

ARAŞTIRMA MAKALESİ

GNSS-PPP ile Elde Edilen Düşey Yerdeğiştirmenin Doğruluğu

Cüneyt Aydın, N. Onur Aykut, Burak Akpınar

Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Davutpaşa Kampüsü, Esenler- İstanbul.

e-posta: caydin@yildiz.edu.tr

Geliş Tarihi:26.01.2018

; Kabul Tarihi:31.08.2018

Özet

Bu çalışmada GNSS-PPP (GNSS-Precise Point Positioning/Küresel Konumlama Uydu Sistemi-Hassas Konum Belirleme) tekniği ile elde edilen düşey yerdeğiştirmenin (çökme ya da yükselmenin) doğruluğu incelenmektedir. Bu amaçla, bir test noktasında başlangıç periyoduna ve bu periyoda göre yükseklikleri çok iyi bilinen beş periyoda ilişkin GNSS (statik) çift frekans gözlemleri günlük olarak elde edilmiştir. Güvenilirliği arttırmak için 6 periyotluk deney farklı koşullarda üç kez tekrarlanmıştır. GNSS gözlemleri $T=2$ saatlikten $T=12$ saatliğe kadar değişen süreler için 4 farklı durumda (1: GPS-PPP gözlemi-sonuç yörünge; 2: GPS/GLONASS gözlemi-sonuç yörünge; 3: GPS-PPP gözlemi-hızlı yörünge, ve 4: GPS/GLONASS gözlemi-hızlı yörünge) CSRS (Canadian Spatial Reference System)-PPP internet servisi yardımıyla değerlendirilmiştir. Söz konusu 4 farklı durum ve gözlem süreleri için periyotlar arasındaki gözlenen ve bilinen düşey yerdeğiştirmeler karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda belirlenen hatalar yardımıyla her bir durum ve gözlem süresi için karesel ortalama hata elde edilmiştir. Yapılan analizlere göre, GPS ve GPS/GLONASS gözlem türlerine ilişkin karesel ortalama hataların hemen hemen özdeş olduğu, gözlem süresi ve yörünge türüne bağlı olarak açıklanabileceği görülmüştür. GNSS-PPP düşey yerdeğiştirme karesel ortalama hatası, sonuç yörünge koordinatları kullanılması durumunda $3.9/(T^{0.5})$, hızlı yörünge koordinatları kullanılması durumunda ise $4.2/(T^{0.5})$ [cm/saat^{0.5}] şeklinde modellenmiştir. Bu sonuç, her iki yörünge koordinatları kullanılarak $T=4$ saatlik gözlem süresi için 6 cm'lik bir düşey yerdeğiştirmenin %80 doğrulukla belirlenebileceğini göstermektedir. Bu büyüklük, gözlem süresi arttıkça küçülmektedir.

Anahtar kelimeler

Doğruluk, Düşey Yerdeğiştirme, GNSS, Hassas Konum Belirleme

Accuracy of Vertical Displacement Monitored by Using GNSS-PPP

Abstract

This study investigates the accuracy of vertical displacement (subsidence or uplift) monitored by using GNSS-PPP (GNSS-Precise Point Positioning) technique. For this purpose, GNSS (static) dual-frequency observations for an initial period and five periods in which the heights of a test point relative to the initial period were accurately known were collected. To increase the reliability, the experiment including six periods was repeated three times in different conditions at the same point. GNSS observations were processed with the use of online CSRS-PPP service for different observing-session durations from $T=2$ hours to $T=12$ hours in 4 different cases, namely, (1) GPS-PPP observation type-final orbit, (2) GPS/GLONASS observation type-final orbit, (3) GPS-PPP observation type-rapid orbit, and (4) GPS/GLONASS observation type-rapid orbit. The estimated and known vertical displacements between the periods are compared to determine the root mean square (RMS) error of PPP technique in monitoring of vertical displacements for each case and session duration. According to our analyses, the RMS errors of GPS and GPS/GLONASS are almost equivalent to each other and can be defined depending on the type of orbital coordinates and the session duration: The RMS error of GNSS-PPP is $3.9/(T^{0.5})$ and $4.2/(T^{0.5})$ [cm/hour^{0.5}] for final and rapid orbits, respectively. This result shows that vertical displacements of about 6 cm can be detected with the 80% power of the test for both orbit types when $T=4$ hours data are collected in the field. As a corollary, this detectable magnitude decreases while session duration increases.

Keywords

Accuracy, Vertical Displacement, GNSS, Precise Point Positioning

1. Giriş

Deformasyon analizi, Harita Mühendisliğinin önemli çalışma alanlarından biridir. Bir bölgede ya da bir mühendislik yapısındaki zamana bağlı konum değişimlerini (yerdeğiştirmelerini) ve hız, ivme, strain gibi hareket ve deformasyon parametrelerini belirlemek için jeodezik ağlar kurulur. İncelenen yapının türüne ve dinamik özelliklerine bağlı olarak bu ağlar, GNSS, yatay-kontrol ya da düzey-kontrol ağları olabilir. Tüm jeodezik deformasyon çalışmalarında hemen hemen aynı yol izlenir. Ađ belli periyotlarda ölçölür, ağın obje nokta koordinatları, ağdaki ortak referans noktalarının datumu tanımladığı kısmi-iz minimum yöntemine göre dengeleme yoluyla her bir periyot için ayrı ayrı elde edilir. Farklı periyotlarda elde edilen bu koordinatlar, yukarıda sözü edilen zamana bağlı parametrelerin belirlenmesi için bir başka modelleme çalışmasının ölçüleri olurlar (Niemeier 1985, Cooper 1987, Caspary 2000, Duchnowski 2010, Duchnowski ve Wisniewski 2012, Nowel 2015, Aydın 2012, Aydın 2017, Amiri-Simkooei ve ark. 2017).

