

AKÜ FEMÜBİD 22 (2022) 035503 (626-636)

AKU J. Sci. Eng. 22 (2022) 035503 (626-636)

DOI: 10.35414/akufemubid.1066489

Araştırma Makalesi / Research Article

Gerçek-Zamanlı GNSS VADASE Yaklaşımının Düşey Yönlü Dinamik Hareketleri Yakalayabilme Kapiliyetinin İncelenmesi

Barış KARADENİZ¹, Mert BEZCİOĞLU¹, Cemal Özer YİĞİT¹, Ahmet Anıl DİNDAR², Özgür AVCI³¹ Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Kocaeli.² Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli.³ Sistem A.Ş. Sürekli İzleme ve Referans İstasyonu Sistemleri Bölümü, Ataşehir, İstanbul.

Sorumlu yazar e-posta: b.karadeniz@gtu.edu.tr

e-posta: mbezcioglu@gtu.edu.tr

e-posta: cyigit@gtu.edu.tr

e-posta: adindar@gtu.edu.tr

e-posta: avciozgur@gmail.com

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5093-5467>ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7179-8361>ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1942-7667>ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3168-8322>ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1667-2587>

Geliş Tarihi: 01.02.2022

Kabul Tarihi: 07.06.2022

Öz

Yeryüzünde meydana gelen dinamik hareketlerin tespit edilmesinde GNSS (Global Navigation Satellite System) sensörüne dayalı birçok konum belirleme yöntemi (Bağıl Kinematik, Gerçek Zamanlı Kinematik (RTK), Hassas Nokta Konumlama (PPP), Gerçek Zamanlı (RT)-PPP vb.) kullanılmıştır. Kullanılan bu yöntemler ikinci bir GNSS alıcısı, internet bağlantısı, uydu yörünge ve saat düzeltme bilgisi gibi harici parametreler gerektirir. Bu çalışmada herhangi bir harici parametreye ihtiyaç duymadan gerçek zamanlı (Real-Time) dinamik hareketleri doğrudan yakalayabilen VADASE (Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-Alone Engine) yaklaşımının düşey yönlü dinamik davranışları belirleyebilme yeteneği incelenmiştir. Çoklu-GNSS gözlemlerine dayalı bu yöntem, zaman ve frekans alanında bağıl konum belirleme (RP) yöntemi referans alınarak PPP yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara bakıldığında düşey dinamik hareketlerin baskın frekans değerlerinin üç yöntem için de aynı olduğu görülmüştür. Baskın frekansa karşılık gelen genlik değerlerinde ise deneylerde referans alınan RP yöntemine göre RT-VADASE yönteminde 1.6 mm ila 3.2 mm arasında değişmekteyken PPP yönteminde bu farklılık 1.1 mm ila 1.6 mm arasında değişmektedir. Ayrıca zaman alanında tüm deney durumları incelendiğinde RT-VADASE yönteminin PP-PPP yöntemine göre Karesel Ortalama Hata (KOH) değerleri arasında milimetre düzeyinde (1-2mm) küçük farklılık bulunmaktadır. Sonuçlar, RT-VADASE yaklaşımının anlık olarak düşey dinamik hareketleri doğru ve güvenilir bir şekilde tespit edebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, RT-VADASE yöntemi deprem, rüzgâr, trafik yükü gibi dinamik yüklerin, yapıda meydana getirebileceği etkiyi anlık olarak tespit etmek ve yapı sağlığını tehdit edebilecek durumlarda yapının hızlı tehlike değerlendirilmesi yapılarak insan hayatını tehlikeye düşürecek durumlarda erken uyarı sistemine entegre bir sensör olarak kullanılabileceği gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler

GNSS;
VADASE;
PPP;
Dinamik hareket

Investigation of Real-Time GNSS VADASE Approach Capability of Capturing Vertical Dynamic Movements

Abstract

Many positioning methods (Relative Kinematic, Real Time Kinematic (RTK), Precise Point Positioning (PPP) and Real Time (RT)-PPP etc.) based on GNSS sensor have been used to detect dynamic motions occurring on the earth. These methods used require external parameters such as a second GNSS receiver, internet connection, satellite orbit and clock correction information. In this study, the VADASE (Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-Alone Engine) approach, which can directly capture dynamic motions in real-time without the need for any additional parameters, are examined. This method, based on multi-GNSS observations, was compared with the PPP method, with reference to the Relative Positioning (RP) method in the time and frequency domain. According to the results, it was seen that the dominant frequency values of vertical dynamic motions were the same for all three methods. While the amplitude values corresponding to the dominant frequency vary between 1.6 mm

Keywords

GNSS;
VADASE;
PPP;
Dynamic motion

and 3.2 mm in the RT-VADASE method according to the RP method referenced in the experiments, this difference varies between 1.1 mm and 1.6 mm in the PPP method. In addition, when all experimental cases are examined in the time domain, there is a small (1-2mm) difference between the mean-squared error (KOH) values of the RT-VADASE method compared to the PP-PPP method. The results show that the RT-VADASE approach can accurately and reliably detect instantaneous vertical dynamic motions. However, it has been shown that the RT-VADASE method can be used as an integrated sensor in the early warning system in situations that will endanger human life by making a rapid hazard assessment of the structure in cases that may threaten the health of the structure, instantly detecting the effect of dynamic loads such as earthquake, wind, traffic load.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Yeryüzünde deprem, tsunami, rüzgâr gibi doğal olayların meydana getirdiği dinamik yüklerden kaynaklı oluşan yatay ve düşey yönlü titreşimler, mühendislik yapılarında deformasyona yol açmaktadır. Yapılardaki bu deformasyonları tespit edebilmek ve değerlendirmek için jeodezik GNSS (Global Navigation Satellite System) alıcıları yaygın olarak kullanılmaktadır. Köprü, gökdelen, viyadük gibi mühendislik yapılarında meydana gelen dinamik hareketleri yakalayabilmek için birçok çalışmada GNSS alıcıları kullanılarak bağıl konum belirleme yöntemi ile değerlendirmeler yapılmıştır (Çelebi 2000, Nakamura 2000, Tamura *et al.* 2002, Xu *et al.* 2002, Roberts *et al.* 2004, Li *et al.* 2006, Erdoğan *et al.* 2007, Breuer *et al.* 2008, Park *et al.* 2008, Yigit *et al.* 2010). Bu yöntem ile yapılan değerlendirmelerde biri sabit diğeri gezici minimum iki GNSS alıcısıyla eş zamanlı gözlem yapılması gerekmektedir. Bu durumda meydana gelebilecek büyük çaplı depremlerin bölgede tesis edilmiş sabit noktalara etkisi göz önüne alındığında bağıl konumlandırma yöntemini, sabit nokta şartını sağlayamayacak duruma getirmektedir (Shu *et al.* 2017). Bununla birlikte, bir noktanın konumu, birçok analiz merkezinin üretmiş olduğu uydu yörünge ve saat düzeltme ürünleri ile sabit bir GNSS alıcısına bağlı kalmadan tek bir GNSS alıcısı kullanılarak, Hassas Nokta Konumlama (PPP) yöntemi ile belirlenebilmektedir (Zumberge *et al.* 1997, Kouba and Heroux 2001, Geng *et al.* 2010, Ge *et al.* 2012). Mutlak konum belirleme yönteminin özel bir hali olan bu yöntem, günümüzde birçok alanda nokta konumunu cm, hatta mm seviyesinde tespit edebilmektedir (Xu *et al.* 2013, Wang 2013). Yöntemin, GNSS sismolojisi, yapı sağlığı izleme gibi uygulamalarda, oluşabilecek dinamik hareketleri

