

GNSS Gözlem Süresine Bağlı Deformasyon Parametrelerinin Kestirimi

Fuat KAYA¹, Alpay ÖZDEMİR¹, Deniz ÖZDEMİR¹, Uğur DOĞAN^{1*}

¹Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, İstanbul
(endazyar@hotmail.com) ORCID ID 0000-0002-7167-6601
(alpayoz@yildiz.edu.tr) ORCID ID 0000-0002-1099-2002
(denizoz@yildiz.edu.tr) ORCID ID 0000-0003-3927-6912
(dogan@yildiz.edu.tr) ORCID ID 0000-0003-0927-0886

Öz

Bu çalışmada, GNSS ölçme süresinin deformasyon parametreleri (yer değiştirme, hız ve gerinim parametreleri) üzerindeki etkisinin araştırılması ve buna bağlı olarak doğruluk ölçütlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç kapsamında, TUSAGA-Aktif ağına ait 11 GNSS istasyonunun 2012.63 – 2017.63 yılları arasındaki 6 periyot gözlem verisi ölçme süresine (4, 6, 8, 12, 24 saat) bağlı olarak Bernese v5.2 yazılımı ile ITRF-08 referans sisteminde değerlendirilip istasyonlara ilişkin deformasyon parametreleri belirlenmiştir.

24 saat gözlem süresinden elde edilen deformasyon parametreleri doğru kabul edilerek, diğer gözlem sürelerinden elde edilen sonuçların doğruluk analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, istasyonların yer değiştirme vektörlerinin ve hızlarının büyüklük ve yön bakımından uyumlu olduğu, 24 saat gözlem süresinden elde edilen hızlar ile 12 saat gözlem süresinden elde edilen hızlar arasındaki farkların istatistiksel olarak anlamsız iken, 4, 6 ve 8 saat gözlem sürelerinden elde edilen hızlar arasındaki farkların istatistiksel olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir.

Ayrıca, farklı GNSS gözlem sürelerine (4, 6, 8, 12 saat) bağlı olarak elde edilen 2-boyutlu gerinim parametreleri 24 saatlik gözlem süresinden elde edilen parametreler ile karşılaştırılarak, GNSS gözlem süresinin gerinim parametreleri üzerindeki etkisi araştırılmış ve sonuçların doğruluk performanslarıyla ilgili analizler paylaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: GNSS, yer değiştirme vektörü, hız, gözlem süresi, gerinim parametreleri

Estimation of Deformation Parameters Based on GNSS Session Duration

Abstract

In this study, it is aimed to research the effect of GNSS observing-session duration on deformation parameters (displacement, velocity and strain parameters) and correspondingly determining the accuracy parameters. In this scope, the deformation parameters of 11 GNSS stations which belong to TUSAGA-Active network were determined 6 periods observation data (between 2012.63 and 2017.63 years) depend on observing-session duration (4, 6, 8, 12, 24 hours) by using Bernese v5.2 software in ITRF-08 reference system. The accuracy analysis of the results which obtained from observing-session duration data was determined using the deformation parameters obtained from 24 hour observation period were considered as true values. When the results are examined, it is determined that the displacement vectors and velocities of the stations in terms of size and direction are compatible. While the differences of velocities between obtained from the 24-hour observation period and the 12-hour observation period were statistically insignificant, it was determined that

* Sorumlu Yazar

the differences between the velocities obtained at the 4, 6 and 8 hours observation periods were statistically significant. Moreover, the effect of the GNSS observation duration on the strain parameters was investigated by comparing the 2-dimensional strain parameters obtained from the 24-hour observation period with different GNSS observation times (4, 6, 8, 12 hours) and the accuracy performance analysis of results was indicated.

Keywords: *GNSS, displacement vector, velocity, observing-session duration, strain parameters*

1. GİRİŞ

Günümüzde GNSS'in (Global Navigation Satellite System) sağlamış olduğu yüksek hassasiyetli konum belirleme doğruluğu sayesinde her türlü mühendislik yapılarındaki deformasyonların izlenmesi, tektonik levhalar arasındaki bağıl hareketlerin araştırılması ve bir depremin öncesi, anı ve sonrası yüzeyde meydana gelen yer değiştirmelerin belirlenmesi gibi çalışmalarda etkin bir uydu ölçme yöntemi olarak kullanılmaktadır (Reilinger vd., 2006; Dogan vd., 2014; Ergintav vd., 2014; Konca vd., 2018).

GNSS yöntemi kullanılarak yapılan deformasyon izleme çalışmalarında bölgesel veya yerel ölçekte kurulan jeodezik ağlar amaca uygun olarak sürekli veya kampanya tipi ölçme yöntemleri ile ölçülmektedir. Sürekli istasyonlar ile yapılan deformasyon izleme çalışmaları oluşan deformasyonların zamana bağlı anlık izlenmesi ve 24 saatlik veri ile elde edilen konum doğruluğu açısından avantajları olmasına rağmen, sürekli istasyonların kurulma ve işletme maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle her deformasyon izleme çalışmasında tercih edilememektedir.

Bundan dolayı, özellikle yerel ölçekte kurulan jeodezik ağlarda kampanya tipi ölçme yöntemi kullanılarak deformasyonlar izlenmektedir (Ozener vd., 2010; Dogan vd., 2014). Kampanya tipi ölçmelerde bütçe ve kampanya organizasyonuna bağlı koşullara göre (gün ışığından yararlanma vb.) kısa süreli ölçme zamanı (≤ 10 saat) seçilmektedir. Kampanya tipi ölçme yöntemiyle periyodik olarak ölçülen deformasyon ağlarının, kısa ölçme süreleri (≤ 10 saat) ve istasyonlardaki GNSS antenlerinin kurulmasında oluşabilecek insan kaynaklı sistematik hatalar nedeniyle sürekli istasyonlara göre daha büyük hatalara sahip olması beklenmektedir (Williams, 2003; Leonard vd., 2007; Demir ve Dogan, 2014).

Bir çok araştırmacı farklı yaklaşımlar kullanarak, yerel ve bölgesel deformasyon ağlarında GNSS ölçümlerinin doğruluğunun araştırılmasına yönelik bilimsel çalışmalar yapmıştır (Davis vd., 1989; Larson ve Agnew, 1991; Eckl vd., 2001; Snay vd., 2002; Soler vd., 2006; Dogan, 2007; Sanlı ve Kurumahmut, 2011). Betti vd. (1999), sürekli ölçme yöntemi ile veri toplanmayan farklı büyüklükteki ağlarda meydana gelen deformasyonların belirlenmesinde, GPS'in ölçme duyarlılığı (sensitivity) ve doğruluğu araştırılmıştır. Eckl vd. (2001)'de 10 günlük GPS verilerini kullanarak istasyonlar arasındaki baz uzunluğunun ve gözlem süresinin bir fonksiyonu olarak istasyonların konum doğruluğunu araştırmıştır. Firuzabadi ve King (2012), gözlem süresinin bir fonksiyonu olarak statik ölçümlerden elde edilen hassas istasyon konum doğruluğunun farklı datum tanımlarında nasıl değiştiğini incelemiştir. Ayrıca, Demir ve Dogan (2014)'de Marmara Sürekli GPS Ağına ilişkin 11 GPS istasyonunda GPS gözlem süresine bağlı olarak istasyon hızlarının nasıl değiştiğini göstermiştir. Akarsu (2012) ise gözlem süresinin (24, 12, 8 saatlik) GPS istasyonu hızlarının belirlenmesine olan etkisini araştırmıştır. Duman ve Şanlı (2019)'da çok uzun baz uzunluklarında 12 saatlik gözlem süresi ile yapılan GPS kampanyalarından elde edilen yatay hız alanının doğruluğunun 24 saatlik gözlem süresine göre %85 güven doğruluğuyla yaklaştığını belirtmişlerdir.

