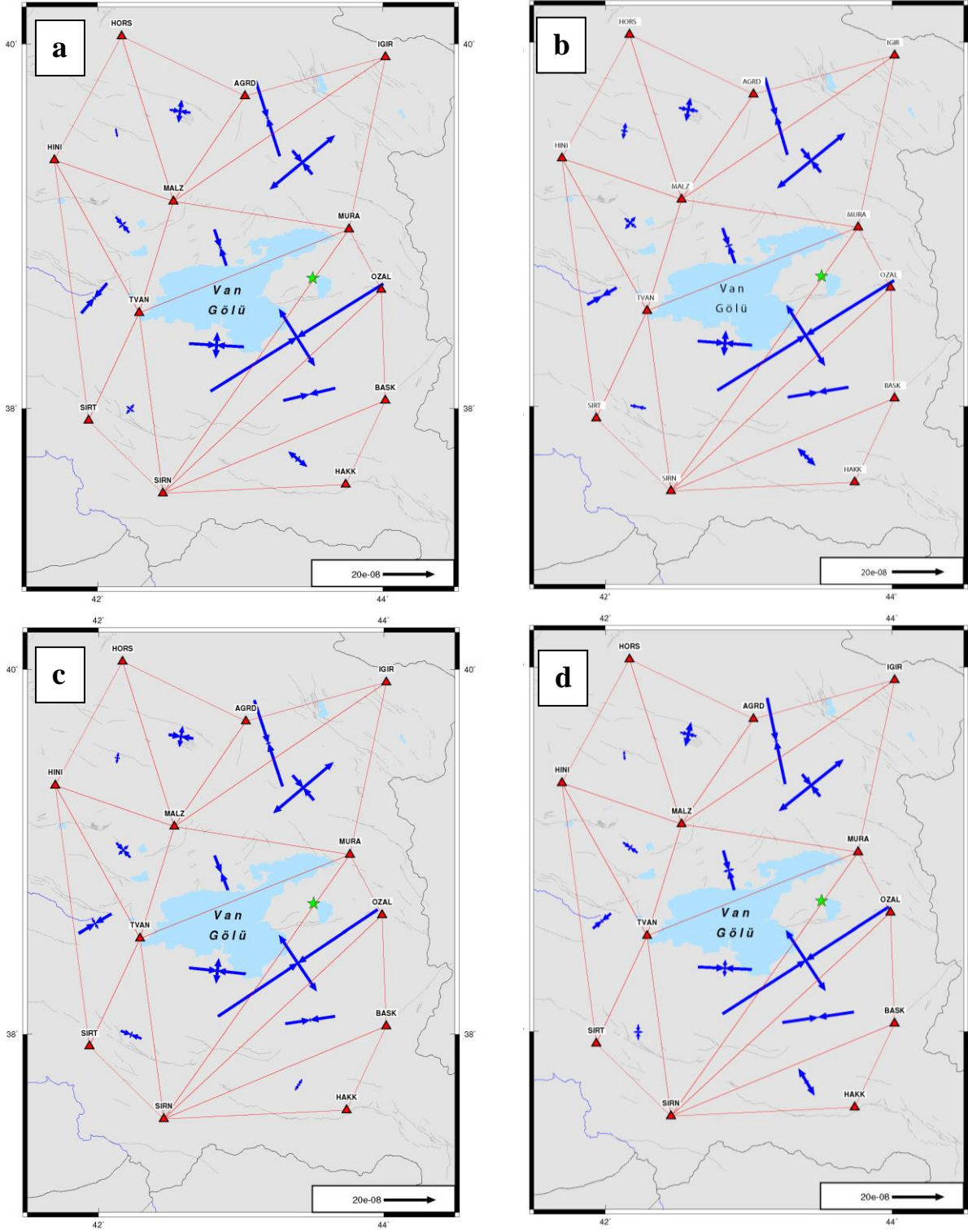
Hesaplanan gerinim parametreleri kullanılarak asal gerinim büyüklükleri belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 5’de verilmiştir.

Şekil 5’e göre, ana faya yakın kısımlarda sıkışmanın arttığı, faydan uzaklaştıkça gerinimin azaldığı görülmektedir. HINI-HORS-MALZ noktalarında oluşan üçgen üzerinde minimum gerinim gözlenirken ($\epsilon_{\max} = 0.05670$ μstrain , $\epsilon_{\min} = -0.01794$ μstrain), ana faya yakın olan bölgede bulunan MURA-OZAL-SIRN üçgeninde maksimum gerinim belirlenmiştir ($\epsilon_{\max} = 0.41122$ μstrain , $\epsilon_{\min} = -1.23651$ μstrain).

Ayrıca, en büyük maksimum asal gerinim MALZ-IGIR-MURA noktalarından oluşan üçgen eleman üzerinde 0.5133 μstrain , en büyük minimum asal gerinim MURA-OZAL-

SIRN noktalarından oluşan üçgen eleman üzerinde -1.2365 μstrain olarak bulunmuştur. En küçük gerinim değerleri ise SIRN-SIRT-TVAN noktalarından oluşan üçgen elemanda hesaplanmıştır ($\epsilon_{\max} = -0.0531$ μstrain , $\epsilon_{\min} = -0.0691$ μstrain) (Şekil 5).