GNSS'nin deformasyon çalışmalarına birçok katkısı olmuştur. Bir GNSS ağına ilişkin ölçüler, hem bazı GNSS hatalarını ortadan kaldırmak hem de obje noktalarının koordinatlarını bir referans nokta kümesine göre elde edebilmek için bağlı konum belirleme tekniğine göre GNSS yazılımlarıyla değerlendirilirler. Bernese ve GAMIT/GLOBK gibi uzun baz çözümlü yapabilen GNSS yazılımları sayesinde (Hofmann-Wellenhof ve ark. 2008, Dach ve ark. 2015, Herring ve ark. 2015, Herring ve ark. 2016) farklı tektonik plakalarda yer alan sabit istasyonlar da referans noktaları olarak kullanılabilir. GNSS, bu yolla, nokta koordinatlarının bu plakalarda yer alan CORS ya da IGS noktalarına göre yüksek doğrulukta (North ve East bileşenlerinde 1 cm altı, Up bileşeninde birkaç cm civarında) belirlenmesi imkanını sunar. Bu nedenle GNSS, obje noktalarında uydu sinyallerinin uygun biçimde toplanabileceği özelliklere sahip yapıların deformasyonlarının izlenmesinde vazgeçilmez bir konumlama tekniği olarak uzunca bir süredir kullanılmaktadır.

Diğer yandan, bir mutlak konum belirleme tekniği olan GNSS-PPP (Zumberge ve ark. 1997, Kouba ve Springer 2001, Kouba 2005), günümüzde artan uydu yörünge hassasiyeti, daha hassas saat ve atmosferik modeller ve gelişmiş tamsayı belirsizliği çözümler algoritmaları sayesinde neredeyse bağlı konum belirleme tekniğine yakın doğrulukta koordinat bilgisi sağlayabilmektedir (Ebner ve Featherstone 2008, Bertiger ve ark. 2010, Wang 2013, Xu ve ark. 2013, Guo 2015, Abd Robbou ve El-Rabbany 2016, Afifi ve El-Rabbany 2017, Choy ve ark. 2017, Pan ve ark. 2017a, Pan ve ark. 2017b). 4 saatten daha uzun gözlem süreleri için, GNSS-PPP karesel ortalama hatası, yatayda (North, East bileşenlerinde) 0.5 cm'den, düzeyde (Up bileşeninde) ise 1.5 cm'den daha düşük olarak rapor edilmektedir (Wang 2013, Guo 2015, Abdallah ve Schwieger 2016, Mohammed ve ark. 2016, Saracoglu ve Sanli 2016). Herhangi bir referans noktasına ihtiyaç duyulmaması ve bir noktada toplanan GNSS ölçülerinin CSRS, APPS vb. online PPP servisleri yardımıyla kolayca değerlendirilebilmesi nedenleriyle GNSS-PPP, bugün jeodezik ölçme çalışmalarında önemli bir potansiyel oluşturmaktadır (Alkan ve ark. 2015, Akpınar ve Aykut 2017).

Söz konusu potansiyelden ve doğruluk bilgisinden yola çıkarak, GNSS-PPP'nin deformasyon çalışmalarında da önemli bir katkı sağlayacağı düşünölmektedir. Örneğin, Yigit ve ark. (2016) günlük ölçüler yoluyla PPP tekniğinin 1.5 cm'lik bir yatay konum değerimini istatistiki olarak belirleyebileceğini göstermektedir. Holden ve ark. (2017), Yeni Zelanda'nın kuzey bölgesinde PPP ve bağlı konum belirlemeyle elde edilmiş yatay hızların büyük bir oranda uyuştuğunu ifade etmektedir. Wang ve ark. (2014a) ise, bir heyelan bölgesinde yapmış oldukları çalışmada, PPP ile ITRF datumunda elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin bölgesel anlamı olan bir referans bloğuna göre yeniden tanımlanması gerektiğine vurgu yapmaktadır. Bir başka deyişle, deformasyon çalışmalarında PPP'nin datum problemlerine değinmektedirler. Diğer yandan, Aydın ve ark. (2018), PPP ile elde edilen koordinat değerimleriyle datumdan bağımsız strain analizinin yapılabileceğini göstermektedir. Günümüzde, PPP tekniği kullanılarak tek bir noktada doğruluk

açısından bağıl konumlandırmaya yakın çözümler elde edilebilmektedir. Ancak, PPP ile yatay hareketlerin izlenmesinde yukarıda değinilen datum problemi ve birden çok sayıdaki noktada eř zamanlı toplanan GNSS gözlemlerinin birbirleri arasındaki korelasyonlar, PPP çözümlerinin deformasyon çalışmalarındaki kullanılabilirliğini sınırlandıran iki etmen olarak karşımıza çıkmaktadır.

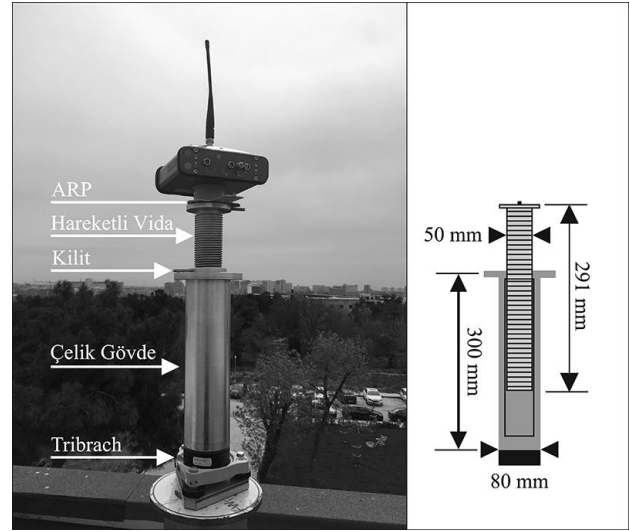
Bir noktadaki düşey hareketlerin izlenmesinde ise, GNSS-PPP tekniği ile elde edilen yükseklikler doğrudan kullanılabilir. Örneğin Wang ve ark. (2014b), PPP yükseklik değişimlerinin 13 yıllık bir süre içerisinde maden bölgesindeki ekstensometre verisi ile milimetre düzeyinde uyuştuğunu göstermektedir. Uygulama ve değerlendirmedeki kolaylıkları ve uzun dönemde diğer veri gruplarıyla tutarlı sonuçlar vermesi PPP'nin bir noktadaki düşey hareketlerin izlenmesinde etkin bir biçimde kullanılabilirliğini göstermektedir.