Bu çalışmada ise, farklı GNSS gözlem sürelerinin (4, 6, 8, 12, 24 saat) deformasyon parametreleri (yer değiştirme, hız ve gerinim parametreleri) üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç kapsamında, TUSAGA-Aktif (Türkiye Ulusal Sabit GPS Ağı-Aktif) ağının Karadeniz, Doğu ve Güney Anadolu bölgeleri içerisinde yer alan 11 GNSS istasyonuna ilişkin 6 yıllık GNSS (sadece GPS) verisi analiz edilerek bölgeye ait hız ve gerinim birikimi hakkında

bilgiler elde edilmiştir. 24 saatlik gözlem süresinden elde edilen parametreler doğru kabul edilerek diğer gözlem sürelerinden elde edilen deformasyon parametreleri karşılaştırılmıştır.

2. YÖNTEM

2.1. GNSS Ölçüleri ve Değerlendirilmesi

Bu çalışmada GNSS gözlem süresine bağlı olarak bir jeodezik ağdaki deformasyon parametrelerinin nasıl değiştiğini belirlemek amacıyla TUSAGA-Aktif ağına ait 11 istasyonun 2012 – 2017 yılları arasında 6 periyot ve her bir periyot için 3'er günlük verisi kullanılmıştır (Tablo 1).

GNSS ölçüleri Bern Üniversitesi (İsviçre) tarafından geliştirilen Bernese v5.2 yazılımı ile değerlendirilmiştir (Dach vd., 2015). Yer dönme parametreleri ve duyarlı GNSS yörüngeleri IGS (International GNSS Service)'in veri merkezinden, global GNSS istasyonun verileri ise SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center) arşivinden elde edilerek değerlendirmede kullanılmıştır. Bernese v5.2 akademik yazılımı ile değerlendirmede aşağıdaki işlem adımları uygulanmıştır (Demir, 2015):

- İyonosfer bağımsız frekansı (L3) ile tek istasyon konumlaması yapılarak her epokta alıcı saat hataları ve yeni istasyonlar için yaklaşık koordinatlar belirlenmiştir.
- Ölçülerdeki faz kesikliği (cycle slip), kaba hatalar ve uyumsuz ölçüler üçlü farklar oluşturularak kontrol edilmiştir ve bu işlem sonucunda kaba hatalı ölçüler atılmış, tamir edilebilen faz kesiklikleri düzeltilmiş ve düzeltilemeyen kesikliklere faz başlangıç belirsizliği (ambiguity) parametresi eklenmiştir.
- Kaba hatalı ölçüler atıldıktan sonra, iyonosfer bağımsız frekansı ile yeniden yapılan çözümde istasyonlara ilişkin yaklaşık koordinatlar güncellenmiştir. Bu koordinatlar bir sonraki adımdaki faz başlangıç belirsizliği parametrelerinin çözümünde kullanılmıştır.
- Faz başlangıç belirsizliği parametrelerinin çözümü için toplanan verilerin büyüklüğüne ve istasyonlar arasındaki baz uzunluğuna bağlı olarak QIF

(Quasi Ionosphere Free) stratejisi kullanılmıştır.

- Her istasyonda troposferik gecikme GMF (Global Mapping Function) modeline dayalı olarak 2 saat aralıklarla hesaplanan zenit gecikme parametresi belirlenerek elimine edilmiştir (Dach vd., 2015).

- Sonuç olarak gerçekleştirilen ağ dengelemesi aşamasında troposfer modeli olarak GMF kullanılarak istasyonlara ait dengeli bazlar, koordinatlar ve kofaktör matrisleri elde edilmiştir.

GNSS ölçülerinin değerlendirilmesinde, referans sistemi tanımı olarak ITRF-08 epok 2012.63 göz önüne alınarak koordinat çözümü gerçekleştirilmiştir. GNSS istasyonlarındaki deformasyonların belirlenmesi için hem çalışma bölgesine olan mesafesi hem de veri kalitesine bakılarak ZECK istasyonunun (URL1) belirtilen sistem ve epoktaki koordinatları üzerine sıkı koşul konularak (datum tanımı) ağı diğer istasyonlarının koordinatları belirlenmiştir.

Değerlendirme aşamasında her istasyonun her bir yıla ait 3 günlük GNSS verisi 4, 6, 8,12 ve 24 saatlik periyotlara bölünerek, bir oturum şeklinde ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Ağ dengelemesi sonucu elde edilen koordinatlar ve bunların kovaryans matrisleri kullanılarak her yıla ait 3 günlük değerlendirme sonuçları birleştirilerek tek bir koordinat değeri ve onun doğruluk bilgisi elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan örnek olarak 2012 yılına ilişkin tüm istasyonlar için hesaplanan tekrarlılık değerleri Şekil 1'de verilmektedir.