yakalayabilme kabiliyetini değerlendirmek için birçok çalışma yapılmıştır. (Avallone *et al.* 2011, Xu *et al.* 2013, Moschas *et al.* 2014, Nie *et al.* 2016, Yigit 2016, Yigit and Gurlek 2017, Tang *et al.* 2017, Paziewski *et al.* 2018, Xu *et al.* 2019, Kaloop *et al.* 2018). PPP yöntemiyle yapılan çözümlerde, yöntemin ihtiyaç duyduğu uydu yörünge ve saat düzeltmeleri belirli bir zaman gecikmesiyle ulaşılabilir olmasından dolayı, sonradan değerlendirme yöntemiyle elde edilmektedir (Kouba 2009). Ayrıca GNSS alıcılarının veri işleme ve depolama kapasitesindeki gelişmeler, kullanılan yöntemlere dayalı geliştirilen algoritmalar ve gerçek zamanlı uydu yörünge ve saat düzeltme bilgisi veri akışının sağlanması sonucu anlık oluşan dinamik yer değiştirmeleri gerçek zamanlı Hassas Nokta Konumlama (RT-PPP) yöntemiyle de değerlendirilmiştir (Hadas and Bosy 2015, Elsobeiey and Al Harbi 2016, Krzan and Przeźralski 2016, El-Mowafy *et al.* 2016, Alcaay and Turgut 2017, 2019, Alcaay 2019, Alkan ve Mutlu 2022). Bu yöntem deprem, tsunami, rüzgâr ve volkanik patlama gibi doğal olayların oluşturmuş olduğu şiddetli yüksek dinamik hareketlerin anlık olarak izlenmesi ve değerlendirilmesini sağlamıştır (Martin *et al.* 2015, Li *et al.* 2019, Zheng *et al.* 2019, Zhang *et al.* 2021). Bununla birlikte bağıl konum belirleme yönteminin sabit noktaya bağlı olması, sonradan değerlendirme (PP)-PPP tekniğinde kullanılan uydu yörünge ve saat düzeltme ürünlerinin belirli bir zaman gecikmesiyle yayınlanması ve RT-PPP yönteminde anlık internet servisine dayalı kesintiler, gerçek zamanlı ürünlerin Gerçek Zamanlı Servis (RTS) kaynaklı gecikmeleri, bu yöntemlerin gerçek zamanlı dinamik hareketleri izlemede kullanılabilirliğini sınırlandırmaktadır. Bu yöntemlerdeki sınırlamalar sebebiyle gerçek zamanlı uygulamalarda başarılı bir şekilde kullanılabilen ve gerçek zamanlı olarak dinamik yer

değiştirmeleri, internet aracılığıyla servis edilen bilgilere gerek duymadan varyometrik, bir başka adıyla VADASE (Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-alone Engine) yaklaşımıyla belirlenebileceği ortaya atılmıştır (Colosimo *et al.* 2011). Varyometrik yaklaşım, gerçek zamanlı elde edilen yayın efemeris bilgileri ve taşıyıcı faz gözlemleri ile ardışık iki epok arasındaki yer değiştirmeleri belirleyebilmektedir (Colosimo *et al.* 2011, Benedetti *et al.* 2014, Fratarcangeli *et al.* 2018). Varyometrik yaklaşım kullanılarak örnekleme aralığı 1 Hz ile 5 Hz olan GNSS alıcılarının deprem sırasında ve sonrasında topladığı gözlemler değerlendirilmiş ve depremde meydana gelen yer değiştirmeler başarıyla yakalanmıştır (Colosimo *et al.* 2011). Benzer şekilde Japonya'da meydana gelen $M_w=9.0$ büyüklüğündeki Tahoku-oki depreminin oluşturduğu kosismik yer değiştirme ve yer dalga formları Varyometrik yaklaşım ile değerlendirilmiştir. Bu yaklaşımdan elde edilen sonuçlar, GAMIT yazılımı kullanılarak elde edilen bağıl konumlama (TRACK) ve Otomatik Hassas Nokta Konumlama Servisi (APPS) tarafından uygulanan PPP yaklaşımıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlara bakıldığında nokta bazlı yer değiştirmelerin tüm bileşenlerinde (doğu, kuzey ve yukarı) cm seviyesinde doğruluk elde edilmiştir. Böylece deprem gibi doğal olaylar sonucu meydana gelen kosismik yer değiştirme ve yer dalga formlarının VADASE yaklaşımı ile tespit edilebileceği açıkça görülmüştür (Branzanti *et al.* 2013). GNSS sismolojisi alanında depremden kaynaklı yer kabuğu hareketlerinin hem deprem anında oluşan kosismik yer değiştirme ve yer dalga formları hem de deprem sonrası sonradan simülasyonu yapılarak oluşturulmuş depremlerin, kosismik deplasmanları ve meydana getirdiği deformasyonları yakalayabilme kabiliyeti, farklı yazılımlarda, (BERNESE, GAMIT, CSRS-PPP, APP-PPP, RTKLIB, GIPSY vb.) farklı konum belirleme yöntemleriyle (Bağıl konumlandırma, Mutlak konumlandırma vb.) karşılaştırılmıştır. Varyometrik yaklaşımın diğer yöntemlere göre cm seviyesinde doğrulukla, yer değiştirmeleri yakaladığı tespit edilmiştir. (Benedetti *et al.* 2014, Li *et al.* 2014, Geng *et al.* 2016, Hung *et al.* 2017). Ayrıca bu yaklaşımın zamanla geliştirilip yeni bir strateji olan VADASE-

LOO (VADASE Leave-One-Out) yaklaşımıyla kosismik deformasyonların tespitinde statik çözüme göre tüm bileşenlerde yaklaşık 1 cm seviyesinde tutarlı olduğu, ayrıca Uluslararası GNSS Servisi (IGS-Final) ürünleri kullanılarak yapılan PP-PPP çözümüne göre kıyaslandığında ise yatay bileşende 1 cm, düşey bileşende 2 cm seviyesinde birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür (Fratarcangeli *et al.* 2018).

VADASE yaklaşımının farklı GNSS uydu kombinasyonlarına katkısını araştırmak için 2015 yılında meydana gelen Nepal depreminde GPS/BeiDou uydu gözlemleriyle sismik dalga formları ve kosismik yer değiştirmelerin yakalanmasında sadece-GPS gözlemlerine göre daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir (Geng *et al.* 2016). Benzer çalışma Tesolin vd. (2019) tarafından GPS/Galileo uydu gözlemlerine dayalı Varyometrik yaklaşımın tekli uydu sistemlerine (sadece-GPS/Galileo) dayalı Varyometrik yaklaşımlar ile karşılaştırmışlar ve sonuçların GPS+Galileo uydu gözlemlerinde daha iyi olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu yüzden, çoklu uydu sistemleri ile dinamik hareketlerin tespit edilmesinde VADASE yöntemiyle yapılan çözümlerde daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Ayrıca yatay yönlü meydana gelen dinamik deplasmanları (deprem ve harmonik hareketler) üretebilen sarsma tablasına entegre gerçek zamanlı GNSS VADASE yaklaşımının dinamik hareketleri yakalayabilme kabiliyeti incelenmiştir (Bezcioglu vd. 2022). Araştırma da GNSS'den bağımsız bir sensör olan LVDT (Linear Variable Differential Transformer) referans alınarak sadece-GPS ve çoklu-GNSS gözlemlerine dayalı PPP, RP ve RT-VADASE yöntemleri hem zaman hem de frekans alanında birbiri ile kıyaslanmıştır. Karşılaştırma sonucunda çoklu-GNSS VADASE yaklaşımının yatay yönlü dinamik hareketleri yakalayabilme performansının diğer yöntemlere göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Günümüze kadar düşey yönlü dinamik hareketlerin izlenmesinde VADASE yöntemi ile yapılan çalışmalarda 1 Hz ile 5 Hz örnekleme aralığına sahip GNSS alıcılarında kaydedilen verilere dayalı sonradan değerlendirme yapılarak uygulanmıştır. Bu çalışmada gerçek zamanlı ve yüksek frekanslı (20 Hz) GNSS-VADASE yönteminin, mühendislik