Bu noktadan hareketle, bu çalışma, GNSS-PPP ile elde edilen düşey yerdeğiştirme doğruluğunu, özel olarak tasarlanmış G-lever cihazı (şekil 1) kullanarak analiz etmektedir. Çalışmanın ikinci bölümünde açıklanan yöntemle, bilinen düşey yerdeğiştirmeler PPP ile elde edilenlerle karşılaştırılmaktadır. PPP'nin doğruluğu, GPS ve GPS/GLONASS gözlem türlerine, gözlem süresine ve uydu yörünge çözüm türlerine (sonuç ve hızlı yörünge türlerine) göre analiz edilmektedir. Üçüncü bölümde, söz konusu durumlar için elde edilen karesel ortalama hata modellerine ve %80 olasılıkla GNSS-PPP ile belirlenebilecek düşey yerdeğiştirme büyüklüklerine değinilmektedir. Elde edilen bulgular, sonuç bölümünde tartışılmaktadır.

2. GNSS Kampanyaları, Değerlendirme ve Yöntem

GNSS-PPP ile elde edilen düşey yerdeğiştirmenin doğruluğunu belirlemek için, GNSS antenini düşey yönde hareket ettirebilen bir cihaz (G-lever) tasarlanmıştır (şekil 1). Yaklaşık sekiz kilogram ağırlığındaki G-lever, 300 mm yüksekliğinde ve 80 mm çapında çelik bir gövde ve onun içinde hareket edebilen 50 mm çapında bir vidadan oluşan bir tasarıma sahiptir. Cihazın alt kısmı herhangi bir

tribraha monte edilebilecek şekilde üretilmiştir. Vidanın üst kısmına anten yerleştirilmekte, vida hareket ettirilerek GNSS anteni düşey yönde ötelenmektedir. Sabitleme vidası ile vida istenilen yükseklikte oldukça sağlam bir şekilde sabitlenmektedir. Anten referans noktası (ARP) ve G-lever cihazının üst plakası arasındaki yükseklik ölçülerek antenin bir önceki konumuna göre ne kadar yükseldiği belirlenmektedir (şekil 1 ve 2). G-lever'in ağırlığı ve stabilitesi sayesinde, GNSS anteni 20 cm'ye kadar yükseğe çıkarılsa da elde edilen North, East, Up bileşenlerinde rüzgar vb. dış etkenler nedeniyle anlamlı salınımlar oluşmamaktadır.



şekil 1. G-lever ve temel elemanları (ARP: Anten referans noktası).

Çalışma için Yıldız Teknik Üniversitesi Harita Mühendisliği binasının çatısında yer alan beton pilye şeklinde tesis edilmiş 10 yıllık bir test noktası (Enlem=41° 01' 23".665 K, Boylam=28° 53' 19".682 D, Yükseklik=126.910 m) kullanılmıştır. Ölçüler iyonosferik etkinin düşük olduğu ve hava koşullarının normal seyrettiği zamanlara karşılık gelen 2017 yılındaki 6 periyotta yapılmıştır. 6 periyot için günlük statik modda GNSS çift frekans ölçüleri toplanmıştır. Ölçüler için Topcon Hiper Pro-GNSS alıcısı kullanılmıştır. Her bir periyot bir önceki periyoda göre yaklaşık 2 cm'lik bir yükselmeyi içerecek şekilde ayarlanmıştır. Başlangıç periyoduna (Periyot (P)-0'a) göre periyot yükseklikleri (H) ve

periyotların ölçü zamanları (Gün) Çizelge 1’de verilmektedir. Her bir periyot öncesi H yükseklikleri milimetrenin onda biri hassasiyetindeki bir kumpas yardımıyla ölçülmüştür (Şekil 2). Söz konusu 6 periyodu içeren deney, aynı test noktasında farklı yükseklik başlangıçlarıyla üç kez tekrarlanmıştır (Çizelge 1).



Şekil 2. Her bir periyotta H yüksekliklerinin ölçülmesi.

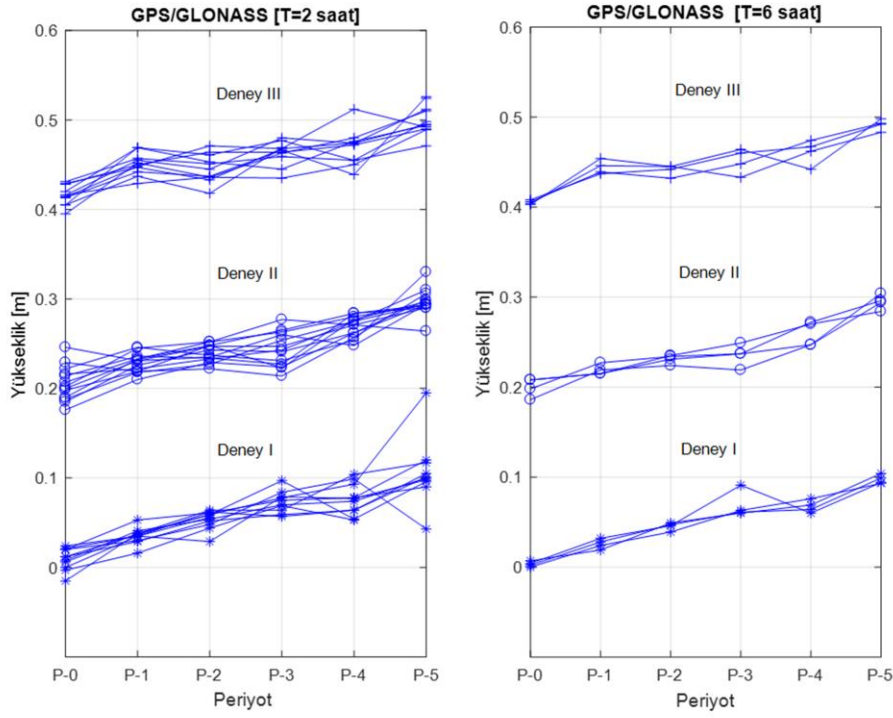
Her bir periyottaki GNSS ölçüleri $T=2, 4, 6, 8$ ve 12 saatlik gözlem sürelerine bölünmüştür. Her bir gözlem süresine karşılık gelen ölçü grubu, hem GPS hem de GPS/GLONASS gözlem türüne göre hızlı ve sonuç uydu yörünge koordinat türleri için ayrı ayrı

değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler online CSRS-PPP servisi yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Örnek için, GPS/GLONASS-sonuç yörünge gözlem türüne ilişkin 2 saatlik ve 6 saatlik gözlem sürelerinde elde edilen yükseklik değerleri Şekil 3’de gösterilmektedir.