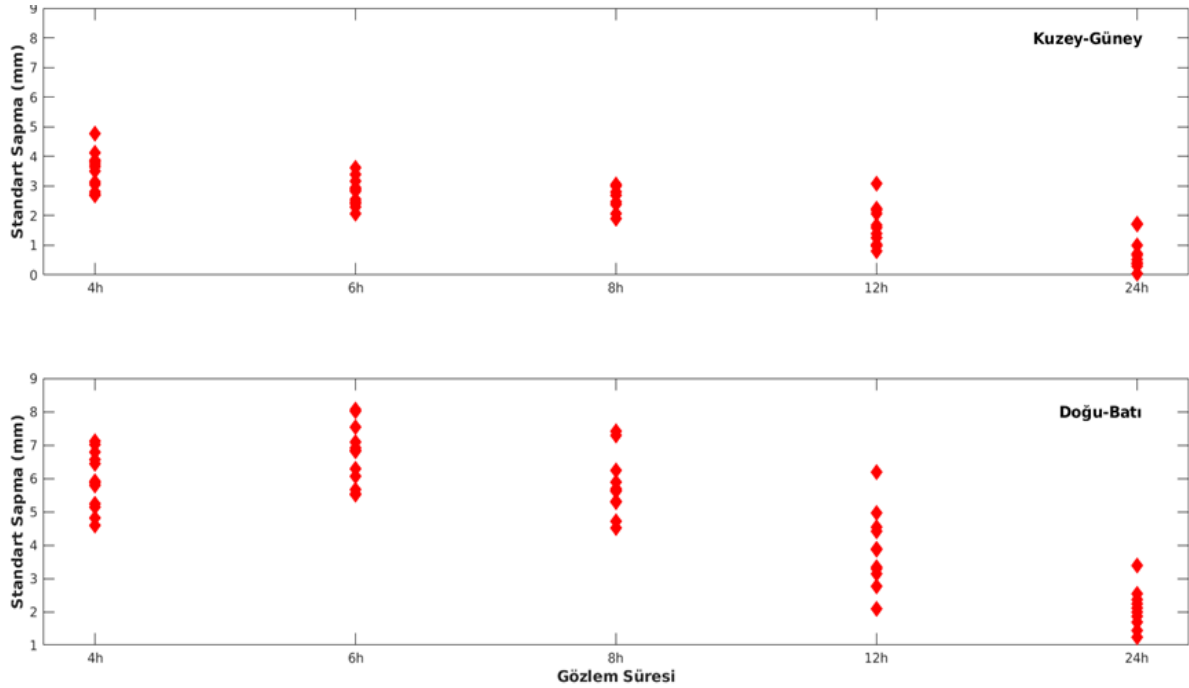
Şekil 1'e göre, genel olarak gözlem süresi arttıkça GNSS istasyonuna ait konum doğruluğunun arttığı görülmektedir. Kuzey-güney bileşende, 4 saat gözlem süresine göre elde edilen doğruluk 2-5 mm arasında değişirken, 24 saat gözlem süresine göre ise 2 mm'nin altında görülmektedir. Doğu-batı bileşende ise, 6 saat gözlem süresine göre elde edilen doğruluk daha düşük (5 - 9 mm) olarak elde edilirken, 24 saatlik gözlem süresine göre elde edilen doğruluk 3 mm'nin altında belirlenmiştir.

Kuzey-güney ve doğu-batı yönündeki koordinatlara ait standart sapma değerlerinin gözlem süresi azaldıkça arttığı görülmektedir.

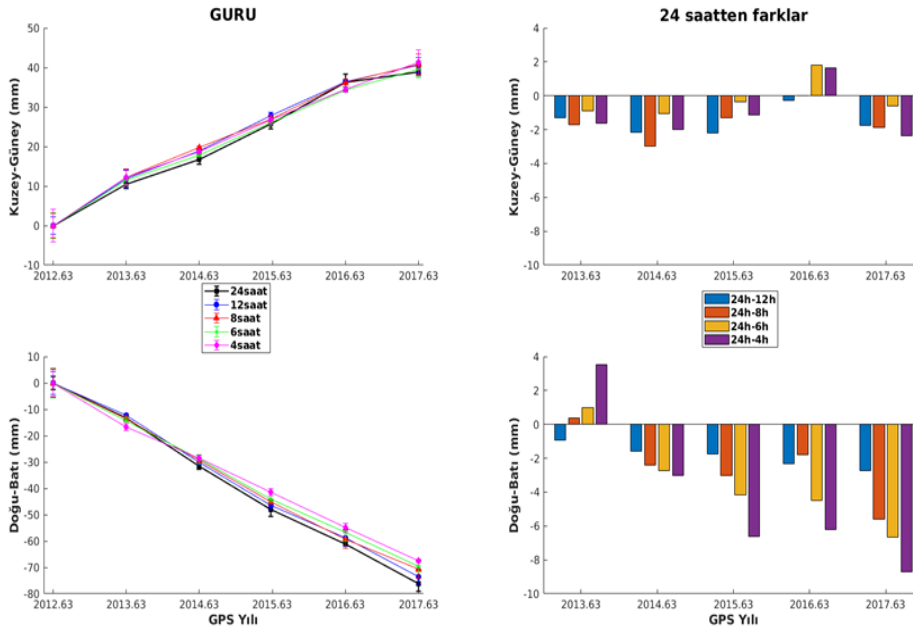
Tablo 1. GNSS istasyonları ve ölçme zamanları

İstasyon	Konum		Ölçme Zamanı (yıl)					
	Enlem(φ°)	Boylam(λ°)	2012.63	2013.63	2014.63	2015.63	2016.63	2017.63
ARPK	39.04059	38.48732	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
BING	38.88545	40.50078	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
DIVR	39.39432	38.10388	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
EKIZ	38.05883	37.18794	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
ELAZ	38.64467	39.25647	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
FEEK	37.81512	35.91233	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
GEME	39.18513	36.08085	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
GURU	38.71735	37.30787	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
SIVS	39.74370	37.00250	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
SSEH	40.16247	38.07490	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
TNCE	39.10967	39.54563	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
ZECK*	43.78839	41.56507	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx

xxx üç günlük GNSS verisini ve * global GNSS istasyonunu göstermektedir.



Şekil 1. Koordinat bileşenlerine ait standart sapma değerlerinin gözlem süresine bağlı olarak değişimi



Şekil 2. GURU istasyonunun yatay koordinat bileşenlerine ait zaman serisi ve GNSS gözlem süresine bağlı olarak elde edilen koordinat farkları

Bütün istasyonlara ilişkin gözlem süresine bağlı 2-boyutlu zaman serileri oluşturulmuş ve 24 saatten daha küçük gözlem sürelerine (4, 6, 8, 12 saatlik) göre hesaplanan yatay koordinat değişimlerinin 24 saat gözlem süresinden olan farkları belirlenmiştir. Bu analize ilişkin elde edilen sonuçlardan örnek olarak GURU istasyonu için belirlenen zaman serisi Şekil 2’de verilmektedir.

Şekil 2’de, 24 saat gözlem süresine göre GURU istasyonunun kuzey-güney bileşeni için ölçme periyotları arasında 40 ± 1 mm, doğu-batı bileşeni için ise -80 ± 3 mm yer değiştirme değeri belirlenmiştir. Belirlenen yer değiştirmelerin istatistiksel olarak %95 güven aralığına göre anlamlı oldukları görülmektedir. Ayrıca, 24 saat gözlem süresi ile diğer gözlem sürelerinden elde edilen koordinat bileşenleri arasındaki farklar incelendiğinde, kuzey-güney bileşeninde 3 mm’nin altında iken, doğu-batı bileşeninde ise 8 mm’nin altında farklar görülmektedir. Gözlem süreleri içerisinde en büyük farklar 4 saat gözlem süresinden, en küçük farklar ise 12 saat gözlem süresinden elde edilmiştir. Ayrıca, istasyonun doğu-batı bileşeninde gözlem süresinin koordinat değişimine olan etkisi daha net olarak görülmektedir.

2.2. GNSS Gözlem Süresine Bağlı Hız Kestirimi

Bir jeodezik ağın herhangi bir P istasyonunun koordinatlara göre hız modeli;

$$x_p(t) + v_p(t) = x_p(t_0) + u_p(t - t_0) \quad (1)$$

olur (Nocquet ve Calais, 2003). Burada, $x_p(t)$ t zamanında P istasyonunun konumu, $x_p(t_0)$ t_0 zamanında P istasyonunun kestirilen konumu, u_p P istasyonunun kestirilen hızını ve $v_p(t)$ düzeltme parametresini göstermektedir.

