Harita Dergisi, Ocak 2022; 167: 1-11

ARAŞTIRMA MAKALESİ / RESEARCH ARTICLE

Gerçek Zamanlı GNSS VADASE Yaklaşımının Dinamik Deplasmanları Yakalayabilme Kabiliyetinin İncelenmesi

(Investigation of Real-Time GNSS VADASE Approach Capability of Capturing Dynamic Displacements)

Mert BEZCİOĞLU[1], Barış KARADENİZ[1], Cemal Özer YİĞİT[1], Ahmet Anıl DİNDAR[2], Fırat Bezir[2], Özgür AVCI[3]

[1]Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Gebze, Kocaeli

[2]Gebze Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gebze, Kocaeli

[3]Sistem A.Ş, Sürekli İzleme ve Referans İstasyonu Sistemleri Bölümü, Ataşehir, İstanbul

mbezcioglu@gtu.edu.tr

Geliş Tarihi (Received): 02.11.2021 Kabul Tarihi (Accepted): 12.01.2022

ÖZ

Bu çalışmada, tek GNSS (Global Navigation Satellite Systems) alıcısı kullanarak, internet bağlantısı ile hassas uydu yörünge ve saat hatası gibi bilgilere ihtiyaç duymadan dinamik hareketleri anlık olarak tespit etme yeteneğine sahip olan VADASE (Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-alone Engine) yaklaşımının performansı ve bu yönteme çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısı araştırılmıştır. VADASE tekniğinin dinamik hareketleri yakalayabilme kabiliyetini değerlendirmek için, tek eksenli bir sarsma tablası kullanılarak olası yapı hareketlerini temsil eden 5 mm genliğe ve 0.25 Hz ile 3.5 Hz arasında değişen frekans değerlerine sahip harmonik salınımlar üretilmiştir. Ayrıca, yöntemin sismik dalga formlarını tespit edebilme performansını araştırmak amacıyla 1995 Kobe depremi simüle edilmiştir. 20 Hz örneklem aralığında GPS (Global Positioning Systems) ve GPS/Glonass/Galileo/BeiDou gözlemlerine dayalı olarak elde edilen VADASE sonuçları, frekans ve zaman alanlarında bağıl konum belirleme, Hassas Nokta Konumlama (PPP) ve GNSS-bağımsız bir sensör olan LVDT (Linear Variable Differential Transformer) verileri ile karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen analiz sonuçları göz önüne alındığında, bulgular harmonik salınım frekanslarının tahmininde VADASE yaklaşımının güvenilir bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca harmonik salınım ve deprem simülasyonu deneyleri, çoklu-GNSS gözlemleri ile VADASE yaklaşımının dinamik hareketleri daha hassas bir şekilde yakalanabildiğini ve çoklu-GNSS gözlemlerinin sadece-GPS gözlemlerinin dinamik davranışları belirleme performansını ortalama olarak %30 oranında iyileştirdiğini net bir şekilde ortaya koymuştur. Çalışmanın sonuçları, yüksek-frekanslı gerçek zamanlı VADASE tekniğinin yapı sağlığı izleme ve GPS/GNSS-sismolojisi uygulamaları için dinamik hareketleri etkin bir şekilde izleyebildiğini, yöntemin deprem ve yapı sağlığı erken uyarı amaçlı ve hızlı risk değerlendirmesinde güvenilir bir şekilde kullanılabileceği ve diğer sensörlerle entegre edilebileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: *GPS, GNSS, VADASE, PPP, Dinamik Deplasman, Gerçek-Zamanlı İzleme.*