Şekil 3’de görüldüğü gibi, her bir periyot öncesinde G-lever cihazıyla oluşturulan yükseklik değişimleri GNSS-PPP’nin yükseklik kestirimlerine anlamlı biçimde yansımıştır. Beklenildiği üzere, 2 saatlik gözlem süresi için elde edilen yükseklik değerleri diğerine göre daha hatalıdır. Ancak, her iki çözümde de son periyoda kadar olan 2’şer cm’lik yükselmeler açık bir şekilde ayırt edilebilmektedir. Ayrıca, düşey yerdeğiştirme büyüklüğü ile hatalar arasında belirgin bir korelasyon bulunmamaktadır. Bu sonuç bir yandan G-lever cihazının stabilitesini göstermekte, bir yandan da PPP’nin düşey yerdeğiştirme belirlemedeki hatasının değişimin büyüklüğüne bağlı olmadığını, -bu açıdan-homoskedastik varyanslı bir yapıda olduğunu belirtmektedir. İkinci doğal sonuç, “bilinen ve elde edilen” düşey yerdeğiştirme karşılaştırmalarında istenen periyot ikilisinin, örneğin P-1 ve P-2, P-3 ve P-5 vb., kullanılabilmesini göstermektedir. Bununla birlikte, her üç deney benzer özellikte yükseklik kestirim değerleri sergilemektedir. Bu sonuç ise, üç deneyin sonuçlarının birlikte ele alınabileceğini göstermektedir.

Çizelge 1 GNSS periyotlarına ilişkin yükseklikler (H) ve 2017 GPS günleri [P: Periyot]

P	Deney I		Deney II		Deney III	
	H (cm)	GPS Günü	H (cm)	GPS Günü	H (cm)	GPS Günü
0	0	093-094	0	107-108	0	117-118
1	1.96	095-096	1.98	108-109	1.95	122-123
2	3.97	096-097	3.97	109-110	3.95	123-124
3	6.03	100-101	5.97	110-111	5.94	124-125
4	8.10	101-102	8.00	114-115	7.94	128-129
5	10.10	102-103	10.00	115-116	9.94	129-130



Şekil 3. Periyotlara ilişkin GNSS-PPP ile elde edilen yükseklik değeri (grafiklerde deney sonuçlarının ayırt edilebilmesi için başlangıç periyodu yükseklik değeri, sırasıyla 0, 0.2 ve 0.4 m'ye ötelenmiştir).

Karşılaştırmalar için birçok kombinasyon oluşturulabilir. Ancak, hata analizinde matematiksel korelasyonlardan kaçınmak için, bir sonraki bölümde ifade edildiği gibi, bunlardan yalnız bazıları ele alınmalıdır. Bir gözlem süresi, gözlem türü ve uydu yörünge türü için matematiksel olarak korelasyonsuz n adet düşey yerdeğiştirme (d) elde edilmiş olsun. Bunların Çizelge 1'deki H yüksekliklerinden hesaplanan (bilinen) " $\Delta=H_k-H_j$ ($k \neq j$)" düşey yerdeğiştirmelerinden sapmaları onların hatalarını verir:

$$\varepsilon_j = d_j - \Delta \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

Bu hataların karelerinin aritmetik ortalamasından elde edilen karesel ortalama hata (σ_d), ilgili PPP çözümü ile elde edilen düşey yerdeğiştirmenin doğruluğuna ilişkin uygun bir istatistiktir:

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{\varepsilon_1^2 + \dots + \varepsilon_n^2}{n}} \quad (2)$$

3. Analiz Sonuçları

3.1. PPP-Düşey Yerdeğiştirme Hataları

Çizelge 1'deki her bir deney için karşılaştırılabilecek 15 farklı periyot ikilisi oluşsa da matematiksel korelasyondan kaçınmak amacıyla bunlardan üç adedi, P-0 ve P-1, P-2 ve P-4, P-3 ve P-5 ikilileri kullanılmıştır (Çizelge 2). Bununla birlikte, bir periyotta $T \leq 12$ saat gözlem süreleri için günün farklı zamanlarına karşılık gelen birden fazla sayıda veri seti bulunmaktadır. Örneğin, $T=2$ saat için 12 veri seti: Veri I=00:00-01:59, ..., Veri XII=22:00-23:59 gibi. Buna göre, bu gözlem süresi için tek bir ikili karşılaştırmasında yine birçok kombinasyon ortaya çıkmaktadır. Periyot ikililerinin seçiminde olduğu gibi hem matematiksel korelasyondan kurtulmak hem de düşey yerdeğiştirmelerde farklı atmosferik koşulların etkilerini gidermek için günün aynı saatlerine karşılık gelen veri setleri karşılaştırmaya dahil edilmiştir. Örneğin, $T=2$ saat için P-0'ın ilk veri seti ile P-1'in ilk veri seti, P-0'ın on ikinci veri seti ile P-1'in on ikinci veri seti gibi. Böylece, analize konu olan belli sayıda karşılaştırma kombinasyonları ortaya çıkmaktadır. Söz konusu karşılaştırmalar için

geçerli düşey yerdeğiştirme sayısı, dolayısıyla ε hata sayısı (n), Çizelge 2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2’deki örnek sayılarına sahip karşılaştırmalar sonucunda GPS-sonuç yörünge, GPS/GLONASS-sonuç yörünge, GPS-hızlı yörünge, GPS/GLONASS-hızlı yörünge için belirlenen hatalar Şekil 4’de gösterilmektedir. Bu hatalardan (2) eşitliğine göre elde edilen karesel ortalama hatalar Çizelge 3’de verilmektedir. Söz konusu hatalar incelendiğinde, GLONASS’ın düşey yerdeğiştirme doğruluğuna çok büyük bir katkı sağlamadığı düşünülebilir. Ancak, şu önemli iki çıkarımdan söz etmek gerekir: 1) GPS/GLONASS hataları “0” beklenen değeri etrafında daha düzgün dağılmıştır; 2) GPS/GLONASS karesel ortalama hataları ile gözlem süresi arasında daha yüksek bir korelasyon vardır. Bir başka deyişle, GLONASS, yükseklik kestirimlerinin kendi içinde ve başka parametrelerle daha uyumlu, yani daha tutarlı olmasını sağlamaktadır.