yapılarında meydana gelen düşey dinamik hareketleri anlık olarak yakalayabilme performansı test edilmiştir. Çalışmada, GPS, GLONASS, Galileo, ve BeiDou uydu gözlemleri kullanılmıştır. Yapı sağlığı izlemelerinde Varyometrik yöntemin güçlü ve zayıf yönleri değerlendirilerek deprem, rüzgâr gibi doğal olaylar sonucu mühendislik yapılarında meydana gelen dinamik hareketlerden dolayı, düşey deformasyonları anında tespit edebilmek için hızlı tehlike değerlendirme ile erken uyarı sisteminde kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Bu amaçla yüksek katlı bina, köprü, kule gibi birçok mühendislik yapısında dinamik hareketleri tespit etmek için birçok çalışma da yaygın bir şekilde kullanılan bağıl konum belirleme yöntemi referans alınarak, PP-PPP ve RT-VADASE yöntemlerinin performansı hem zaman alanında hem de frekans alanında karşılaştırmalı bir yaklaşımla değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metod

Bu bölümde geleneksel-PPP ve RT-VADASE yöntemlerinin matematiksel modelleri kısaca özetlenecektir.

2.1 Geleneksel-Hassas Nokta Konumlama Yöntemi

Geleneksel-PPP tekniği, çift frekanslı GNSS ham kod ve taşıyıcı faz gözlemlerine dayanmaktadır;

$$P_{r,j}^s = \rho_r^s + c.(\delta t_r - \delta t^s) + T_r^s + I_r^s + m_{r,j}^s + \varepsilon_{r,p}^s \quad (1)$$

$$\Phi_{r,j}^s = \rho_r^s + c.(\delta t_r - \delta t^s) + \lambda_j N_{r,j}^s + T_r^s - I_r^s + m_{r,j}^s + \varepsilon_{r,\phi}^s \quad (2)$$

Bu eşitliklerin her ikisinde de alt simge olarak gösterilen r alıcısı ve j taşıyıcı frekansı belirtirken, üst simge olarak ifade edilen s uyduyu temsil etmektedir. Eşitlik 1'deki P ve Eşitlik 2'deki Φ uzunluk biriminde, sırasıyla kod ve taşıyıcı faz gözlemlerini temsil eder. Her iki eşitlikte bulunan ρ uydu ile alıcı arasındaki ham uzunluğu; c boşluktaki ışık hızını; δt_r ve δt^s sırasıyla alıcı ve uydu saat hatalarını; T_r^s ve I_r^s sinyalin atmosferden geçerken sırasıyla uğramış olduğu troposferik ve iyonosferik gecikmeyi; λ taşıyıcı faza ait dalga boyunu; N_r^s başlangıç epöğündeki faz başlangıç belirsizliğini; m_r^s

uydudan çıkıp, objelerden yansıyarak alıcıya gelen sinyallerin sinyal yansıma hatasını (multipath); ε_r^s ise kod ve faz gözlemlerinin gürültüsünü ifade etmektedir (Cai and Gao 2008).

2.2 Varyometrik Yaklaşım

Dinamik yüklerin etkisi sonucu oluşan hareketler, hiçbir internet servis bilgisine veya hassas yörünge/saat düzeltme bilgisine gerek duymadan tek bir GNSS alıcısı kullanılarak RT-VADASE yaklaşımı ile geçek zamanlı olarak izlenebilmektedir (Colosimo et al. 2011). Bu yöntem her GNSS alıcısında bulunmamakla birlikte bu yaklaşım opsiyonel olup GNSS alıcısı uydu gözlemlerini toplarken içerisine gömülü VADASE algoritmasıyla epoklar arası deplasmanlar (hız bileşenleri) hesaplanmaktadır. Bunun için Varyometrik yaklaşım, ardışık iki epok arasındaki faz gözlemlerinin iyonosferden bağımsız zamanlar arası tekli farkına (Δ) dayanmaktadır (Colosimo et al. 2011). Bu yaklaşımın matematiksel modeli Eşitlik 3'te ifade edilmiştir. RT-VADASE yaklaşımında GNSS alıcıları sürekli gözlem yaptığı varsayılarak;

$$\alpha[\lambda\Delta\phi_r^s]_{L1} + \beta[\lambda\Delta\phi_r^s]_{L2} = (e_r^s \cdot \Delta\xi_r + c\Delta\delta t_r) + ([\Delta\rho_r^s]_{OR} - c\Delta\delta t^s + \Delta T_r^s + [\Delta\rho_r^s]_{EtOl} + \Delta p_r^s) + \Delta m_r^s + \Delta\varepsilon_r^s \quad (3)$$

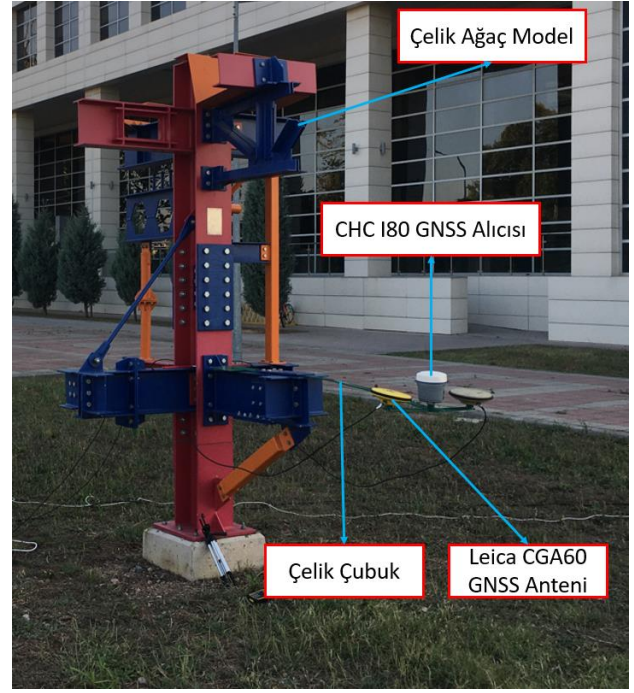
Eşitlik 3'te alt simge olarak ifade edilen $L1$ ve $L2$ taşıyıcı frekansları; α ve β iyonosferden bağımsız kombinasyonun katsayılarını; $\Delta\phi_r^s$ uyduya (s) göre alıcının (r) taşıyıcı faz gözlemini; λ taşıyıcı faz dalga boyunu; e_r^s uydu ile alıcı arasındaki birim vektörü; $\Delta\xi_r$ ise ardışık iki epok arasındaki hız değişim vektörünü ve bu iki vektör arasındaki \cdot sembol ise skaler çarpımı temsil etmektedir. Ayrıca c boşluktaki ışık hızını; $\Delta\delta t_r$ alıcı saat hatasını; $\Delta\delta t^s$ uydu saat hatasını; Δp_r^s uzunluk biriminde uydu ile alıcı arasındaki geometrik mesafeyi; $[\Delta\rho_r^s]_{OR}$ uydunun yapmış olduğu yörünge hareketi ve dünyanın hareketinden kaynaklı oluşan geometrik değişimi; $[\Delta\rho_r^s]_{EtOl}$ katı dünya gelgitinin ve okyanus yüklemesinden kaynaklı geometrik değişimi; ΔT_r^s Saastamoinen modeline göre hesaplanabilen troposferik zenith gecikmesinin zamana bağlı değişimini; Δm_r^s ve $\Delta\varepsilon_r^s$ uydu ile alıcı arasında

sırasıyla multipath ve gürültüyü ifade etmektedir (Colosimo et al. 2011).