ABSTRACT

This study investigates the performance of the VADASE (Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-alone Engine) approach, which is capable of detecting dynamic motions utilizing a single GNSS (Global Navigation Satellite Systems) receiver without requiring precise satellite orbit and clock products in real-time, and the contribution of multi-GNSS observations to this technique. In order to evaluate the efficiency of the VADASE technique in detecting dynamic motions, harmonic oscillations at 5 mm amplitude and frequency values ranging from 0.25 Hz to 3.5 Hz, representing possible structural movements, were produced using a single axis shake table. Moreover, 1995 Kobe earthquake was simulated to investigate the performance of the VADASE method in capturing seismic waveforms. VADASE results based on GPS (Global Positioning Systems) and GPS/Glonass/Galileo/BeiDou observations at 20 Hz sampling rate were compared to relative positioning, Precise Point Positioning (PPP) and GNSS-independent sensor Linear Variable Differential Transformer (LVDT) data in both frequency and time domains. Considering the results of the analysis, the findings show that the VADASE approach can be used reliably in the estimation of harmonic oscillation frequencies. Moreover, harmonic oscillation and earthquake simulation experiments have clearly revealed that the VADASE approach with multi-GNSS observations can capture dynamic motions more precisely, and multi-*GNSS observations improve the dynamic behavior detection performance of only-GPS observations by 30% on average. The outcomes of the study show that the high-rate real-time VADASE approach can effectively monitor dynamic motions for structural health monitoring and GPS/GNSS-seismology applications, and can be reliably used for earthquake and structural health early warning and rapid risk assessment, and also, it can be integrated with other sensors.*

Keywords: *GPS, GNSS, VADASE, PPP, Dynamic Displacement, Real-time Monitoring.*

Atıf/To cite this article: Bezcioğlu, M., Karadeniz, B., Yiğit, C. Ö., Dindar, A. A., Bezir, F. ve Avcı, Ö. (2022). Gerçek Zamanlı GNSS VADASE Yaklaşımının Dinamik Deplasmanları Yakalayabilme Kabiliyetinin İncelenmesi. *Harita Dergisi,* 167, 1-11.