Çizelge 3’ün her bir sütunundaki karesel ortalama hatalar “ölçüler” gibi düşünülerek, Eckl ve ark. (2001) tarafından önerilen “ $a/(T^{0.5})$ ” dengeleyici fonksiyonunda bilinmeyen a parametresi dengeleme yoluyla kestirilmiştir. Kestirilen a parametresi ve bunun s_a standart sapması ile elde edilen %95 güven düzeyine karşılık gelen güven aralık sınır değerleri “ $a-2.78s_a$ ve $a+2.78s_a$ ”, Çizelge 4’de verilmektedir. Bu modellere göre, GPS ve GPS/GLONASS ayrımı yapmaksızın GNSS-PPP’nin düşey yerdeğiştirme doğruluğu σ_d , aşağıdaki %95 güven aralıkları biçiminde tanımlanabilir:

$$\text{Sonuç yörünge için: } \sigma_d = (3.9 \pm 0.7) / (T^{0.5}),$$

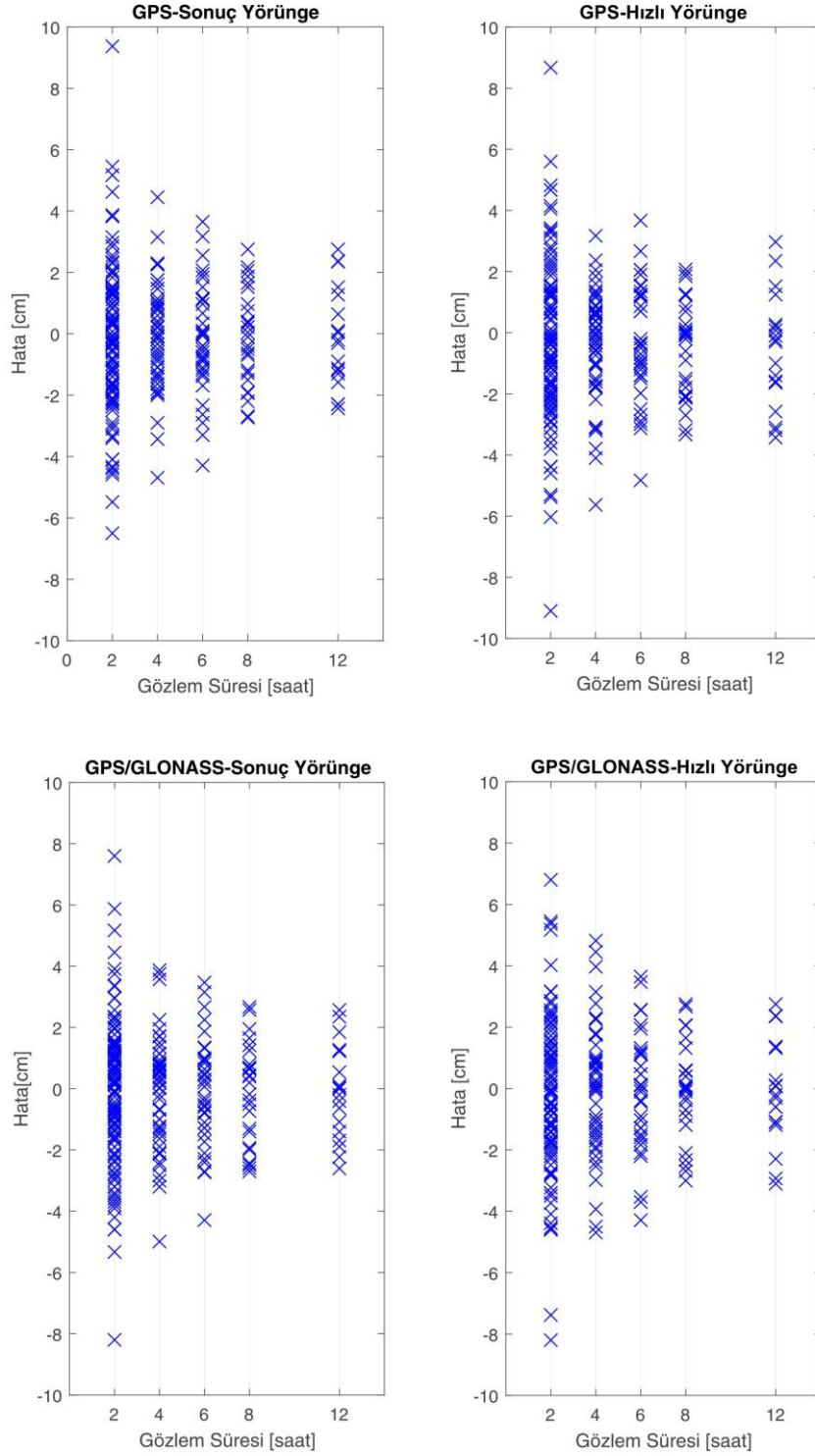
$$\text{Hızlı yörünge için : } \sigma_d = (4.2 \pm 0.8) / (T^{0.5}) \quad (3)$$

Çizelge 2 T gözlem sürelerine karşılık periyot ikililerinden elde edilen düşey yerdeğiştirme sayıları

T (saat)	P-0 ve P-1 ($\Delta \approx 2$ cm)	P-2 ve P-4 ($\Delta \approx 4$ cm)	P-3 ve P-5 ($\Delta \approx 4$ cm)	Toplam n (üç deneyden)
2	12	12	12	108
4	6	6	6	54
6	4	4	4	36
8	3	3	3	27
12	2	2	2	18

Çizelge 3. PPP-düşey yerdeğiştirme karesel ortalama hataları [cm]

T [saat]	GPS Sonuç Yörünge	GPS/GLONASS Sonuç Yörünge	GPS Hızlı Yörünge	GPS/GLONASS Hızlı Yörünge
2	2.48	2.47	2.72	2.59
4	1.67	1.82	1.75	2.08
6	1.77	1.74	1.89	1.89
8	1.51	1.58	1.63	1.58
12	1.62	1.51	1.90	1.67



Şekil 4. PPP-düşey yerdeğiştirme hataları

Buna göre, hızlı uydu yörünge çözümü kullanıldığında düşey yerdeğiştirmenin doğruluğu yalnızca %8 oranında düşmektedir. Buradan, büyük miktarda çökme ya da yükselmenin olduğu bölgelerdeki çalışmaların, sonuç uydu yörünge çözümünün yayımlanmasını beklemeden, hızlı uydu

yörünge çözümlerine bağlı olarak yapılabileceği sonucu ortaya çıkmaktadır.