GAMIT/GLOBK ve diğer web tabanlı çevrimiçi yazılımlara göre yapılan değerlendirme sonuçları incelendiğinde, çözümlerden elde edilen asal gerinim parametre değerlerinin genel olarak uyumlu oldukları (OPUS çözümünde BASK-SIRN-HAKK üçgeni hariç) ve asal gerinim parametreleri arasında 0.04 μstrain değerinin altında farklar olduğu belirlenmiştir. Buna karşın maksimum gerinim yönlerinde küçük farklılıklar görülmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Asal gerinim büyüklükleri. a) GAMIT b) AUSPOS c) OPUS ve d) CSRS-PPP ile elde edilen sonuçları, gri süreksiz çizgiler aktif fay hatlarını göstermektedir (Emre vd., 2013).

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, web tabanlı çevrimiçi değerlendirme servislerinin tektonik uygulamalarda kullanılabilirliği ve doğruluk performanslarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç kapsamında, AUSPOS, OPUS ve CSRS-PPP web tabanlı çevrimiçi değerlendirme servisleri ile 23 Ekim 2011 Van depreminin deprem anı yatay deformasyonlarının belirlenmesi amacıyla deprem bölgesinde bulunan TUSAGA-AKTİF ağına ait 12 GNSS istasyonu verisi kullanılmıştır. Ayrıca, web tabanlı çevrimiçi değerlendirme servislerinin doğruluk performanslarını ölçmek için, aynı istasyonların verileri GAMIT/GLOBK yazılımı ile değerlendirilerek deprem anı yatay deformasyon büyüklükleri belirlenmiştir.

Web tabanlı çevrimiçi değerlendirme servislerinden elde edilen sonuçlar ile GAMIT/GLOBK yazılımından elde edilen sonuçlar birlikte incelendiğinde, istasyonların yer değiştirme vektör büyüklükleri ve yönleri bakımından uyumlu olduğu belirlenmiştir. Servislerden ve GAMIT/GLOBK çözümlerinden elde edilen deformasyon büyüklüklerine ilişkin farkların istatistiksel olarak anlamsız olduğu saptanmıştır.

Datumdan bağımsız bir parametre olan baz vektör uzunluklarının deprem öncesi ve sonrası değerleri arasındaki farklar incelenmiştir. Bu analiz sonucunda, AUSPOS ile CSRS-PPP çözümünden elde edilen baz değişimleri arasındaki farkların GAMIT/GLOBK çözümleriyle daha uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Ayrıca, gerinim analizi çözümlerinden elde edilen asal gerinim parametrelerinin genel olarak uyumlu oldukları (OPUS çözümünde BASK-SIRN-HAKK üçgeni hariç) ve asal gerinim parametreleri arasındaki farkların 0.04 μ strain değerinin altında olduğu belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, sürekli istasyonların, web tabanlı çevrimiçi değerlendirme servisleri tarafından elde edilen koordinat çözümleri, tektonik uygulamalarda kullanılabilir yeterli doğruluğa sahip olduğu gösterilmiştir.

BİLGİLENDİRME

Bu çalışmada, Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü ve Harita Genel Müdürlüğü tarafından işletilen TUSAGA-Aktif ağına ilişkin GNSS verileri kullanılmıştır. Ayrıca tüm şekiller GMT (Generic Mapping Tools) yazılımı kullanılarak çizilmiştir (Wessel vd. 2013).

KAYNAKÇA

- Abdallah, A., Schwieger, V. (2016). Static GNSS precise point positioning using free online services for Africa. *Survey review*, 48 (306), 61–77.
- Altmer, Y., Söhne, W., Güney, C., Perlt, J., Wang, R. ve Muzli, M., (2013). A geodetic study of the 23 October 2011 Van, Turkey earthquake, *Tectonophysics*, 588, 118-134.
- Aydın C. , Uygur S.Ö., Çetin S., Özdemir A. ve Doğan U. (2017). Ability of GPS PPP in 2D deformation analysis with respect to GPS network solution. *Survey Review*. doi: 10.1080/00396265.2017.1415664
- Bahadır, B., Üstün, A. (2014). İnternet tabanlı Gns veri değerlendirme servisleri. *Harita Dergisi*, 80(152), 40-50.
- Brunner, F.K. (1979). On the analysis of geodetic network for the determination of the incremental strain tensor. *Survey Review*, 25, 56-67.
- Dach, R., Lutz, S., Walser, P., & Fridez, P. (2015). Bernese GNSS software version 5.2. User manual. Bern: Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publishing. doi:10.7892/boris.72297; ISBN: 978-3-906813-05-9.
- Doğru, A.D., Duman, H., Şanlı D.U., Berber M.M. (2018). Efficiency of OPUS-RS solutions. *Survey Review*, doi.org/10.1080/00396265.2017.1405495.
- Dogan, U., Demir, D., Cakır, Z., Ergintav, S., Ozener, H., Akoğlu, A.M., Nalbant, S.S. ve Reilinger, R. (2014). Postseismic deformation following the Mw 7.2 October 23, 2011 Van earthquake (Turkey): evidence for aseismic fault reactivation. *Geophys. Res. Lett.*, 41(7), 2334–2341.
- Elliott, J. R., Copley, A. C., Holley, R., Scharer, K. ve Parsons, B. (2013). The 2011 Mw 7.1 Van (Eastern Turkey) earthquake. *Journal of Geophysical Research*, 118 (4), 1619-1637.
- Emre, Ö., Duman, S. Ozalp, F. Tokay, Kuşçu, I. (2013). Active fault map of Turkey with explanatory text Rep. General Directorate of Mineral Research and Exploration, Ankara, Turkey.