1. GİRİŞ

Son yıllarda alıcı donanımlarda meydana gelen teknolojik gelişmeler ile birlikte yüksek-frekanslı GNSS (Global Navigation Satellite System) tekniği ortaya çıkmış ve bu yöntemin yapılan çalışmalarla birlikte kuvvetli yer hareketi kaynaklı sismik dalgaların tespit edilmesi, deprem erken uyarı sistemleri ve yapı sağlığı izlemeleri alanlarında oldukça güçlü bir yöntem olduğu kabul edilmiştir (Kouba 2003; Larson ve diğerleri, 2003; Larson 2009; Allen ve Ziv 2011; Bock ve diğerleri, 2011; Geng ve diğerleri, 2013; Hoechner ve diğerleri, 2013; Melgar ve diğerleri, 2015; Kaloop ve diğerleri, 2020; Yigit ve diğerleri, 2020). Yüksek-frekanslı GNSS gözlemleri, yaygın olarak rölatif/bağıl konum belirleme ve/veya PPP (Precise Point Positioning) yöntemleri kullanılarak işlenmektedir (Avallone ve diğerleri, 2016; Xu ve diğerleri, 2019; Zumberge, ve diğerleri, 1997). Bağıl konum belirleme yöntemi ile GNSS gözlemlerinde mevcut olan sistematik hataların çoğu elimine edilmesine rağmen yöntemin sabit bir referans istasyonuna bağımlı olması, büyük/mega depremler sırasındaki güçlü yer sarsıntıları nedeniyle referans istasyonunun da yer değiştirmesi sebebiyle gezici istasyonlardan elde edilen deplasman bilgilerinin hatalı olmasına yol açmaktadır. Bu durum, tek bir GNSS alıcısı ile konum bilgisinin belirlenmesini sağlayan ve rölatif konum belirleme yöntemine oldukça güçlü bir alternatif olan PPP tekniğini gerekli kılmıştır (Psimoulis ve diğerleri, 2015; Shu ve diğerleri, 2017). Literatürdeki çalışmalar, yüksek-frekanslı PPP tekniğinin kısa süreli dinamik davranışların belirlenmesinde milimetre mertebesinde doğruluk sağladığını, GNSS-sismolojisi ve yapı sağlığı izlemeleri gibi yüksek zamansal çözünürlük gerektiren alanlardaki etkinliğini net bir şekilde vurgulamışlardır (Avallone ve diğerleri, 2011; Hefty ve Gerhatova 2012; Xu ve diğerleri, 2013; Yigit 2016; Yigit ve Gurlek 2017; Geng ve diğerleri, 2018; Yigit ve diğerleri, 2021). PPP yaklaşımında, GNSS gözlemlerindeki uydu saati hatalarını ortadan kaldırmak ve uydu konumlarını modellemek için IGS (International GNSS Service) tarafından kullanıcılara sunulan "Ultra-Rapid", "Rapid" veya "Final" ürünler kullanılmaktadır. Bu ürünler kullanıcılara son GNSS gözleminden yaklaşık olarak 2 saat ile 18 gün arasında değişen gecikmelerde sunulmakta ve dolayısıyla gerçek zamanlı uygulamalar için kullanımını imkânsız kılmaktadır (Wang ve diğerleri, 2018). IGS tarafından 2013 yılında hayata geçirilen IGS RTS (Real Time Service) sayesinde kullanıcılar, belirli NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) yayıncıları aracılığıyla ile gerçek zamanlı olarak RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services) akışlarından elde edilebilen IGS gerçek zamanlı saat ve yörünge düzeltmeleri elde ederek gerçek zamanlı PPP uygulamaları gerçekleştirme imkanına sahiptir (Chen ve diğerleri, 2018; Wang ve diğerleri, 2018). Bununla birlikte, RTS ürünlerinde bazı sınırlamalar vardır. RTS ürünleri, büyük miktarda yer gözlemi kullanılarak elde edildikleri için çok fazla bilgi işlem kaynağı gerektirir ve kullanıcı ile iletişim zayıf olduğunda, gerçek zamanlı yörünge ve saat düzeltmeleri alınamadığında gerçek-zamanlı PPP (RT-PPP) uygulamaları ciddi şekilde etkilenmektedir (Nie ve diğerleri, 2018). Colosimo ve diğerleri (2011) tarafından ortaya atılan VADASE (Variometric Approach for Displacement Analysis Stand-alone Engine) yaklaşımı ise ham GNSS ölçümlerinden anlık olarak elde edilen yayın efemerisi/yörünge (broadcast ephemeris) bilgilerini kullanarak GNSS alıcısının hızını belirleyebilmekte ve RT-PPP tekniğinden farklı olarak herhangi bir internet bağlantısı gerektirmemektedir. Böylece VADASE yaklaşımı, kullanıcılar için gerçek zamanlı olarak hız veya yer değiştirme bilgisi sağlamaktadır. Literatürde, VADASE yaklaşımı kinematik-GNSS uygulamaları performansını, sismik dalgaları tespit edebilme yeteneğini ve bu yaklaşıma benzer farklı veri işleme stratejileri ile olan karşılaştırılmasını içeren çalışmalar bulunmaktadır (Branzanti ve diğerleri, 2015; Benedetti ve diğerleri, 2014; Fratarcangeli ve diğerleri, 2018; Hung ve diğerleri, 2017; Geng ve diğerleri, 2016; Li ve diğerleri, 2014; Zang ve diğerleri, 2020; Zhang ve diğerleri, 2021). VADASE yaklaşımının dinamik hareketleri algılama performansını incelemek için Fortunato ve diğerleri (2019), Android tabanlı bir akıllı telefon ile 1 Hz örneklem aralığında GPS/Galileo gözlemleri toplamış ve toplanan gözlemler VADASE yaklaşımı ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, VADASE yönteminin düşük frekanslı hareketleri algılayabildiğini açık bir şekilde göstermiştir.