Elde edilen bu karesel ortalama hatalar daha önce yapılmış çalışmalar ile nasıl karşılaştırılabilir? IGS noktalarında yapılan uzun dönemli tekrarlılık

analizlerine göre, Wang (2013) ve Saracoglu ve Sanli (2016), PPP'nin yükseklik karesel ortalama hatalarını $3/(T^{0.5})$ ve $2.2/(T^{0.5})$ cm/saat^{0.5} olarak vermektedirler. Çizelge 4'de verilen karesel ortalama hatalar ise iki yüksekliğin farkına ilişkindir. CSRS-PPP çözümlerinde elde edilen farklı periyotların ölçeklendirilmemiş yükseklik standart sapmaları (formal errors) birbirine oldukça yakındır. Bu nedenle, varyans yayılma kuralına göre Çizelge 4'de verilen karesel ortalama hataların yaklaşık %71'i (her bir periyottaki yükseklik varyansı σ_h^2 'den değişimin varyansı " $\sigma_d^2=2\sigma_h^2$ " şeklinde

hesaplanabileceği için), kaynakçada verilen yüksekliğe ilişkin karesel ortalama hatalar ile uyumlu olmalıdır.

Yükseklik karesel ortalama hataları, Çizelge 4'deki hataların %71'i biçiminde hesaplanmış ve Çizelge 5'de verilmiştir. Çizelge 5'in sonuç yörüngeye ilişkin ilk iki satırı incelendiğinde, bunların güven aralıklarının kaynakçadaki $3/(T^{0.5})$ ve $2.2/(T^{0.5})$ cm/saat^{0.5}'lik PPP yükseklik karesel ortalama hata modellerini kapsadığı sonucuna ulaşılmaktadır.

Çizelge 4. PPP düşey yerdeğiştirmeye ilişkin " $a/(T^{0.5})$ " karesel ortalama hata modeli a parametreleri ve güven aralıkları [birim: cm/saat^{0.5}]

Gözlem-Uydu Yörüngesi	a	%95 güven düzeyine karşılık güven sınır aralığı
GPS-Sonuç	3.83	2.96-4.70
GPS/GLONASS-Sonuç	3.88	3.15-4.61
GPS-Hızlı	4.17	3.07-5.28
GPS/GLONASS-Hızlı	4.16	3.34-4.98

Çizelge 5. PPP yüksekliğine ilişkin " $b/T^{0.5}$ " karesel ortalama hata modeli b parametreleri ve güven aralıkları [birim: cm/saat^{0.5}]

Gözlem-Uydu Yörüngesi	b	%95 güven düzeyine karşılık güven sınır aralığı
GPS-Sonuç	2.71	2.09-3.32
GPS/GLONASS-Sonuç	2.74	2.23-3.26
GPS-Hızlı	2.95	2.17-3.73
GPS/GLONASS-Hızlı	2.94	2.36-3.52

3.2. PPP ile belirlenebilir en küçük düşey yerdeğiştirme büyüklüğü

Aydin (2012), yerdeğiştirmenin doğruluğu ölçülebildiğinde duyarlılık analizinde geçen testin gücü fonksiyonuyla hesaplanacak "belirlenebilir en küçük yerdeğiştirme" büyüklüklerinin ne kadar gerçekçi sonuçlar ürettiğini göstermektedir. Testin gücü fonksiyonu, yerdeğiştirmenin kestiriminde kullanılan ölçü sayısının sonlu olması (pratikte yaklaşık 200'den küçük olması) durumunda merkezsiz olmayan F (Fisher) dağılımına, sonsuz olması (pratikte yaklaşık 200'den büyük olması) durumunda ise merkezsiz olmayan ki-kare dağılımına göre belirlenir. GNSS kestirimlerinde ölçü sayısı fazla olduğu için burada yapılacak analizde merkezsiz olmayan ki-kare dağılımına bağlı testin

gücü fonksiyonunu düşünmek yerinde olur. Buna göre, testin gücü aşağıdaki biçimde tanımlanabilir:

$$\gamma_0 = 1 - F(c; 1, L_0) \quad (4)$$

Burada, $F(\dots)$, merkezsiz olmayan ki-kare dağılımının dağılım fonksiyonunu; c , merkezsiz ki-kare dağılımının α yanılma olasılığına karşılık gelen güven sınır değerini; L_0 ise γ_0 test gücünü sağlayan dış-merkezsizlik parametresinin alt sınır değerini göstermektedir. Eşitlik (4), test büyüklüğü " $d_m^2/\sigma_d^2 = (\sigma_d^2 L_0 / \sigma_d^2)$ " şeklinde tanımlanan anlamlılık testinin test gücüne karşılıktır. Burada, d_m , γ_0 test gücü ile belirlenebilecek en küçük düşey yerdeğiştirmeyi göstermektedir:

$$d_m = \sigma_d (L_0)^{0.5}, \quad (5)$$

%80 test g¼c¼ ve %5 yanılma olasılığı için L_0 , 7.84 değerine eşittir (Aydin ve Demirel 2005). Son eşitlikte σ_d yerine Eşitlik (3)'de verilen karesel ortalama hata d¼ř¼n¼l¼rse, GNSS-PPP ile %80 test g¼c¼yle belirlenebilir d¼řey yerdeğiştirme b¼y¼kl¼đ¼ elde edilir. Farklı g¼zlem s¼releri için bu b¼y¼kl¼kler Çizelge 6'da verilmektedir. Bu sonuçlara g¼re, hangi uydu y¼r¼nge koordinatları kullanılırsa kullanılsın, $T \geq 4$ saat g¼zlem s¼resi için, GNSS-PPP ile 6 cm'den k¼c¼k miktarlardaki d¼řey yerdeğiştirmelerin y¼ksek olasılıkla belirlenebilir olduğu g¼r¼lmektedir.