Varyometrik yaklaşımın gerçek zamanlı, epoklar arası farkları alınıp sürekli gözlem yapıldığı varsayılarak gözlem yapılan noktaya ait doğrudan 3 boyutlu hız bileşenlerini vermektedir. Böylece bu yaklaşım yeryüzünde dinamik hareketlerin izlenilmesinde ve tespitinde meydana gelen yer değiştirmeleri yakalayabilmektedir. Ayrıca yüksek frekanslı (20 Hz veya daha fazla) çoklu-GNSS uydu gözlemlerine dayalı çözüm yapılabilmektedir.

2.3 Deney Tasarımı

Bu bölümde mühendislik yapılarında meydana gelen düşey dinamik hareketlerin çoklu-GNSS RT-VADASE yöntemi ile gerçek zamanlı izlenilmesi ve dinamik hareketlerin tespit edilmesi için gerçekleştirilen deney tasarımı anlatılmaktadır. Mühendislik yapılarında meydana gelen düşey dinamik hareketleri incelemek için üzerine farklı sensörler yerleştirilip bir ucu sabitlenebilen ve diğer ucu sönümlü harmonik hareketler yapmaya elverişli boyu 130 cm, genişliği 3.8 cm ve kalınlığı 0.45 cm olan çelik yassı çubuk ile dinamik hareketlerin simülasyonu yapılmıştır. Köprü gibi gerçek objelerde yapılan gözlemlerde GNSS sinyallerinin kule, askı kablosu ve ana kablo vb. köprü üst elemanlarından yansması sonucu multipath etkisi oluşmaktadır. Benzer durumu deney tasarımında oluşturmak için tamamı çelikten yapılmış ve birbirine bulon (cıvata) ile bağlanmış çelik ağaç model kullanılmıştır. Ayrıca Şekil 1'de görülen bina hem sinyal engelleme etkisi hem de sinyal yansıma etkisi oluşturmaktadır. Çelik ağaç model üzerine monte edilen çelik yassı simülasyon çubuğun, hareketli kısmına çoklu-GNSS RT-VADASE yöntemi için çift frekanslı GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou uydu gözlem verilerini toplayabilen ve 20 Hz örnekleme aralığına sahip Leica GR30 alıcısına bağlı harici Leica CGA60 GNSS anteni yerleştirilerek dinamik hareketleri yakalayabilme kabiliyeti incelenmiştir.



Şekil 1. Sönümlü düşey harmonik hareketlerin gerçekleştirildiği deney düzeneği

VADASE yönteminin performansını değerlendirmek için 2 çift frekanslı 20 Hz örnekleme aralığına sahip GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou uydu gözlem verileri toplayan CHC I80 GNSS alıcısı kullanılarak ve birçok çalışmada geniş bir şekilde kullanılan bağıl konum belirleme yöntemiyle çözüm yapılmıştır. Deney boyunca 1 GNSS alıcısı deney yapılan yerin yaklaşık 75 metre uzağında sabit olarak kurulup, veri toplarken diğer GNSS alıcısı çelik çubuğun üzerine gezici olarak yerleştirilmiştir. Çelik çubuk üzerine yerleştirilen bu GNSS alıcısı ile ayrıca sonradan değerlendirme yapılması için Wuhan Üniversitesinin üretmiş olduğu uydu yörünge ve saat düzeltmeleri ilgili internet servisinden alınıp, açık kaynaklı yazılım paketi olan RTKLIB yazılımının RTKPOST modülü kullanılarak elde edilen PP-PPP çözümleri ile sonuçlar karşılaştırılmıştır (Int Kyn.1). Tüm deney boyunca GNSS alıcılarına ait GNSS antenlerinin birbirlerinin uydu görünürlüğüne etkilememesi için yaklaşık eşit seviyede tutulmuştur. Ayrıca aynı koşullar altında ve uydu görünürliğünde gözlemler yapılmıştır.

Çalışmada RT-VADASE yöntemi ile elde edilen çözümler doğrudan yer değiştirme bilgisini verirken, bağıl konum belirleme ve PP-PPP yöntemi ile elde edilen çözümlerde GPS alıcı anteninin üç boyutlu koordinat bileşenleri, yer merkezli yer sabit

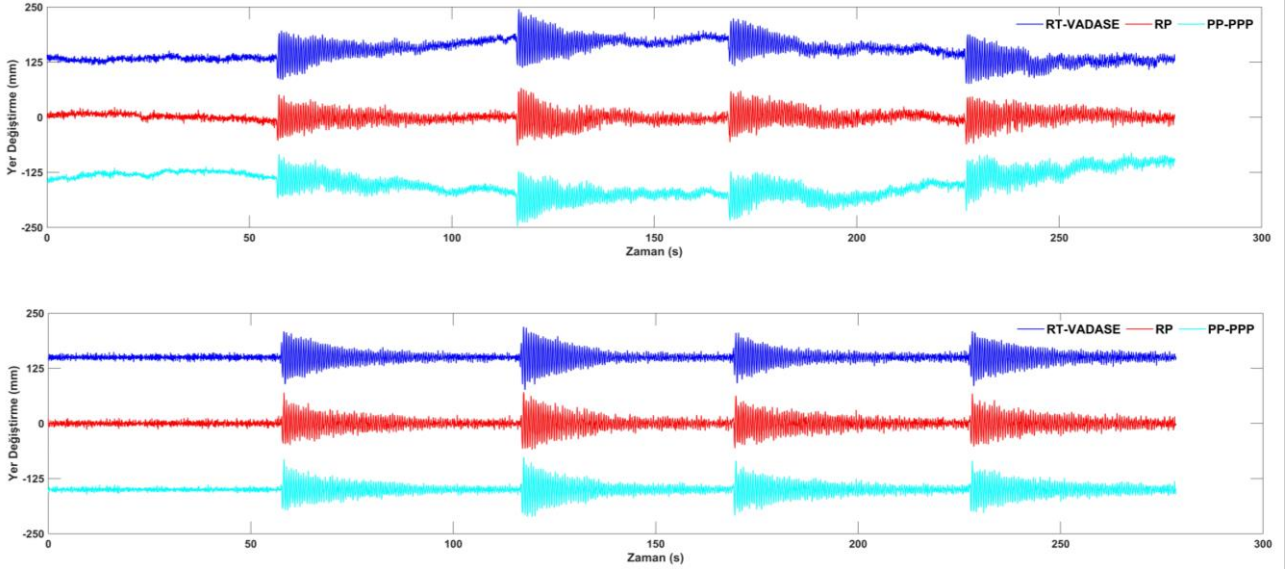
koordinat sisteminde (ECEF) belirlenmiştir. Düşey yönde oluşturulan dinamik hareketlerin tespit edilmesinde bulunan kartezyen koordinatlar anlamlı olmadığından dolayı, çözümlerden elde edilen jeosentrik koordinatların, toposentrik koordinat sistemine dönüşümü yapılmıştır (Yigit 2016).

3. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde düşey yönlü dinamik hareketlerin hiçbir dış kaynaktan gelecek bilgiye (hassas yörünge ve saat bilgisi, referans GNSS alıcısı) ve bu bilgilerin kullanıcıya aktarılacağı internet bağlantısına veya yer sabit uydulara bağlı kalmadan tek bir GNSS alıcısı ile doğrudan yer değiştirmelerin elde edildiği RT-VADASE yönteminin performansı, toplanan GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou uydu gözlemleri ile değerlendirilmiştir. Deney boyunca düşey sönümlü harmonik hareketlerin tespit edilmesinde birçok çalışmada geniş bir şekilde kullanılan bağıl konum belirleme yöntemi referans alınmıştır. Ayrıca deney sonrasında Wuhan Üniversitesinin ürettiği uydu yörünge ve saat düzeltme bilgileriyle, günümüzde mühendislik yapılarının dinamik hareketlerini yakalayabilmek için yaygın olarak kullanılan PP-PPP yöntemiyle çözüm yapılmıştır. Bu çalışmada RT-VADASE yöntemi, bağıl konum belirleme ve PP-PPP yöntemine göre yüksek frekanslı çoklu-GNSS çözümlerinde alternatif olarak kullanılıp kullanılamayacağını araştırmak için üç yöntem hem zaman hem de frekans alanında karşılaştırılmıştır.

Sönümlü harmonik hareketlerin üretilmesi için deney esnasında çelik çubuğun serbest ucuna yaklaşık 3 ila 10 cm arasında yer değiştiren aşağı yönlü itme kuvveti uygulanmıştır. RT-VADASE ve PP-PPP yöntemiyle yapılan çözümlerin her ikisinde de tüm durumlarda zaman alanında düşey yönlü yer değiştirmelerde dalgalanmalar görülmektedir. Bu davranışların sebepleri, PP-PPP yöntemi için yakınsama süresi (Cai 2009) ve faz belirsizliği çözümünden kaynaklanırken, RT-VADASE yönteminde epok epok yapılan hız tahminlerinden yer değiştirmeleri bulmak için hız bileşenlerinin integrali alınarak zamanla biriken yer

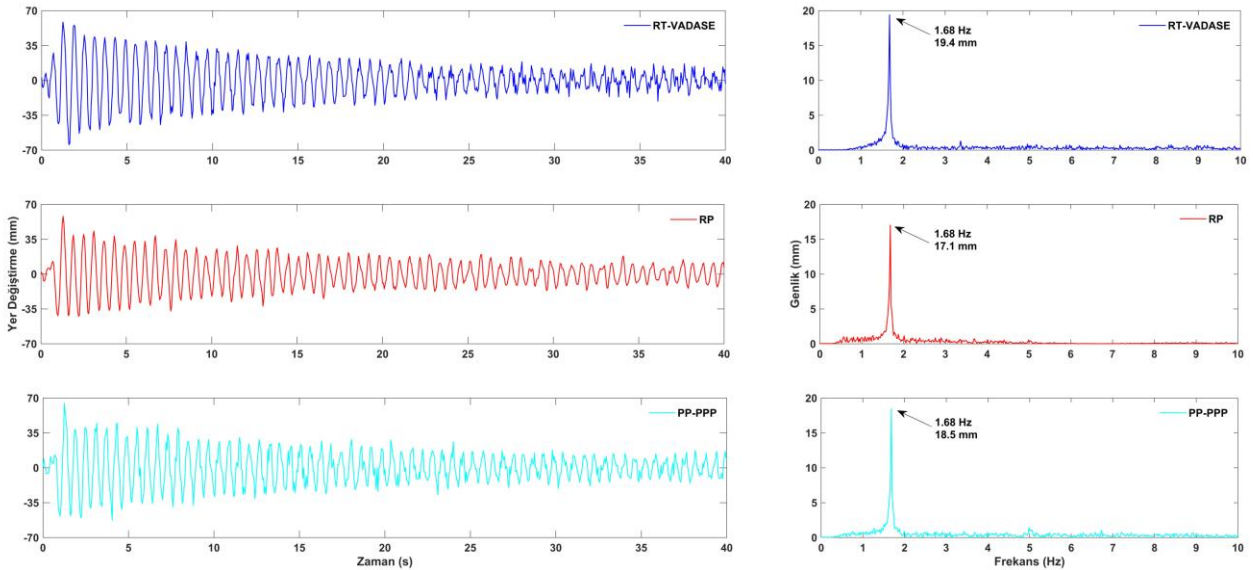
değiştirmelerin olası yanlış modellemeden kaynaklı hataların birikmesi sonucu yer değiştirmelerde dalgalanmalar ortaya çıkmaktadır. (Branzanti *et al.* 2016). Bu çalışmanın amacı kısa süreli (15-30s) dinamik hareketlerin RT-VADASE yöntemiyle tespit edilmesine odaklı olduğu için yakınsamadan ve modelden kaynaklı uzun süreli dalgalanmalar önemli bir sorun teşkil etmemektedir. Ayrıca bağıl konum belirleme yöntemi ile elde edilen yer değiştirmelerin tüm durum boyunca tutarlı olduğu görülmüştür. Kısa ve uzun periyotlu dalgalanmaların ortandan kaldırılabilmesi için farklı filtrelemeler kullanılabilir. Bunun için çalışmada yapılan deneylere ve kullanılan tüm yöntemlere ait zaman alanında, kesme frekansı 0.5 Hz olan beşinci dereceden bir Butterworth yüksek geçirgen filtresi uygulanarak filtrelenmiştir. Deney boyunca çoklu-GNSS gözlemlerine dayalı RT-VADASE, RP ve PP-PPP yöntemleriyle elde edilen sönümlü harmonik hareketlerin tüm durumları Şekil 2’de gösterilmiştir. Şeklin üst kısmında zaman alanında filtreleme yapılmadan sadece lineer (doğrusal) trendi giderilmiş 4 duruma ait düşey yönlü yer değiştirme bileşeni üç yöntemde açık şekilde görülmesi için birbirleri arasında kayıklık (ofset) verilerek gösterilirken, alt kısmında ise aynı duruma ait yüksek geçirgenli filtre uygulanarak elde edilmiş düşey yönlü yer değiştirme bileşenini göstermektedir. Şekil 2’deki son harmonik salınım deneyi olan durum 4, yöntemlerin zaman ve frekans alanındaki davranışlarını görsel olarak incelemek için örnek olarak seçilmiştir. Şekil 3’te durum 4’ün filtrelenmiş düşey yönlü zaman serisi ve frekans alanında elde edilen Hızlı Fourier Dönüşüm (FFT) spektrumları gösterilmiştir. Şekilde RT-VADASE, RP ve PP-PPP yöntemlerinden elde edilen yer değiştirme zaman serisinin birbiri ile tutarlı olduğu görülmüştür. Bu çalışmadaki temel amaç kullanılan yöntemlerin düşey yönlü dinamik hareketleri yakalayabilme performansını değerlendirmek olduğu için kullanılan 3 yöntemle ait frekans alanında FFT spektruma karşılık gelen baskın frekans ve genlik değerleri birbiri ile karşılaştırıldığında benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 2. Düşey sönümlü harmonik hareketlerin filtrelenmemiş (üst) ve filtrelenmiş (alt) yer değiştirme zaman serisi.