(1) no’lu eşitlikte verilen hız modeli kullanılarak en küçük kareler dengeleme yöntemiyle tüm istasyonların farklı gözlem sürelerine göre hızları kestirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 3’de gösterilmiştir. Şekil 3’e göre istasyon hızlarının homojen olduğu ve istasyonların kendi içinde tutarlı olarak saat yönünün tersi şeklinde doğudan batıya doğru yaklaşık 16.3 ± 0.6 mm/yıl’lık hızla hareket ettiği görülmektedir.

24 saatlik gözlem süresine göre yapılan değerlendirme sonuçlarına göre (Şekil 3) en büyük yatay hız GEME istasyonunda (kuzey-güney doğrultusunda 5.57 ± 0.40 mm, doğu-

batı doğrultusunda -18.58 ± 0.32 mm), en küçük yatay hızın ise SSEH istasyonunda (kuzey-güney doğrultusunda 5.90 ± 0.06 mm, doğu-batı doğrultusunda -11.34 ± 0.12 mm) meydana geldiği görülmektedir. Elde edilen sonuçların Ozdemir ve Karlıoğlu (2019)'nun yaptığı çalışma sonuçları ile de uyumlu olduğu görülmektedir.

Gözlem sürelerine göre elde edilen sonuçlar incelendiğinde, istasyonların yer değiştirme vektör büyüklükleri ve yönleri bakımından uyumlu olduğu, bazı istasyonlarda (ARPK, BING) küçük dönüklükler olduğu belirlenmiştir (Şekil 3). Bu dönüklükler 4 saatlik gözlem süresine göre belirlenen çözümlerde görülmektedir. 24 saatlik gözlem süresine göre gerçekleştirilen değerlendirme sonucunda elde edilen yatay hızlar doğru kabul edilerek, diğer gözlem sürelerine göre elde edilen sonuçlar bu büyüklüklerle karşılaştırılmıştır (Şekil 4).

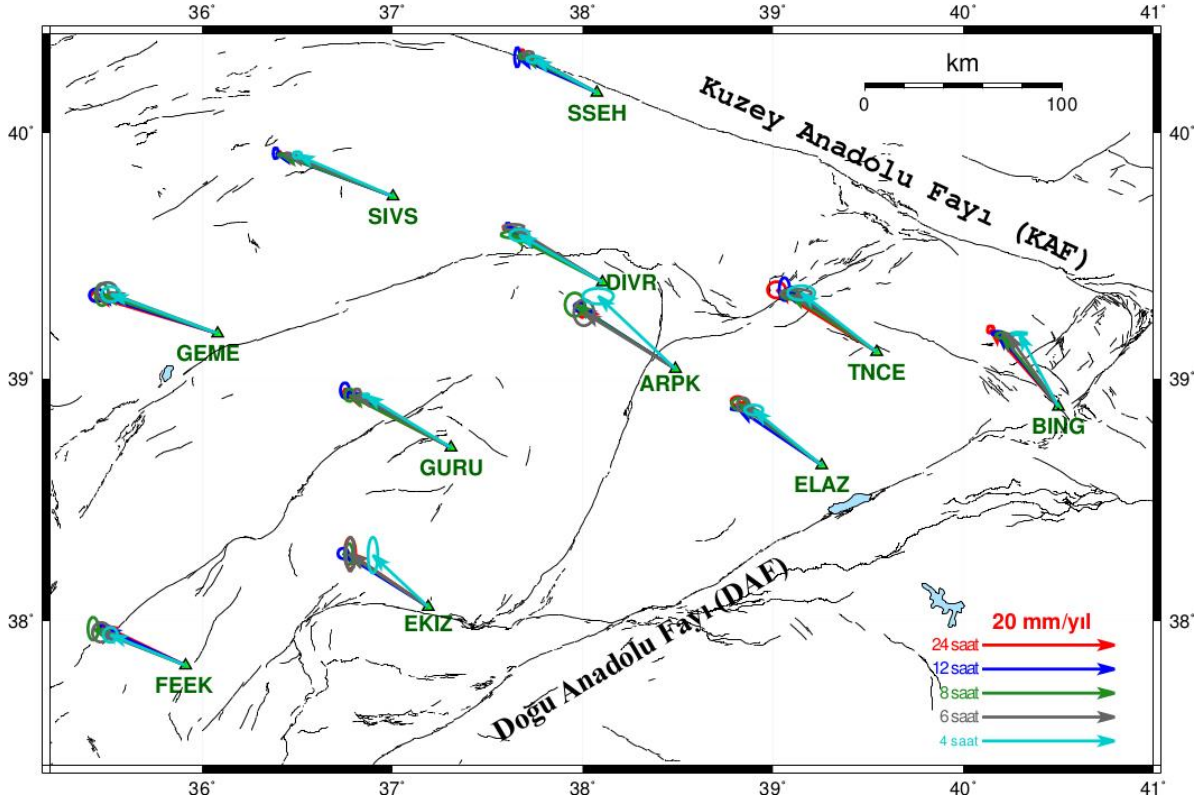
24 ve 4 saatlik gözlem süreleri ile gerçekleştirilen çözümlerden elde edilen istasyonlara ilişkin yatay hız vektörleri arasındaki büyüklüklerinin farkları Şekil 4.a'da verilmiştir. Şekil 4.a'ya göre, iki farklı çözümden elde edilen yatay hız vektörleri arasındaki farkın kuzey-güney bileşeninde mutlak olarak $0.20 - 2.03$ mm/yıl, doğu-batı bileşeninde mutlak olarak $1.32 - 4.30$ mm/yıl farklar hesaplanmıştır. İki çözüm arasında elde edilen en büyük fark BING istasyonunda (kuzey-güney doğrultusunda -4.30 mm/yıl, doğu batı doğrultusunda 0.58 mm/yıl) iken en küçük fark FEEK istasyonunda (kuzey-güney doğrultusunda 1.47 mm/yıl, doğu-batı doğrultusunda -1.32 mm/yıl) hesaplanmıştır. Ayrıca, bölgede tüm istasyonlar için belirlenen farkların istatistiksel olarak anlamlı olduğu da görülmektedir (Şekil 4.a).