Literatür incelendiğinde görülmektedir ki, VADASE yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilen değerlendirmeler gerçek-zamanlı değil, GNSS gözlemleri elde edildikten sonra gerçek-zamanlı koşullar altında sonradan değerlendirmedir. Buna ek olarak yukarıda tartışılan çalışmaların çoğu genellikle 1 Hz örneklem aralığına sahiptir ve bu durum 1 Hz örneklem aralığından daha sık bir zamansal çözünürlükte VADASE tekniğinin gerçek zamanlı ve 0.5 Hz'den daha yüksek frekans değerine sahip yapı hareketlerini veya kuvvetli yer hareketlerinden kaynaklanan deprem dalgalarını yakalama kabiliyetinin araştırılması gereken bir alan olduğunu göstermektedir. Ayrıca

erişilen literatür çalışmalarında VADASE yaklaşımı, GPS veya GPS/Galileo uydu kombinasyonlarına dayalı olarak test edilmiş, Glonass ve BeiDou gözlemlerinin VADASE yöntemine olan katkısından söz edilmemiştir. Bu çalışma kapsamında literatürde bulunanlardan farklı olarak, 20 Hz örneklem aralığına sahip GPS ve GPS/Glonass/Galileo/BeiDou gözlemlerine dayalı VADASE yaklaşımının çeşitli dinamik davranışları tespit edebilme yeteneği değerlendirilmiştir. Çalışmada olası yapısal hareketleri temsil ettiği düşünülen 5 mm genlik değerine ve 0.25 Hz ila 3.5 Hz frekans değerleri arasında değişen frekans değerine sahip harmonik salınımlar, tek eksenli bir sarsma tablası kullanılarak üretilmiştir. Bu deneylere ek olarak, olası bir deprem/tsunami erken uyarı sisteminde VADASE yaklaşımının gerçek-zamanlı performanslarını değerlendirmek için 1995 Kobe depremi simülasyonu yine aynı sarsma tablasında üretilmiştir. Bu deney seti sayesinde VADASE tekniğinin kuvvetli yer hareketlerini tespit etme performansı, herhangi bir gerçek zamanlı simülasyon olmaksızın anlık olarak test edilmiştir. Her iki deney setinde de yüksek-frekanslı GNSS tekniğinde verilerin işlenmesi için kabul gören bağıl konum belirleme ve PPP teknikleri, VADASE yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Bağımsız tek bir GNSS alıcısı ile konum belirlemeye olanak sağlayan ve bir yönden VADASE yaklaşımına benzeyen PPP çözümleri, gerçek-zamanlı ürünler kullanılarak elde edilmiş ve bu sayede adil bir karşılaştırma mümkün kılınmıştır. Çalışma kapsamında tasarlanan her iki deneyde de çoklu-GNSS gözlemlerinin VADASE yaklaşımına olan katkısı değerlendirilmiştir. Bu çalışmayı, mevcut literatürde tartışılan çalışmalarından farklı kılan bir diğer özellik, yöntemin doğruluğunun GNSS'den bağımsız bir sensör olan ve mekanik olarak bağlandığı bir nesnenin hareketlerini algılayıp, milimetre mertebesinde bir hassasiyetle deplasman bilgisi üretebilen LVDT (Linear Variable Differential Transformer) verilerine dayanarak ortaya çıkarılmış olmasıdır.

2. METODOLOJİ

Dinamik hareketlerin tespiti için çalışma kapsamında kullanılan tek GNSS alıcılı yaklaşımların teknik detayları bu bölümde tartışılacaktır. PPP tekniğinin matematiksel modeli temel olarak kod ve faz gözlemlerine dayanmaktadır;

$$P_r^s(t_r) = \rho_r^s(t^s) + c(\delta t_r - \delta t^s) + T_r^s(t_r) + I_r^s(t_r) + m_r^s(t_r) + \varepsilon_{r,P}^s \quad (1)$$

$$L_r^s(t_r) = \rho_r^s(t^s) + \lambda_i N_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + T_r^s(t_r) - I_r^s(t_r) + m_r^s(t_r) + \varepsilon_{r,L}^s \quad (2)$$