Çizelge 6. GNSS-PPP tekniği kullanılarak %80 test g¼c¼yle belirlenebilir en k¼c¼k d¼řey yerdeğiştirme b¼y¼kl¼kleri (cm)

T (saat)	Sonuç Y¼r¼nge	Hızlı Y¼r¼nge
2	7.7	8.3
4	5.5	5.9
6	4.5	4.8
8	3.9	4.2
12	3.2	3.4

4. Sonuç ve Öneriler

GNSS ile elde edilen y¼kseklik bilgisinin doğruluğu yataydakine g¼re yaklaşık ¼çte bir oranında daha k¼t¼d¼r. Ancak, g¼n¼m¼zde, g¼zlem s¼resine ve atmosferik koşulların uygunluğuna bağlı olarak, birkaç cm doğrulukta y¼kseklik bilgisi ¼retebilmek m¼mk¼nd¼r. Daha da ¼nemlisi, bu bilginin uzun d¼nemdeki değişimler karşısında tutarlı olması, yani deformatsyona maruz kalan bir objenin sergilemiş olduğu sinyalle uyumlu olmasıdır. Bu nedenle, GNSS, birkaç cm ve daha ¼zerinde d¼řey hareket sergileyen objelerin kısa ya da uzun d¼nemlerde izlenmesinde ¼nemli bir paya sahiptir. Bununla birlikte, son yıllardaki gelişmeler, tek nokta konumlama (mutlak konumlama) tekniği olan GNSS-PPP'nin, jeodezide alışılageldik bağlı konumlama GNSS tekniğine eşit doğrulukta sonuçlar ¼retebildiđini g¼stermektedir. PPP'nin bağlı konumlama tekniğine g¼re hem arazide hem de değerlendirmede ¼st¼n yanları bulunmaktadır. Çalışmanın giriş b¼l¼m¼nde değinildiği ¼zere, bu teknik bir noktadaki d¼řey yerdeğiştirmenin

izlenmesinde rahatlıkla kullanılabilir. Bu çalışmada, GNSS-PPP ile elde edilen d¼řey yerdeğiştirmenin doğruluğu, $T=2$ saat ile $T=12$ saat arasında değişen farklı g¼zlem s¼relerine bağlı olarak farklı g¼zlem ve y¼r¼nge koordinat t¼rleri için analiz edilmiştir.

Doğruluk analizi için, G-lever adı verilen cihaz yardımıyla ¼retilen d¼řey yerdeğiştirmeler, GNSS-PPP ile g¼zlenmiřtir. ¼retilen yerdeğiştirmeler hatasız kabul edilerek, PPP ile elde edilen d¼řey yerdeğiştirmelerin hataları belirlenmiştir. Bu hatalar yardımıyla karesel ortalama hatalar elde edilmiştir. GPS ve GPS/GLONASS g¼zlem t¼rleri için birbirine yakın sonuçlar bulunmuştur. Bu sonuçlara g¼re, GNSS-PPP ile elde edilen d¼řey yerdeğiştirmenin doğruluğu, sonuç uydu y¼r¼ngesi kullanılması durumunda $3.9/(T^{0.5})$, hızlı uydu y¼r¼ngesi kullanılması durumunda ise $4.2/(T^{0.5})$ [cm/saat^{0.5}] şeklinde belirlenmiştir. Sonuç uydu y¼r¼ngesi, %8'lik bir iyileşme sağlamaktadır.

Elde edilen karesel ortalama hata modelleri kullanılarak, %80 test g¼c¼yle belirlenebilir d¼řey yerdeğiştirmeler incelenmiştir. S¼z konusu duyarlılık analizine g¼re, uydu y¼r¼nge koordinat t¼r¼ne bağlı olmaksızın, $T \geq 4$ saat g¼zlem s¼reli veri toplayarak GNSS-PPP ile 6 cm'den daha k¼c¼k bir d¼řey yerdeğiştirmenin (ç¼kme ya da y¼kselmenin) %80 gibi y¼ksek bir olasılıkla test sonucunda anlamlı olarak belirlenebileceği sonucuna ulaşılmıştır. GNSS-PPP tekniğinin arazide ve değerlendirmede sağladığı ¼st¼nl¼kler de g¼z ¼n¼ne alındığında, bu tekniğin b¼y¼k miktarlarda meydana gelen d¼řey hareketlerin izlenmesinde kullanılabilir olduğu g¼r¼lmektedir.

Kaynaklar

- Abdallah, A., ve Schwieger, V. 2016. Static GNSS precise point positioning using free online services for Africa, Survey Review, 48(306), 61-77.
- Abd Rabbou, M., El-Rabbany, A. 2016. Single-frequency precise point positioning using multi-constellation GNSS: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou, Geomatica, 70(2), 113-122.