24 ve 6 saatlik gözlem süreleri ile gerçekleştirilen çözümlerden elde edilen istasyonlara ilişkin yatay hız vektörleri arasındaki büyüklük farkları Şekil 4.b'de verilmiştir. Şekil 4.b'ye göre, iki farklı çözümden elde edilen yatay hız vektörlerinin kuzey-güney bileşeninde mutlak olarak $0.08 - 1.09$ mm/yıl, doğu-batı bileşeninde mutlak olarak $0.02 - 2.94$ mm/yıl değerleri arasında değişen farklar belirlenmiştir. İki çözüm arasında elde edilen en büyük fark TNCE

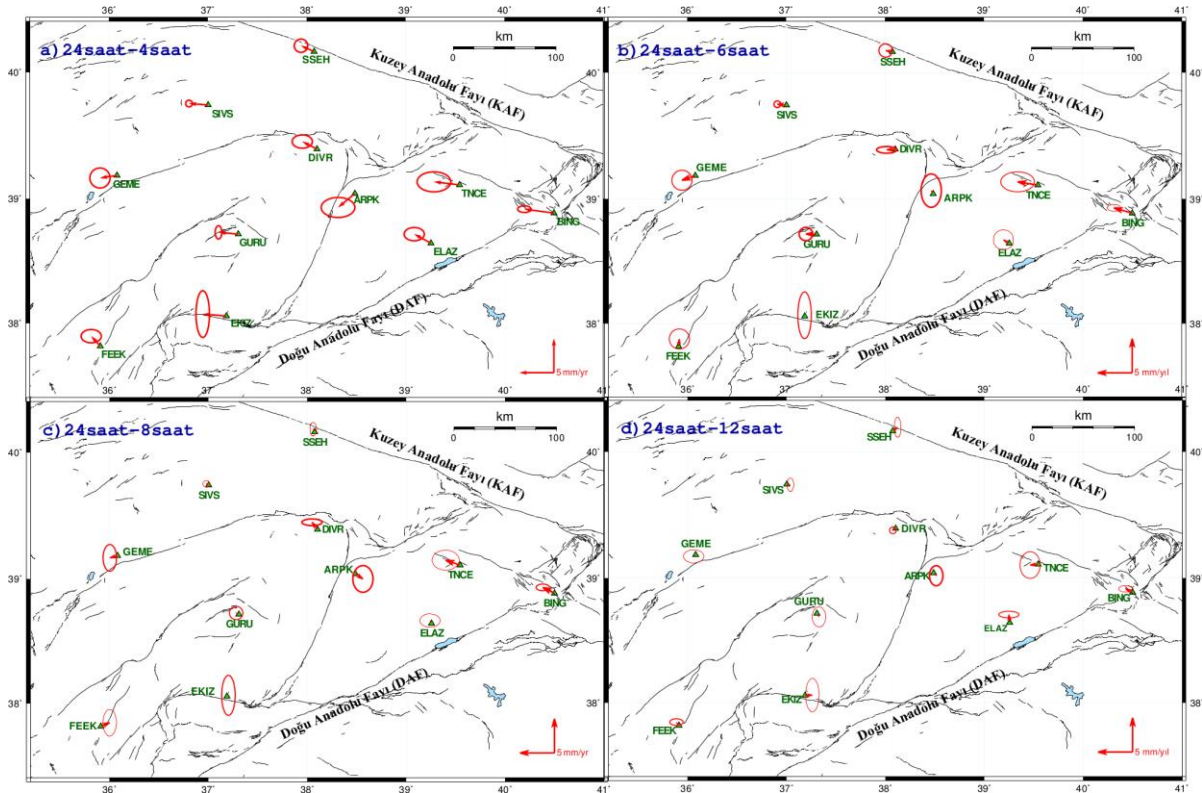
istasyonunda (kuzey-güney doğrultusunda 0.49 mm/yıl, doğu batı doğrultusunda -2.94 mm/yıl) iken en küçük fark EKIZ istasyonunda (kuzey-güney doğrultusunda 0.14 mm/yıl, doğu-batı doğrultusunda -0.02 mm/yıl) hesaplanmıştır. Ayrıca, bölgede BING, GEME, GURU ve TNCE istasyonlarında belirlenen farkların istatistiksel olarak anlamlı olduğu, diğer istasyonlarda ise belirlenen farkların istatistiksel olarak anlamsız olduğu da görülmektedir (Şekil 4.b).

24 ve 8 saatlik gözlem süreleri ile gerçekleştirilen çözümlerden elde edilen istasyonlara ilişkin yatay hız vektörleri arasındaki büyüklüklerin farkları Şekil 4.c'de verilmiştir. Şekil 4.c'ye göre, iki farklı çözümden elde edilen yatay hız vektörlerinin kuzey-güney bileşeninde mutlak olarak $0.20 - 1.04$ mm/yıl, doğu-batı bileşeninde mutlak olarak $0.21 - 2.10$ mm/yıl arasında farklar belirlenmiştir. İki çözüm arasında elde edilen en büyük fark BING istasyonunda (kuzey-güney doğrultusunda 0.87 mm/yıl, doğu batı doğrultusunda -1.70 mm/yıl) iken en küçük fark EKIZ istasyonunda (kuzey-güney doğrultusunda 0.14 mm/yıl, doğu-batı doğrultusunda 0.21 mm/yıl) hesaplanmıştır. Ayrıca, bölgede BING istasyonu hariç diğer istasyonlarda belirlenen farkların istatistiksel olarak anlamsız olduğu da görülmektedir (Şekil 4.c).

24 ve 12 saatlik gözlem süreleri ile gerçekleştirilen çözümlerden elde edilen istasyonlara ilişkin yatay hız vektörleri arasındaki büyüklüklerinin farkları Şekil 4.d'de verilmiştir. Şekil 4.d'ye göre, iki farklı çözümden elde edilen yatay hız vektörlerinin kuzey-güney bileşeninde mutlak olarak $0.04 - 1.17$ mm/yıl, doğu-batı bileşeninde mutlak olarak $0.11 - 1.18$ mm/yıl arasında değişen farklar belirlenmiştir. İki çözüm arasında elde edilen en büyük fark ELAZ istasyonunda (kuzey-güney doğrultusunda 1.17 mm/yıl, doğu batı doğrultusunda -0.11 mm/yıl) iken en küçük fark SIVS istasyonunda (kuzey-güney doğrultusunda -0.06 mm/yıl, doğu-batı doğrultusunda 0.51 mm/yıl) hesaplanmıştır. Ayrıca, bölgede tüm istasyonlarda belirlenen farkların istatistiksel olarak anlamsız olduğu da görülmektedir (Şekil 4.d).



Şekil 3. Gözlem sürelerine bağlı TUSAGA-Aktif istasyonlarına ait hız vektörleri ve hata elipsleri



Şekil 4. TUSAGA-Aktif istasyonlarının 24 saatlik veri değerlendirme sonucuna göre elde edilen yatay hızları doğru kabul edilerek 12 (Şekil 4.d), 8 (Şekil 4.c), 6 (Şekil 4.b) ve 4 (Şekil 4.a) saatlik veri değerlendirme sonucuna göre elde edilen yatay hızlar arasındaki farklar ve hata elipsleri

2.3. GNSS Gözlem Süresine Bağlı Gerinim (Strain) Analizi

Bir istasyonda zamana bağlı meydana gelen farklı deformasyon oranları ile istasyonun doğrusal hızını kestirmek mümkün olmaz. Bundan dolayı, istasyondaki zamana bağlı hareketleri göstermek için, yer değiştirme vektörleri kullanılarak gerinim tensörünün öz değer parametreleri analiz edilir. Böylece, yer değiştirme alanının davranışına ilişkin birçok bilgi gerinim tensöründen elde edilir.

Gerinim tensörü:

$$E = \begin{bmatrix} \frac{\partial n}{\partial x} & \frac{\partial n}{\partial y} \\ \frac{\partial d}{\partial x} & \frac{\partial d}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{xx} & e_{xy} \\ e_{xy} & e_{yy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

olarak tanımlanır (Prescott vd., 1976; Brunner, 1979; Teza vd., 2008). Burada, $n = x_{t2} - x_{t1}$, $d = y_{t2} - y_{t1}$, t_1 ve t_2 zamanlarında ölçülen bir istasyonun konum değişimlerini göstermektedir. e_{xx} ve 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.