Eşitlik (1) ve (2)'de, r ve s, sırasıyla, alıcı ve uyduyu ifade ederken, P ve L, kod ve faz ölçülerini ifade etmektedir. Söz konusu bu uzunlukları ölçmek için hedef uydudan sinyalin alıcıya gönderildiği (t^s) ve alıcıda bu sinyal alındığı an (t_r) bilinmelidir. ρ, sinyalin alıcıya iletim zamanındaki uydunun anten faz merkezi ile bu sinyalin alıcının anten faz merkezine ulaştığı andaki geometrik mesafeyi metre cinsinden tanımlamaktadır. δt^s ve δt_r ise uydu ve alıcı saat hatalarını belirtmektedir. $\varepsilon_{r,P}^s$ ve $\varepsilon_{r,L}^s$ faz ve kod ölçüleri için modellenmemiş artık hataları ve ilgili sistem gürültüsünü metre cinsinden ifade ederken, N ve λ, başlangıç faz belirsizliğini ve taşıyıcı frekansın dalga boyunu metre cinsinden ifade etmektedir. c, ışığın boşluktaki hızı, I ve T ise metre biriminde iyonosferik ve troposferik gecikmedir. Eşitlik (1) ve (2)'de yer alan m terimi ise kod ve faz gözlemlerindeki multipath hatasıdır (Cai ve Gao, 2008).

Colosimo ve diğerleri (2011) tarafından ortaya atılan ve gerçek-zamanlı olarak herhangi bir internet bağlantısı gerektirmeden GNSS alıcısını bir hız ölçer olarak kullanan VADASE yaklaşımı, alıcı tarafından toplanan taşıyıcı faz gözlemlerinin ardışık epoklardaki tekli farklarına (Δ) dayanmaktadır. Varyometrik yaklaşımın fonksiyonel modeli, gözlemlerin sürekli olduğu varsayımıyla Eşitlik (3)'de ifade edilmiştir.

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

Eşitlik (3)'de, α ve β terimleri $L1$ ve $L2$ gözlemleri ile oluşturulan iyonosfer-bağımsız $L3$ kombinasyonun katsayılarını, r ve s sırasıyla uydu ve alıcıyı, ϕ_r^s taşıyıcı dalga faz gözlemlerini λ taşıyıcı dalga faz sinyallerinin dalga boyunu, ρ_r^s uydu ve alıcı arasındaki geometrik mesafeyi, c boşluktaki ışık hızını, δt^sve δt_r uydu ve alıcı saat hatalarını, T_r^s ise troposferik gecikmeyi ifade etmektedir. Bu terimlere ek olarak, p_r^s ifadesi diğer hata kaynaklarının toplamını ifade ederken, ε_r^s ve m_r^s sırasıyla gözlemlerde meydana gelen gürültü ve multipath etkilerini temsil etmektedir. e_r^s, t anındaki uydu ve alıcı arasındaki birim vektörü tanımlarken $\Delta\xi_r$ terimi alıcının iki ardışık epok arasındaki deplasman değerini ifade etmektedir. $[\Delta\rho_r^s]_{OR}$, Dünya'nın günlük hareketi ve

uydu yörünge hareketi nedeniyle geometrik mesafenin değişimini, $[\Delta\rho_r^s]_{Etol}$ ise okyanus yüklemesi ve katı yer yuvarı etkisi nedeniyle geometrik mesafenin değişimini tanımlamaktadır. $(e_r^s \bullet \Delta\xi_r + c\Delta\delta t_r)$ terimi üç boyutlu deplasman (ξ_r) ve alıcı saat hatası değişimi $(\Delta\delta t_r)$ bileşenlerini içerirken, $([\Delta\rho_r^s]_{OR} - c\Delta\delta t^s + [\Delta\rho_r^s]_{Etol} + \Delta p_r^s)$ terimi ise yayın yörünge ve saat modellemeleri ile hesaplanabilen parametreleri içermektedir. Eşitlik (3)'de gösterilen matematiksel model ile yüksek-frekanslı GNSS alıcısının hız bilgileri mm×s^{-1} mertebesinde hesaplanabilir ve bu elde edilen hız bileşenlerinin integrali alınarak dinamik deplasman bilgilerine dönüşüm gerçekleştirilir (Li ve diğerleri, 2014).