Şekil 3’de de görüldüğü gibi elde edilen harmonik salınım frekansları 3 yöntemde de eşit olup 1.68 Hz’dir. Baskın frekansa karşılık gelen genlik değerlerinde ise mm düzeyinde küçük farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılık RT-VADASE ve RP yöntemi arasında 2.3 mm iken, RP ve PPP arasında 0.9 mm’dir. PPP yönteminden elde edilen genlik

değeri referans alınan RP yöntemine daha yakın olmasının sebebi deney esnasında kullanılan alıcı ve anten gürültülerinden kaynaklanmaktadır. VADASE yöntemi için Leica GR30 GNSS alıcısına ait Leica CGA60 GNSS anteni kullanırken diğer iki yöntem için CHC I80 GNSS bütünleşik alıcı ve anteni kullanılmıştır.



Şekil 3. Örnek 4.Duruma ait yer değiştirme zaman serisi (sol) ve frekans alanında karşılık gelen FFT spektrumu (sağ).

Deney boyunca yapılan her durum için uygulanan 3 yöntemde ait frekans alanındaki FFT spektrum değerleri Çizelge 1’de özetlenmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi her duruma ait düşey yönlü salınım frekans değerlerinin kullanılan üç yöntemle de başarılı bir şekilde yakalanabildiği görülmüştür. Baskın frekansa karşılık gelen genlik değerlerinde mm seviyesinde farklılıklar vardır. Deneylerde

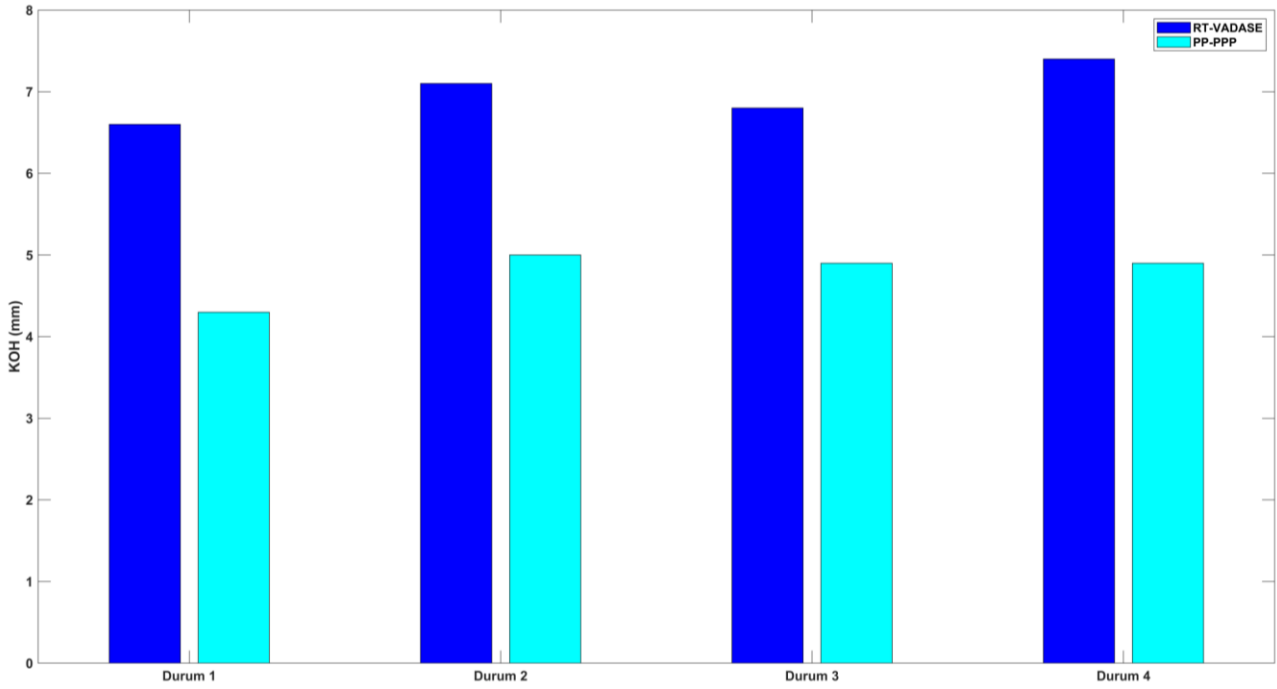
referans alınan RP yöntemine göre RT-VADASE yönteminin genlik değerlerindeki farklılık 1.6 mm ila 3.2 mm arasında değişmekteyken PPP yönteminde bu farklılık 1.1 mm ila 1.6 mm arasında değişmektedir. Sonuçlara bakıldığında düşey dinamik hareketlerin mühendislik yapılarında meydana getirdiği doğal frekansları RT-VADASE yöntemiyle tespit edilebileceği açıkça

görülmüştür. RT-VADASE yönteminin zaman alanındaki performanslarını incelemek için RP yöntemi referans alınarak Karesel ortalama hata (KOH) değerleri hesaplanmış ve Şekil 4'de çubuk grafiği şeklinde gösterilmiştir. Tüm deney durumlarına bakıldığında RT-VADASE yönteminin PP-PPP yöntemine göre KOH değerleri 1-2 mm daha yüksek çıkmıştır. PP-PPP yönteminin RT-VADASE yöntemine göre KOH değerlerinin daha küçük çıkmasının nedeni bağıl konum belirlemede kullanılan aynı gezici alıcı antenin kullanılmasından dolayıdır. Bu çalışmada PP-PPP ve RT-VADASE yönteminin birbirlerine göre üstünlükleri değil yakınsaması araştırılmıştır.

Çizelge 1. Tüm durumlara ait FFT spektrum değerleri

Düşey Harmonik Salınımlar	RT-VADASE		Bağıl		PPP	
	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)
Durum 1	1.68	17.4	1.68	14.6	1.68	15.7
Durum 2	1.68	23.6	1.68	20.4	1.68	22.0
Durum 3	1.68	19.1	1.68	20.7	1.68	22.0
Durum 4	1.68	19.4	1.69	17.1	1.68	18.5

Yöntemlerin daha detaylı karşılaştırılmasının yapılabilmesi için bağıl GNSS yönteminden bağımsız sensörlerden elde edilmiş veriler referans alınarak değerlendirilmesi gerekmektedir.



Şekil 4 Deney boyunca tüm durumlar için VADASE ve PPP yöntemleri ve RP yöntemi arasındaki farkların KOH değerleri

Yöntemlerin KOH değerlerindeki bu fark mm seviyesindedir. Zaman alanındaki sonuçlar gerçek zamanlı VADASE yönteminin yüksek frekanslı GNSS alıcısıyla mühendislik yapılarında meydana gelebilecek düşey yönlü hareketlerin referans bir alıcıya ihtiyaç duymadan deplasmanları yakalama performansının mm seviyesinde olduğu açıkça gösterilmiştir. Ayrıca RP yönteminin, deprem şiddeti yüksek olan yer kabuğu hareketlerinde sabit noktanın yer değiştirmesinden kaynaklı sınırlamalar ve PP-PPP yönteminde kullanılan Final ürünlerinin 13 ila 17 gün süreyle kullanıcıya ulaşmasından dolayı, RT-VADASE yönteminin önemini ortaya çıkarmaktadır. Böylece

mühendislik yapılarında meydana gelebilecek hareketlerin anlık olarak hiçbir dış parametreye bağlı kalmadan RT-VADASE yöntemiyle değerlendirilebileceği net bir şekilde görülmüştür.