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

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{max} \\ \varepsilon_{min} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left[(e_{xx} + e_{yy}) \pm \sqrt{(e_{xx} - e_{yy})^2 + 4e_{xy}^2} \right] \quad (3)$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2e_{xy}}{e_{xx} - e_{yy}} \right) \quad (4)$$

olarak belirlenir (Prescott vd., 1976; Brunner, 1979; Zakarevicius vd., 2008; Dogan vd., 2013).

Çalışma kapsamında kullanılan TUSAGA-Aktif GNSS istasyonlarına ait GNSS verileri analiz edilerek bölgeye ilişkin yatay yer değiştirme değerlerinden 2-boyutlu gerinim analizi yapılmıştır.

Bölgeye ilişkin 2-boyutlu gerinim analizi için, analize konu olan istasyonların yer değiştirme vektörleri ve doğruluk ölçütleri kullanılarak,

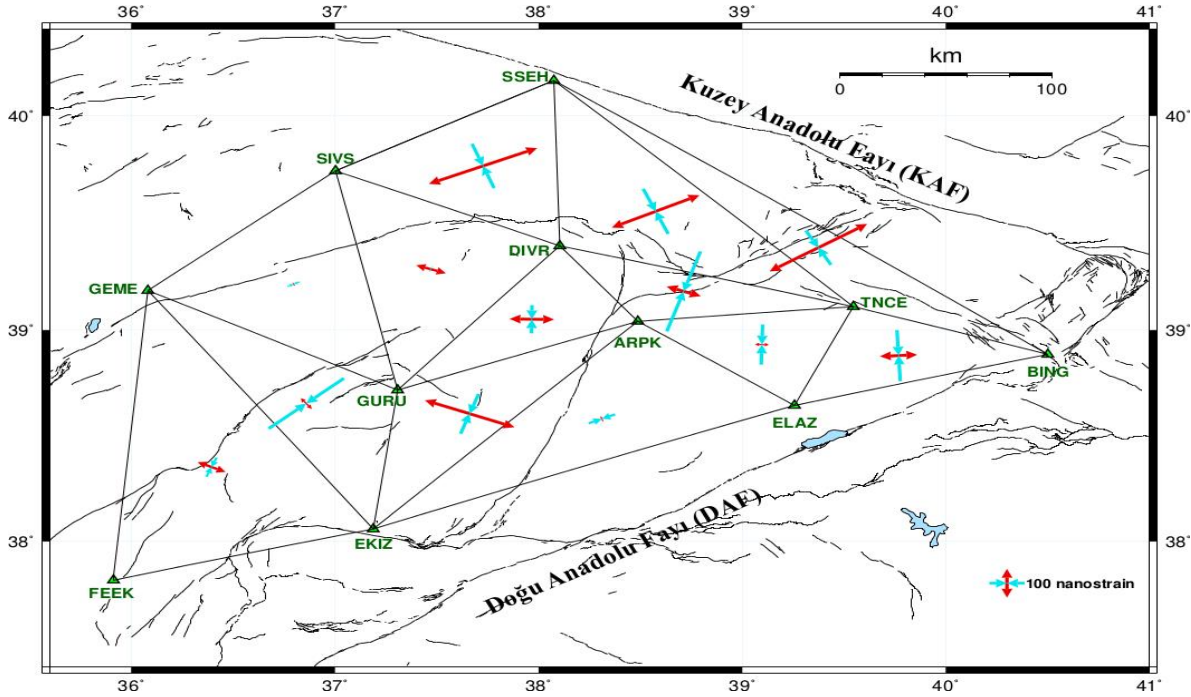
delaunay yöntemine göre oluşturulan üçgenlerin ağırlık merkezi koordinatları yerel koordinat sistemine (kuzey-güney, doğu-batı) dönüştürülmüş ve gerinim parametreleri hesaplanmıştır.

Farklı GNSS gözlem sürelerine (4, 6, 8, 12 saat) bağlı olarak elde edilen 2-boyutlu gerinim parametreleri, 24 saatlik GNSS verileri ile elde edilen gerinim parametreleri ile karşılaştırılarak, GNSS gözlem süresinin gerinim parametreleri üzerindeki etkisi araştırılmış ve elde edilen sonuçların doğruluklarıyla ilgili analizler paylaşılmıştır.

24 saatlik gözlem süresine göre hesaplanan gerinim parametreleri kullanılarak asal gerinim büyüklükleri belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 5'de verilmiştir. En büyük asal gerinim parametrelerinin BING-SSEH-TNCE üçgeninde 322.92 nstrain, en küçük asal gerinim parametresi ise SIVS-DIVR-GURU üçgeninde -15.312 nstrain olduğu görülmektedir.

Şekil 5'e göre, genel olarak KAF (Kuzey Anadolu Fayı) zonuna yaklaştıkça gerinim parametrelerinin genişleme davranışı, DAF (Doğu Anadolu Fayı) zonuna yaklaştıkça ise sıkışma davranışı gösterdiği görülmektedir. Doğu Anadolu ve Kuzey Anadolu fayları arasında kalan orta kısımda gerinim değerleri 126.44 nstrain (maksimum asal gerinim değeri) ve -98.05 nstrain (minimum asal gerinim değeri) olarak elde edilmiştir.

Genel olarak, bölgenin kuzeyinde (SIVS, SSEH, DIVR, TNCE, BING) kuzeydoğu-güneybatı (KD-GB) yönünde genişlediği ve kuzeybatı-güneydoğu (KB-GD) yönünde sıkıştığı görülmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. 24 saatlik veri değerlendirme sonuçlarına göre ait asal gerinim değerleri (Kırmızı oklar çekme, mavi oklar ise sıkışma olan bölgeleri göstermektedir.)

Ayrıca, diğer gözlem süreleri (4, 6, 8, 12 saat) kullanılarak asal gerinim büyüklükleri tekrar belirlenmiş ve 24 saatlik gözlem süresine göre belirlenen asal gerinim büyüklükleri ile karşılaştırmak için elde edilen sonuçlar Şekil 6'da gösterilmiştir.

24 ve 12 saatlik gözlem süreleri ile gerçekleştirilen çözümlerden elde edilen gerinim değerleri Şekil 6a'da verilmiştir. Şekil 6a'ya göre, iki çözüm arasında elde edilen en büyük fark $DIVR-ARPK-TNCE$ üçgeninde (-0.504 nstrain) iken en küçük fark $ARPK-ELAZ-EKIZ$ üçgeninde (-0.004 nstrain) hesaplanmıştır. 12 saatlik gözlem süresine göre elde edilen gerinim parametrelerinde özellikle $DIVR-TNCE-APRK$ ve $DIVR-ARPK-GURU$ üçgenlerinde 24 saatlik sonuca göre daha büyük genişleme parametrelerinin olduğu görülmektedir. Ayrıca, iki çözümden elde edilen sonuçlara göre belirli bölgelerde gerinim parametreleri arasında dönüklüklerin olduğu da saptanmıştır (Şekil 6a).