3. DENEY TASARIMI

Çalışmanın bu bölümünde çeşitli dinamik hareketleri izlemek için GPS ve çoklu-GNSS VADASE gözlemlerinin gerçek zamanlı olarak elde edilmesi ve gerçekleştirilen dinamik hareketlerin tasarımı özetlenmiştir. Çalışma kapsamındaki deneyler 13 Temmuz 2021 tarihinde Gebze Teknik Üniversitesi kampüsünde iki farklı zaman diliminde gerçekleştirilmiştir. Hem harmonik salınım hem de deprem simülasyonu testlerinde, toplam deplasmanı 190 mm ile sınırlı olan ve hareketleri 100 Hz örneklem aralığında bir LVDT sensörü ile doğrulanan tek eksenli bir sarsma tablası kullanılmıştır. Sarsma tablasının üzerine iki adet GNSS anteni monte edilmiştir (Şekil 1). Bu antenlerden biri gerçek-zamanlı VADASE çözümü gerçekleştirme yeteneğine ve 20 Hz örneklem aralığına sahip Leica GR30 alıcısı için gözlem toplarken, diğer anten, alıcı ile bütünleşik olan ve yine 20 Hz örneklem aralığına sahip CHC I80 jeodezik GNSS alıcısıdır. Bu iki alıcıya ek olarak, üçüncü bir CHC I80 GNSS alıcısı, sarsma tablasından yaklaşık olarak 70 m uzağa rölatif konum belirleme çözümü gerçekleştirmek üzere konumu bilinen bir nokta olarak kurulmuştur. Leica GR30 alıcısından gerçek-zamanlı olarak deplasman bilgileri elde edilirken, CHC I80 alıcısında elde edilen veriler ile bağıl konum belirleme ve geleneksel-PPP çözümü gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık olarak bir saat süren ilk zaman diliminde, söz konusu alıcılar sadece-GPS gözlemleri toplarken, ikinci zaman diliminde GPS/Glonass/Galileo/BeiDou uydu kombinasyonları ile gözlem toplanmıştır. Deneylerin iki farklı zaman diliminde gerçekleştirilmesinin sebebi, tek bir Leica GR30 alıcısı kullanılmasından dolayıdır. Fakat uydu kombinasyonun farklılığının olabildiğince az olması için ikinci deney, birinci deney sona erdikten 30 dakika sonra gerçekleştirilmiş, deneylerde geleneksel-PPP tekniğindeki başlangıç faz belirsizliğinin yakınsaması için alıcılar açık bir konumda yaklaşık olarak 30 dakika hareketsiz olarak bekletilmiştir. Her iki zaman diliminde de Tablo 1'de ifade edilen, aynı frekans ve genlik değerine sahip harmonik salınımlar ve detayları ilerleyen bölümlerde açıklanacak olan 1995 Kobe depremi simülasyonu gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan sarsma tablası ve GNSS alıcıları

VADASE çözümleri ile doğrudan deplasman bilgisi elde edilirken, bağıl konum belirleme ve PPP çözümlerinde alıcının koordinatları Uluslararası Yersel Referans Çerçevesinde (ITRF) belirlenmiştir. Bununla birlikte, dinamik hareketlerin tespit edilmesinin doğası gereği, yer merkezli kartezyen koordinatın doğrudan kullanımı, yapının yatay yer değiştirme tepkilerini analiz etmek için uygun değildir. Bu sorunu çözmek için jeosentrik koordinatlar, toposentrik koordinat sistemine dönüştürülmelidir. Ayrıca, toposentrik sistem bileşenleri sırasıyla kuzey ve doğuyu gösterdiğinden, sarsma tablasının yatay düzlemdeki deplasman bilgilerinin GNSS alıcısı ile elde edilmesi için, çalışmada tartışılan üç farklı GNSS-tabanlı yöntemde elde edilen deplasman bilgileri iki boyutlu benzerlik dönüşümü uygulanarak sarsma tablasının yönüne dönüştürülmüştür. Bu işlemler detaylı olarak Yigit (2016) ve Yigit ve diğerleri (2021)'de bahsedilmiştir.