4. Sonuç

Bu çalışmada, tek bir GNSS alıcısı kullanarak, hiçbir dış parametreye bağlı kalmadan çoklu-GNSS gözlemlerine dayalı RT-VADASE yaklaşımının düşey dinamik hareketleri gerçek zamanlı yakalama performansı değerlendirilmiştir. Deneylerde gerçek zamanlı olarak düşey sönümlü harmonik hareketlerin yakalanmasında VADASE yönteminin doğruluğunu incelemek için bağıl

konum belirleme ve PP-PPP yöntemiyle çözümler yapılmıştır. Düşey sönümlü harmonik hareketlerin, frekans alanında değerlendirildiğinde, çoklu-GNSS gözlemlerine dayalı RT-VADASE yönteminin tüm durumlarda frekanslarının diğer yöntemlerle aynı olduğu açıkça görülmüştür. Baskın frekanslara karşılık gelen genlik değerlerinin ise mm seviyesinde küçük farklılıklar görülmekte olsa da RT-VADASE yönteminin, düşey harmonik salınımlarda başarılı sonuçlar verdiği açıktır. Ayrıca RT-VADASE yönteminin oluşturulan düşey sönümlü harmonik hareketlerde zaman alanındaki performansını incelemek için istatistiksel analizler yapılmıştır. RT-VADASE yönteminin, PP-PPP yöntemine göre mm seviyesinde farklılık göstermesine rağmen düşey dinamik hareketlerin yakalanmasında cm altında başarılı sonuçlar göstermiştir. Bununla birlikte, mühendislik yapılarında meydana gelecek dinamik hareketleri izleme çalışmalarında kullanılacak GNSS tabanlı alıcı antenlerin sinyal gürültü oranına bakılarak düşük sinyal gürültü oranlarına sahip jeodezik GNSS alıcıları tercih edilmelidir. Ayrıca günümüze kadar olan çalışmalarda düşey dinamik hareketlerin tespiti için referans alınan bağıl konum belirleme yönteminde kullanılan GNSS alıcıları yerine ilerleyen çalışmalarda GNSS gözlemlerinden bağımsız, çok yüksek hassasiyette, doğrudan yer değiştirmeleri ölçebilen sensörler kullanılması ve RT-VADASE yönteminin daha kapsamlı değerlendirilmesi düşünülmektedir.

Düşey sönümlü harmonik hareketlerin sonuçlarına bakıldığında günümüzde meydana gelen yer kabuğu hareketleri, rüzgâr yükü, trafik yükü gibi dinamik yüklerden kaynaklı mühendislik yapılarında oluşan düşey titreşimlerin, gerçek zamanlı çoklu-GNSS gözlemlerine dayalı yüksek frekanslı tek bir GNSS alıcının hiçbir dış parametreye bağlı kalmadan RT-VADASE yöntemi ile izlenebileceği ve güvenilir sonuçlar vereceği açıkça gösterilmiştir. Bununla birlikte RT-VADASE yöntemi, yapı sağlığı izleme uygulamalarında yapıda meydana gelen yatay yer değiştirmelerin yanı sıra düşey yer değiştirmelerin yapıda hasar verici veya yıkıcı etkiler yaratabileceğinden dolayı gerçek zamanlı yapı sağlığı izlemesine ve hızlı

tehlike değerlendirmesi yapılabilmesine katkı sağlayabilecektir.

Teşekkür

Bu çalışmada sağlamış oldukları donanım ve yazılım destekleri için Sistem A.Ş., PP-PPP çözümde kullanılan açık kaynaklı RTKLİB yazılımı için Araştırmacı Tomojo Takasu'ya, ve Çoklu-GNSS uydu yörünge ve saat düzeltmesi sağlayan Uluslararası GNSS Servisine (IGS) teşekkür ederiz.

5. Kaynaklar

- Alcay, S., Turgut, M., 2017. Performance Evaluation of Real-Time Precise Point Positioning Method. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, **95**, 032023. DOI:10.1088/1755-1315/95/3/032023.
- Alçay, S., 2019. Investigation of The Positioning Performance of Real Time Precise Point Positioning Method (RT-PPP) In Terms Of Accuracy And Precision. *Omer Halis Demir University Journal of Engineering Science*, **8**(1), 121-133.
- Alcay, S., Turgut, M., 2021. Evaluation of the Positioning Performance of Multi-GNSS RT-PPP Method. *Arabian Journal of Geosciences*, **14**(155), DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-021-065344>.
- Alkan, R. M., Mutlu, B. 2022. IGS-RTS ürünleri kullanılarak gerçek-zamanlı hassas nokta konumlama (RT-PPP) tekniğinin performans analizi: Antarktika örneği. *Yerbilimleri*, **43**(1),76-95, 1050124.
- Avallone, A., Marzario, M., Cirella, A., Piatanesi, A., Rovelli, A., Di Alessandro, C., D'Anastasio, E., D'Agostino, N., Giuliani, R., Mattone, M. 2011. Very high rate (10 Hz) GPS seismology for moderate-magnitude earthquakes: the case of the Mw6.3 L'Aquila. (central Italy) event. *Journal of Geophysical Research*, **116**, B02305.
- Benedetti, E., Branzanti, M., Biagi, L., Colosimo, G., Mazzoni, A., Crespi, M., 2014. Global Navigation Satellite Systems Seismology for the 2012 Mw 6.1 Emilia Earthquake: Exploiting the VADASE Algorithm. *Seismological Research Letters*, **85**, 649–656.
- Bezicioğlu, M., Karadeniz, B., Yiğit, C.Ö., Dindar, A.A., Bezir, F., Avcı, Ö., 2022. Gerçek Zamanlı GNSS VADASE Yaklaşımının Dinamik Deplasmanları Yakalayabilme Kabiliyetinin İncelenmesi. *Harita Dergisi*, **167**, 1-11.