24 ve 8 saatlik gözlem süreleri ile gerçekleştirilen çözümlerden elde edilen gerinim değerleri Şekil 6b'de verilmiştir.

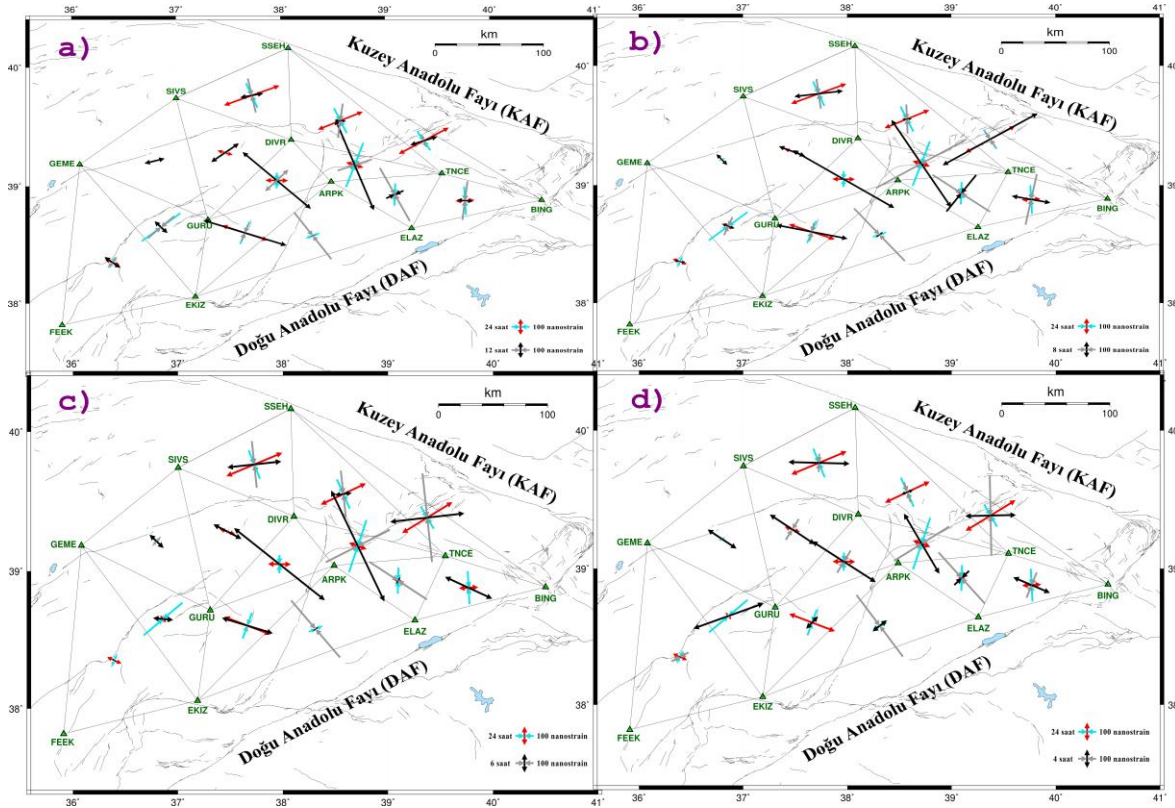
Şekil 6b'ye göre, iki çözüm arasında elde edilen en büyük fark $ARPK-GURU-DIVR$ üçgeninde (-0.544 nstrain) iken en küçük fark $GEME-EKIZ-FEEK$ üçgeninde (0.027 nstrain) hesaplanmıştır. 8 saatlik gözlem süresine göre elde edilen gerinim parametrelerinde özellikle $DIVR-TNCE-APRK$, $DIVR-ARPK-GURU$ ve $SSEHA-BING-TNCE$ üçgenlerinde 24 saatlik sonuçlara göre daha büyük genişleme parametrelerinin olduğu görülmektedir. Ayrıca, iki çözümden elde edilen sonuçlara göre belirli bölgelerde gerinim parametreleri arasında dönüklüklerin olduğu da saptanmıştır (Şekil 6b).

24 ve 6 saatlik gözlem süreleri ile gerçekleştirilen çözümlerden elde edilen gerinim değerleri Şekil 6.c'de verilmiştir. Şekil 6.c'ye göre, iki çözüm arasında elde edilen en büyük fark $DIVR-ARPK-TNCE$ üçgeninde (-0.560 nstrain) iken en küçük fark $ARPK-ELAZ-EKIZ$ üçgeninde (-0.015 nstrain) hesaplanmıştır. 6 saatlik gözlem süresine göre elde edilen gerinim parametrelerinde özellikle $DIVR-TNCE-APRK$ ve $DIVR-ARPK-GURU$ üçgenlerinde 24 saatlik sonuçlara göre daha büyük

genişleme değerlerinin olduğu, SSEH-BING-TNCE, ARPK-ELAZ-EKIZ ve ARPK-TNCE-ELAZ üçgenlerinde ise daha büyük sıkışma değerlerinin olduğu saptanmıştır. Ayrıca, iki çözümden elde edilen sonuçlara göre belirli bölgelerde gerinim parametreleri arasında dönüklüklerin olduğu da belirlenmiştir (Şekil 6c).

24 ve 4 saatlik gözlem süreleri ile gerçekleştirilen çözümlerden elde edilen istasyonlara ilişkin gerinim değerleri Şekil 6.d'de verilmiştir. Şekil 6.d'ye göre, iki

çözüm arasında elde edilen en büyük fark GEME-EKIZ-GURU üçgeninde (0.364 nstrain) iken en küçük fark ise SIVS-SSEH-DIVR üçgeninde (-0.008 nstrain) hesaplanmıştır. 4 saatlik gözlem süresine göre elde edilen gerinim parametreleri 24 saatlik sonuçlara göre farklı karakteristik özellikler göstermekte ve genel olarak iki çözümden elde edilen sonuçlar arasında uyumun olmadığı görülmektedir.



Şekil 6. 24 saatlik veri değerlendirme sonuçları ile 12 (Şekil 6.a), 8 (Şekil 6.b), 6 (Şekil 6.c) ve 4 (Şekil 6.d) saatlik veri değerlendirme sonucuna göre elde edilen asal gerinim değerleri (Kırmızı ve siyah renkli oklar çekme, mavi ve gri renkli oklar ise sıkışma olan bölgeleri göstermektedir.)