- Afifi, A. ve El-Rabbany, A. 2017. Improved dual frequency PPP model using GPS and BeiDou observations, *Journal of Geodetic Science*, 7, 1-8.
- Akpınar, B. ve Aykut, N.O. 2017. Determining the Coordinates of Control Points in Hydrographic Surveying by the Precise Point Positioning Method, *The Journal of Navigation*, 70(2), 1241-1252.
- Alkan, R. M., İlci, V., Ozulu İ. M., Saka, M. H. 2015. A comparative study for accuracy assessment of PPP technique using GPS and GLONASS in urban areas, *Measurement*, 69, 1-8.
- Amiri-Simkooei, A. R., Alaei-Tabatabaei, S. M., Zangeneh-Nejad, F., and Voosoghi, B. 2017. Stability analysis of deformation-monitoring network points using simultaneous observation adjustment of two epochs, *Journal of Surveying Engineering*, 143(1), doi: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000195.
- Aydin, C., ve Demirel, H. 2005. Computation of Baarda's lower bound of the non-centrality parameter, *Journal of Geodesy*, 78(7-8), 437-441.
- Aydin, C. 2012. Power of global test in deformation analysis, *Journal of Surveying Engineering*, 138(2), 51-56.
- Aydin, C. 2017. Effect of displaced reference points on deformation analysis, *Journal of Surveying Engineering*, 143(3), doi: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000216.
- Aydin, C., Uygur S. Ö., Çetin S., Özdemir, A., Doğan U. 2018. Ability of GPS PPP in 2D deformation analysis with respect to GPS network solution, *Survey Review*, doi: 10.1080/00396265.2017.1415664.
- Bertiger W., Desai S. D., Haines B., Harvey N., Moore A. W., Owen, S., Weiss J. P. 2010. Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data, *Journal of Geodesy*, 84, 327-337.
- Caspary, W. F. 2000. *Concepts of network and deformation analysis*, The University of New South Wales. Kensington, Australia.
- Choy S., Bisnath, S., Rizos C. 2017. Uncovering common misconceptions in GNSS Precise Point Positioning and its future prospect, *GPS Solutions*, 21, 13-22.
- Cooper, M. A. R. 1987. *Control surveys in civil engineering*, Collins, London.
- Dach, R., S. Lutz, P. Walser, P. Fridez (Eds), 2015. *Bernese GNSS Software Version 5.2. User Manual*, Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publishing, doi: 10.7892/boris.72297; ISBN: 978-3-906813-05-9.
- Duchnowski, R. 2010. Median-based estimates and their application in controlling reference mark stability, *Journal of Surveying Engineering*, 136(2), 47-52.
- Duchnowski, R., ve Wisniewski, Z. 2012. Estimation of the shift between parameters of functional models of geodetic observations by applying M_{split} estimation, *Journal of Surveying Engineering*, 138(1), 1-8.
- Ebner, R., ve Featherstone, W. E. 2008. How well can online GPS PPP post-processing services be used to establish geodetic survey control networks?, *Journal of Applied Geodesy*, 2, 149-157.
- 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, 633-640.
- Herring, T. A., King, R. W., Floyd, M. A., McClusky S. C. 2015, *Introduction to GAMIT/GLOBK, Release 10.6*, Mass Inst. of Technol., Cambridge.
- Herring, T. A., Melbourne, T. I., Murray, M. H., Floyd, M. A., Szeliga, W. M., King, R. W. , Philips, D. A. , Puskas, C. M., Santillan, M., Wang, L, 2016. Plate Boundary Observatory and related networks: GPS data analysis methods and geodetic products, *Reviews of Geophysics*, 54, 759-808.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E. 2008. *GNSS-Global Navigation Satellite System GPS, GLONASS, Galileo&more*, Springer, Austria.
- Holden, L., Silcock, D., Choy S., Cas, R., Ailleres, L., Fournier N. 2017. Evaluating a campaign GNSS velocity field derived from an online precise point positioning service. *Geophysical Journal International*, 208, 246-256.
- Guo, Q. 2015. Precision comparison and analysis of four online free PPP services in static positioning and

- tropospheric delay estimation, *GPS Solutions*, 19, 537-544.
- Kouba J., ve Springer T. 2001. New IGS station and satellite clock combination, *GPS Solutions*, 4, 31-36.
- Kouba J. 2005. A possible detection of the 26 December 2004 great Sumatra-Andaman Islands earthquake with solution products of the International GNSS Service, *Studia Geophysica et Geodaetica*, 49, 463-483.
- Niemeier, W. 1985. Deformationsanalyse, *Geodaetische Netze in Landes-und Ingenieurvermessung II*, H. Pelzer (Hrsg.), Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 559-623.
- Nowel, K. 2015. Robust estimation in analysis of control network deformations: Classical and new method, *Journal of Surveying Engineering*, 141(4), 1-9.
- Mohammed, J., Moore, T., Hill, C., Bingley R. M., Hansen, D. N. 2016. An assessment of static precise point positioning using GPS only, GLONASS only, and GPS plus GLONASS, *Measurement*, 88, 121-130.
- Pan, L., Xiaohong, Z., Liu, J., Li, X., Li, X, 2017a. Performance evaluation of single-frequency precise point positioning with GPS, GLONASS, BeiDou and Galileo, *The Journal of Navigation*, 70(3), 465-482.
- Pan, L., Xiaohong, Z., Fei, G. 2017b. Ambiguity resolved precise point positioning with GPS and BeiGou, *Journal of Geodesy*, 91, 25-40.
- Saracoglu, A., ve Sanli, D. U. 2016. Seasonal effects on GPS PPP accuracy, *Geophysical Research Abstracts*, 18, EGU General Assembly 2016, Vienna.
- Wang, G., 2013. Milimeter-accuracy GPS landslide monitoring using Precise Point Positioning with Single Receiver Phase Ambiguity (PPP-SRPA) resolution: a case study in Puerto Rico, *Journal of Geodetic Science*, 3(1), 22-31.
- Wang, G., Kearn T. J., Yu, J., Saenz, G. 2014a. A stable reference frame for lanslide monitoring using GPS in the Puerto Rico and Virgin Islands region, *Landslides*, 11, 119-129.
- Wang, G., Yu, J., Kearns, T. J., Ortega, J. 2014b. Assessing the accuracy of long-term subsidence derived from borehole extensometer data using GPS observations: case study in Houston, Texas, *Journal of Surveying Engineering*, 140(3), doi: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5438.0000133.
- Xu, P., Shi, C., Fang, R., Liu, J., Niu, X., Zhang, Q., Yanagidani, T. 2013. High-rate precise point positioning (PPP) to measure seismic wave motions: an experimental comparison of GPS PPP with inertial measurement units, *Journal of Geodesy*, 87, 361-372.
- Yigit C. O., Coskun, M. Z., Yavasoglu, H., Arslan A., Kalkan, Y. 2016. The potential of GPS precise point positioning method for point displacement monitoring: a case study, *Measurement*, 91, 398-404.
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., and Webb, F. H. 1997. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *Journal of Geophysical Research*, 102:B3, 5005-5017.