- Branzanti, M., Colosimo, G., Crespi, M., Mazzoni, A., 2013. GPS near-real-time coseismic displacements for the great Tohoku-oki earthquake. *Institute of Electrical and Electronics Engineer Geoscience and Remote Sensing Letters*, **10**(2), 372-376.
- Breuer, P., Chmielewski, T., Górski P., Konopka, E., Tarczyński, L., 2008. The Stuttgart TV Tower displacement of the top caused by the effects of sun and wind. *Engineering Structures*, **30**, 2771–2781.
- Cai, C. and Gao, Y., 2008. Precise Point Positioning Using Combined GPS and GLONASS Observations. *Journal of Global Positioning Systems*, **6**(1), 13–22. doi:10.1017/S0373463313000039
- Colosimo, G., Crespi, M., Mazzoni, A., 2011. Real-time GPS seismology with a stand-alone receiver: A preliminary feasibility demonstration. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, **116**(11), 1–14.
- Çelebi, M., 2000. GPS in dynamic monitoring of long-period structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. **20**, 477–483.
- Elsobeiey, M., Al-Harbi, S., 2016. Performance of real-time Precise Point Positioning using IGS real-time service. *GPS Solutions*, **20**(3), 565–571.
- Erdoğan, H., Akpınar, B., Gülal, E., Ata, E., 2007. Monitoring the dynamic behaviors of the Bosphorus Bridge by GPS during Eurasia Marathon. *Nonlinear Processes in Geophysics*, **14**, 513-523.
- Fratarcangeli, F., Ravanelli, M., Mazzoni, A., Colosimo, G., Benedetti, E., Branzanti, M., Savastano, G., Verkhoglyadova, O., Komjathy, A., Crespi, M., 2018. The variometric approach to real-time high-frequency geodesy. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, **29**, 95–108.
- Ge, M., Dousa, J., Li, X., Ramatschi, M., Nischan, T., Wickert, J., 2012. A novel real-time precise positioning service system: global precise point positioning with regional augmentation. *Journal of Global Positioning Systems*, **11**(1), 2–10.
- Geng, J., Teferle, F.N., Meng, X., Dodson, A.H., 2010. Towards PPP-RTK: ambiguity resolution in real-time precise point positioning. *Advances in Space Research*, **47**(10), 1664–1673.
- Geng, T., Xie, X., Fang, R., Su, X., Zhao, Q., Liu, G., 2016. Real-time capture of seismic waves using high-rate multi-GNSS observations: application to the 2015 mw 7.8 Nepal earthquake. *Geophysical Research Letters*, **43**(1), 161–167.
- Hadas, T., Bosy, J., 2015. IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time. *GPS Solutions*, **19**(1), 93–105.
- Hung, H.K., Rau, R.J., Benedetti, E., Branzanti, M., Mazzoni, A., Colosimo, G., Crespi, M., 2017. GPS Seismology for a moderate magnitude earthquake: Lessons learned from the analysis of the 31 October 2013 ML 6.4 Ruisui (Taiwan) earthquake. *Annals of Geophysics*, **60**(5), S0553, doi: 10.4401/ag-7399.
- Kalooop, M. R., Yigit, C. O., and Hu, J. H., 2018. Analysis of the dynamic behavior of structures using the high-rate GNSS-PPP method combined with a wavelet-neural model: Numerical simulation and experimental tests. *Advances in Space Research*, **61**(6), 1512–1524.
- Kouba, J. and Heroux, P., 2001. Precise Point Positioning using IGS orbit and clock products. *GPS Solutions*, **5**(2), 12-28.
- Kouba, J., 2009. A Guide to using international GNSS Service (IGS) Products. *Geodetic Survey Division, Natural Resources Canada, Ottawa*, 6-34.
- Krzan, G. and Przechodzinski, P., 2016. GPS/GLONASS Precise Point Positioning with IGS Real-time service product. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, **13**(1), 69–81.
- Li, X., Ge, L., Ambikairajah, E., Rizos, C., Tamura, Y., Yoshida, A., 2006. Full-scale structural monitoring using an integrated GPS and accelerometer system. *GPS Solutions*, **10**, 233–247.
- Li, X., Guo, B., Lu, C., Ge, M., Wickert, J., Schuh, H., 2014. Real-time GNSS seismology using a single receiver. *Geophysical Journal International*, **198**(1), 72–89.
- Li, X., Zheng, K., Li, X., Liu, G., Ge, M., Wickert, J., Schuh, H., 2019. Real-time capturing of seismic waveforms using high-rate BDS, GPS and GLONASS observations: the 2017 Mw 6.5 Jiuzhaigou earthquake in China. *GPS Solutions*, **23**(1), 1–12.
- Martín, A., Anquela, A.B., Dimas-Pagés, A., Cos-Gayón, F., 2015. Validation of performance of real-time kinematic PPP. A possible tool for deformation monitoring. *Measurement*, **69**, 95–108.
- Moschas, F., Avallone, A., Saltogianni, V., Stiros, S. C., 2014. Strong motion displacement waveforms using 10-Hz precise point positioning GPS: An assessment based on free oscillation experiments. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **43**(12), 1853–1866.
- Nakamura, S.I., 2000. GPS measurement of wind-induced suspension bridge girder displacements. *Journal of Structural Engineering*, **126**(12), 1413–1419.

- Nie, Z., Zhang, R., Liu, G., Jia, Z., Wang, D., Zhou, Y., Lin, M., 2016. GNSS seismometer: Seismic phase recognition of real-time high-rate GNSS deformation waves. *Journal of Applied Geophysics*, **135**, 328–337.
- Park, H.S., Sohn, H.G., Kim, I.S., Park, J.H., 2008. Application of GPS to monitoring of wind-induced responses of high-rise buildings. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, **17**, 117–132.
- Paziewski, J., Sieradzki, R., Baryla, R., 2018. Multi-GNSS high-rate RTK, PPP and novel direct phase observation processing method: Application to precise dynamic displacement detection. *Measurement Science and Technology*, **29**(3), 035002.
- Roberts, G.W., Meng, X., Dodson, A., 2004. Integrating a Global Positioning System and accelerometers to monitor deflection of bridges. *Journal of Surveying Engineering*, **130**, 65–72.
- Shu, Y., Shi, Y., Xu, P., Niu, X., Liu, J., 2017. Error analysis of high-rate GNSS precise point positioning for seismic wave measurement. *Advances in Space Research*, **59**(11), 2691–2713.
- Tamura, Y., Matsui, M., Pagnini, L.C., Ishibashi, R., Yoshida, A. 2002. Measurement of wind-induced response of buildings using RTK-GPS. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **90**(12), 1783–1793.
- Tang, X., Roberts, G. W., Li, X., Hancock, C., 2017. Real-time kinematic PPP GPS for structure monitoring applied on the Severn suspension bridge, UK. *Advances in Space Research*, **60**(5), 925–937.
- Tesolin, F., Vitti, A., Mazzoni, A., Crespi, M., 2019. Impact of Galileo data on the solutions of the variometric approach for displacement analysis. *Advances in Space Research*, **63**(9), 3053-3061.
- Wang, G.Q., 2013. Millimeter-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.
- Xu, L., Guo, J.J., Jiang, J.J., 2002. Time–frequency analysis of a suspension bridge based on GPS. *Journal of Sound and Vibration*, **254**, 105–116.
- 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**(4), 361–372, doi:http://dx.doi.org/ 10.1007/s00190-012-0606-z.
- Xu, P., Shu, Y., Niu, X., Yao, W., Chen, Q., 2019. High-rate multi-GNSS attitude determination: Experiments, comparisons with inertial measurement units and applications of GNSS rotational seismology to the 2011 Tohoku Mw9.0 earthquake. *Measurement Science and Technology*, **30**(2), 024003.
- Yigit, C.O. and Eralp, G., 2017. Experimental testing of high-rate GNSS precise point positioning (PPP) method for detecting dynamic vertical displacement response of engineering structures. *Geomatics Natural Hazards and Risk*, **8**(2), 893-904.
- Yigit, C. O., 2016. Experimental assessment of post-processed kinematic precise point positioning method for structural health monitoring. *Geomatics Natural Hazards Risk*, **7**(1), 363–380.
- Yigit, C.O., Li, X., Inal, C., Ge, L., Yetkin, M., 2010. Preliminary evaluation of precise inclination sensor and GPS for monitoring full-scale dynamic response of a tall reinforced concrete building. *Journal of Applied Geodesy*, **4**, 103–113.
- Zhang, Y., Nie, Z., Wang, Z., Wu, H., Xu, X., 2021. Real-time coseismic displacement retrieval based on temporal point positioning with igs rts correction products. *Sensors*, **21**(2), 1-17.
- Zheng, K., Zhang, X., Li, X., Li, P., Sang, J., Ma, T., Schuh, H., 2019. Capturing coseismic displacement in real time with mixed single- and dual-frequency receivers: application to the 2018 Mw7.9 Alaska earthquake. *GPS Solutions*, **23**(1), 1–14.
- Zumberge, J.F., Heflin, M.B., Jefferson, D.C., Watkins, M.M., Webb, F.H., 1997. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, **102**(B3), 5005–5017.

İnternet kaynakları

1-ftp://igs.gnsswhu.cn/pub/whu/phasebias, (05.12.2021)