3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, GNSS ölçme süresinin deformasyon parametreleri (yer değiştirme, hız ve gerinim parametreleri) üzerindeki etkisi ve buna bağlı olarak doğruluk ölçütlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Bu amaç kapsamında, 11 adet TUSAGA-Aktif istasyonuna ait 24, 12, 8, 6 ve 4 saatlik veri değerlendirmesi sonucuna göre elde edilen yer değiştirme değerlerine bakıldığında genel olarak gözlem süresi arttıkça istasyon konum doğruluğunun arttığı görülmektedir. İstasyon hızlarının homojen olduğu ve istasyonların kendi içinde tutarlı olarak saat yönünün tersi şeklinde doğudan batıya doğru yaklaşık $16.3 \pm$

0.6 mm/yıl'lık hızla hareket ettiği belirlenmiştir. Bölgede tüm istasyonlar için 24 saatlik veri değerlendirme sonucu doğru kabul edilip, farklı gözlem sürelerine (4, 6 ve 8 saat) ait elde edilen hız değerleri arasındaki farkların istatistiksel olarak anlamlı olduğu; 12 saatlik gözlem süresine göre olan farkların ise istatistiksel olarak anlamsız olduğu belirlenmiştir.

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

24 saatlik veri değerlendirme sonuçlarından elde edilen gerinim parametrelerine göre KAF (Kuzey Anadolu Fayı) zonuna yaklaştıkça gerinim parametrelerinin genişleme davranışı, DAF (Doğu Anadolu Fayı) zonuna yaklaştıkça ise sıkışma davranışı gösterdiği görülmektedir. Genel olarak bölgedeki gerinim büyüklükleri gözlem sürelerine göre farklılıklar göstermektedir. Özellikle 4 saatlik gözlem süresine göre elde edilen gerinim parametreleri 24 saatlik sonuca göre farklı karakteristik özellikler göstermekte ve sonuçlar arasında uyumun olmadığı görülmektedir.

TEŞEKKÜR

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

Akarsu, V. (2012). Gözlem süresinin GPS Noktası hızlarının belirlenmesine olan etkisinin araştırılması, Doktora Tezi. İTÜ Fen Bilimleri Enst., İstanbul.

Betti, B., Biagi, L., Crespi, M., & Riguzzi, F. (1999). GPS sensitivity analysis applied to non-permanent deformation control networks. *Journal of Geodesy*, 73(3), 158-167.

Brunner, F. K. (1979). On the analysis of geodetic networks for the determination of the incremental strain tensor. *Survey Review*, 25(192), 56-67.

Dach, R., Lutz, S., Walser, P., & Fridez, P. (2015). *Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual*. Astronomical Institute, University of Bern, Bern.

Davis, J. L., Prescott, W. H., Svarc, J. L., & Wendt, K. J. (1989). Assessment of Global Positioning System measurements for studies of crustal deformation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B10), 13635-13650.

Demir, D. O., & Dogan, U. (2014). Determination of crustal deformations based on GPS observing-session duration in Marmara region, Turkey. *Advances in Space Research*, 53(3), 452-462.

Demir, D. O. (2015). 23 Ekim 2011 (Mw=7.2) Van depreminden kaynaklanan kabuk deformasyonlarının jeodezik yöntemlerle araştırılması, Doktora Tezi. YTÜ Fen Bilimleri Enst., İstanbul.

Dogan, U., Demir, D. O., Cakir, Z., Ergintav, S., Ozener, H., Akoglu, A. M., ... & Reilinger, R. (2014). Postseismic deformation following the Mw 7.2, 23 October 2011 Van earthquake (Turkey): Evidence for aseismic fault reactivation. *Geophysical Research Letters*, 41(7), 2334-2341.

Dogan, U., Oz, D., & Ergintav, S. (2013). Kinematics of landslide estimated by repeated GPS measurements in the Avcilar region of Istanbul, Turkey. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 57(2), 217-232.

Dogan, U. (2007). Accuracy analysis of relative positions of permanent GPS stations in the Marmara region, Turkey. *Survey Review*, 39(304), 156-165.

Duman, H., & Sanli, D.U. (2019). Assessment of geodetic velocities using GPS campaign measurements over long baseline lengths. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(3), 571-582.

Eckl, M. C., Snay, R. A., Soler, T., Cline, M. W., & Mader, G. L. (2001). Accuracy of GPS-derived relative positions as a function of interstation distance and observing-session duration. *Journal of geodesy*, 75(12), 633-640.

Ergintav, S., Reilinger, R. E., Çakmak, R., Floyd, M., Cakir, Z., Doğan, U., ... & Özener, H. (2014). Istanbul's earthquake hot spots: Geodetic constraints on strain accumulation along faults in the Marmara seismic gap. *Geophysical Research Letters*, 41(16), 5783-5788.

- Firuzabadi, D., & King, R. W. (2012). GPS precision as a function of session duration and reference frame using multi-point software. *GPS solutions*, 16(2), 191-196.
- Konca, A. O., Cetin, S., Karabulut, H., Reilinger, R., Dogan, U., Ergintav, S., ... & Tari, E. (2018). The 2014, M W6. 9 North Aegean earthquake: seismic and geodetic evidence for coseismic slip on persistent asperities. *Geophysical Journal International*, 213(2), 1113-1120.
- Larson, K. M., & Agnew, D. C. (1991). Application of the Global Positioning System to crustal deformation measurement: 1. Precision and accuracy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B10), 16547-16565.
- Leonard, L. J., Hyndman, R. D., Mazzotti, S., Nikolaishen, L., Schmidt, M., & Hippchen, S. (2007). Current deformation in the northern Canadian Cordillera inferred from GPS measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B11).
- Nocquet, J. M., & Calais, E. (2003). Crustal velocity field of western Europe from permanent GPS array solutions, 1996–2001. *Geophysical Journal International*, 154(1), 72-88.
- Ozener, H., Arpat, E., Ergintav, S., Dogru, A., Cakmak, R., Turgut, B., & Dogan, U. (2010). Kinematics of the eastern part of the North Anatolian Fault Zone. *Journal of geodynamics*, 49(3-4), 141-150.
- Ozdemir, S., & Karshioğlu, M. O. (2019). Soft clustering of GPS velocities from a homogeneous permanent network in Turkey. *Journal of Geodesy*, 1-25.
- Prescott, W. H. (1976). An extension of Frank's method for obtaining crustal shear strains from survey data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 66(6), 1847-1853.
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., ... & Nadariya, M. (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).
- Sanli, D. U., & Kurumahmut, F. (2011). Accuracy of GPS positioning in the presence of large height differences. *Survey Review*, 43(320), 162-176.
- Snay, R. A., Soler, T., & Eckl, M. (2002). GPS precision with carrier phase observations: does distance and/or time matter. *Prof Surv*, 22(10), 20-22.
- Soler, T., Michalak, P., Weston, N. D., Snay, R. A., & Foote, R. H. (2006). Accuracy of OPUS solutions for 1-to 4-h observing sessions. *GPS solutions*, 10(1), 45-55.
- Teza, G., Pesci, A., Genevois, R., & Galgaro, A. (2008). Characterization of landslide ground surface kinematics from terrestrial laser scanning and strain field computation. *Geomorphology*, 97(3-4), 424-437.
- 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.
- Williams, S. D. (2003). Offsets in global positioning system time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B6).
- Zakarevičius, A., Šliaupa, S., Paršeliūnas, E., & Stanionis, A. (2008). Geodetic network deformation based on GPS data in the Baltic Region. *Geodezija ir Kartografija*, 34(4), 122-126.
- URL1:<https://sideshow.jpl.nasa.gov/post/links/ZECK.html>