- Feigl, K.N., King, R.W., Jordan, T.H. (1997). Geodetic Measurements of Tectonic Deformation in the Santa Maria Fault and Thrust Belt, California, *JGR*, 95, 2679-2699.
- Ghoddousi-Fard, R., Dare, P. (2006). Online GPS processing services: an initial study, *GPS Solutions*, 10(1), 12-20.
- Herring, T. A., King, R. W., Floyd, M. A., McClusky, S. C. (2015). GAMIT/GLOBK Reference Manual, Release 10.6.
- Jamieson, M., & Gillins, D. T. (2018). Comparative Analysis of Online Static GNSS Postprocessing Services. *Journal of Surveying Engineering*, 144(4), 05018002.
- Kakkuri, J. ve Chen, R. (1990). Four dimensional adjustment of the finnish first order triangulation: results of a test computation. *Lecture Notes in Earth Sciences*, 29, Springer Verlag.
- Mahmoud, K. (2018). Accuracy assessment of free web-based online GPS processing services and relative GPS solution software. *Journal of Geomatics*, 12(1), 82-88.
- Mulic, M., Krdzalic, D., Donlagic, E., ve Bilajbegovic, A. (2013) Possibilities and benefit of the online GNSS PPP free services for GNSS applications the accuracy and reliability. *United Nations/Croatia Workshop on the Applications of Global Navigation Satellite Systems*, Baska, Krk Island, Croatia.
- Ocalan, T., Erdogan, B., ve Tunalioglu, N. (2013). Analysis of web-based online services for GPS vd. Relative and Precise Point Positioning techniques. *Boletim De Ciencias Geodesicas*, 19(2), 191-207.
- Prescott, W.H. (1976). An extension of Frank's Method for obtaining crustal shear strains from survey data. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 66, 1847-1853.
- Subaşı, K., Alkan R.M. (2011). İnternet Tabanlı GPS Değerlendirme Servislerinin Doğruluk Analizi: İstanbul Örneği, 13. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı , 18-22 Nisan 2011, Ankara.
- Subaşı, H.K. (2011). İnternet-tabanlı gps değerlendirme servislerinin doğruluk ve performans analizi: İstanbul Örneği. (Yüksek Lisans Tezi). İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tiryakioğlu, İ., Yavasoglu H., Uğur, M. A., Ozkaymak, C., Yılmaz M., Kocaoglu, H., Turgut. (2016). B. Analysis of October 23 (Mw 7.2) and November 9 (Mw 5.6), 2011 Van Earthquakes Using Long-Term GNSS Time Series. *Earth Sciences Research Journal*, 21(3), 147-156.
- Tsakiri, M. (2008). GPS Processing Using Online Services. *Journal of Surveying Engineering*, 134(4), 115-125.
- Wang, G., Soler, T. (2012). OPUS for horizontal subcentimeter-accuracy landslide monitoring: case study in the Puerto Rico and Virgin Islands region. *Journal of Surveying Engineering*, 138 (3), 143-153.
- Wang, G., Soler, T. (2013). Using opus for measuring vertical displacements in Houston, Texas, *Journal of Surveying Engineering*, 139 (3), 126-134.
- Wang, C., Ding, X., Li, Q., Shan, X., Zhu, W., Guo, B. ve Liu, P. (2015). Coseismic and postseismic slip models of the 2011 Van earthquake, Turkey, from InSAR, offset-tracking, MAI, and GPS observations. *Journal of Geodynamics*, 91, 39-50.
- Wang, G., Soler, T. (2015). measuring land subsidence using GPS: ellipsoid height versus orthometric height. *Journal of Surveying Engineering*, 141 (2), 05014004.
- Wessel, P., Smith, W. H., Scharroo, R., Luis, J., & Wobbe, F. (2013). Generic mapping tools: improved version released. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 94(45), 409-410.
- Yigit, CO. (2016). Experimental assessment of post processed kinematic precise point positioning method for structural health monitoring. *Geomat Nat Hazards Risk*, 7, 363-380.
- Zhang, K., Hu, Y., Liu, G., Wu, F. ve Deakin, R. (2005). Deformation monitoring and analysis using victorian regional CORS data. *Journal of Global Positioning Systems*, 4(1+2), 129-138.
- URL1.
<https://sideshow.jpl.nasa.gov/post/links/ZECK.html> (indirme tarihi: 10.12.2018)