Tablo 1. Harmonik salınım deneylerinin genlik ve frekans bilgileri

Durum	Salınım Frekansı	Salınım Genliği
1	0.25 Hz	5 mm
2	0.60 Hz	5 mm
3	1.50 Hz	5 mm
4	2.00 Hz	5 mm
5	3.50 Hz	5 mm

4. HARMONİK SALINIM DENEYİ SONUÇLARI

Tek bir GNSS alıcısı kullanarak internet bağlantısı gerektirmeden gerçek zamanlı deplasman bilgileri sunan VADASE yaklaşımı ve bu yönteme çoklu-GNSS gözlemlerinin katkıları çalışmanın bu bölümünde değerlendirilecektir. VADASE yaklaşımının performansını incelemek için tasarlanan iki deney setinde de LVDT verileri referans olarak kullanılmıştır. VADASE yaklaşımının yüksek-frekanslı GNSS gözlemlerini işlemek için yaygın olarak kullanılan bağıl konum belirleme ve PPP tekniklerine bir alternatif olup olamayacağını test etmek için de bağıl konum belirleme ve PPP çözümleri VADASE tekniği ile ayrıca karşılaştırılmıştır. Daha önce belirtildiği gibi, LVDT verileri 100 Hz örneklem aralığına sahip olduğundan karşılaştırmayı adil kılmak için ham LVDT verileri 20 Hz örneklem aralığına düşürülmüştür. VADASE ve PPP tekniklerinden elde edilen deplasman bileşenleri yöntemlerin doğası gereği uzun süreli ve düşük frekanslı dalgalanmalar içermektedir. Öte yandan, 20-250 sn gibi kısa bir süre içinde dinamik yer değiştirmeye odaklanılıyorsa, uzun vadeli ve düşük frekanslı dalgalanma önemsizdir. Bununla birlikte, tek bir GNSS alıcından elde edilen deplasman zaman serilerindeki düşük frekanslı dalgalanmaları ortadan kaldırmak için yüksek geçirgenli bir filtre kullanılabilir (Yigit, 2016). Bu çalışma kapsamında uzun süreli dalgalanmaları ve düşük frekanslı bileşenleri elemine etmek için kesme frekansı 0.20 Hz olan 5. dereceden yüksek geçirgenli Butterworth filtresi kullanılmıştır. Aynı filtre, frekans ve zaman alanı karşılaştırmalarını daha güvenilir ve adil kılmak için, gerekli olmamasına rağmen bağıl konumlama tekniğine de uygulanmıştır.

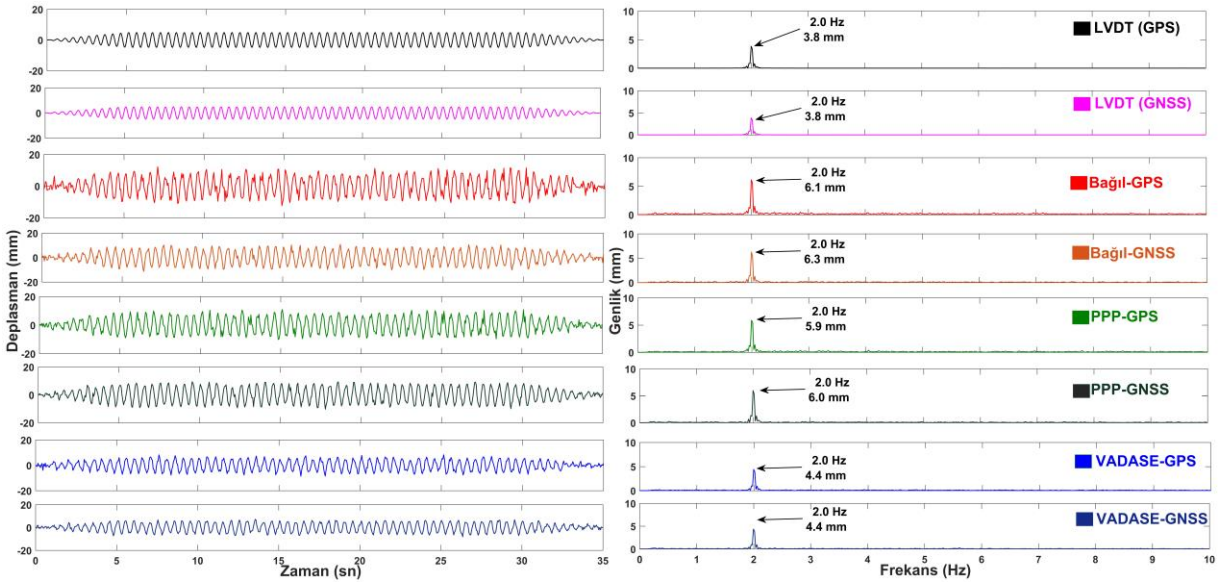
Deneylerden 2.0 Hz frekans ve 5 mm genliğe sahip olan 4. durum, VADASE yaklaşımının harmonik salınımları yakalamadaki etkinliğini incelemek için örnek olarak seçilmiş ve LVDT, bağıl yöntem, PPP ve VADASE yaklaşımlarından GPS ve çoklu-GNSS kombinasyonlarından elde edilen zaman serileri ve zaman serilerinden elde edilen Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) spektrumu Şekil 2'de ifade edilmiştir. İlgili şekilden görüleceği üzere, zaman serileri birbirleri ile oldukça tutarlı ve tüm yöntemlerden elde edilen salınım frekansları eşittir. Ek olarak, donanım kaynaklı gürültüler ilgili şekilden de net olarak fark edilebilmektedir. Bağıl-GPS ve PPP-GPS zaman serilerinde harmonik salınımların tepe noktalarındaki farklılıklar ve VADASE-GPS sonuçlarının LVDT ile oldukça benzer zaman serisi üretmesi bunu açıkça göstermektedir. Buna karşılık, baskın frekansa karşılık gelen genlik değerlerinde küçük farklar olduğu göze çarpmaktadır. VADASE ve LVDT arasındaki farklar her iki uydu kombinasyonu için de 0.6 mm iken, bu farklar bağıl yöntem ile GPS için 1.7 mm, çoklu-GNSS için ise 1.9 mm'dir. VADASE ve PPP arasındaki farklar ise her iki uydu kombinasyonu için sırasıyla 1.5 mm ve 1.6 mm'dir. VADASE yönteminden elde edilen genlik değerlerinin LVDT ile elde edilenlere daha yakın olmasının sebebi donanım kaynaklı gürültü ile açıklanmaktadır. Yukarıda da açıklandığı üzere bağıl yöntem ve PPP için CHC I80, VADASE yöntemi için ise Leica GR30 GNSS alıcısı kullanılmıştır. Bu alıcıların sahip olduğu gürültü değerleri bu farkların oluşmasına sebep olmaktadır.

Tablo 1'de belirtilen her bir durum için çalışma kapsamında tartışılan yaklaşımlardan elde edilen zaman serilerinin FFT spektrumu analizleri Tablo 2'de özetlenmiştir. Tüm GNSS-tabanlı yöntemlerin her iki uydu kombinasyonunda da salınım frekansını başarılı bir şekilde yakaladığı görülmektedir. Bununla birlikte, baskın frekansa karşılık gelen genliklerde milimetre düzeyinde farklılıklar bulunmaktadır. VADASE yaklaşımı ile elde edilen genlik değerleri ile referans LVDT sensöründen elde edilen farklılıklar GPS gözlemleri için 0.4 mm ile 2.7 mm arasında değişirken, çoklu-GNSS gözlemleri için bu farklar 0.6 mm ile 2.8 mm'dir. Her iki uydu kombinasyonu için VADASE ile bağıl yöntem arasındaki farklar 1.9 mm'nin altında kalırken, VADASE ile PPP tekniği arasındaki farklar ise 1.6 mm değerinin altında kalmıştır. Bu sonuçlar, VADASE tekniği kullanarak mühendislik yapılarının doğal frekanslarının belirlenebileceğini açık bir şekilde göstermektedir.

Frekans alanındaki karşılaştırmalara ek olarak VADASE yönteminin zaman alanındaki performansını incelemek için, GNSS-tabanlı yöntemlerden elde edilen zaman serilerinin referans LVDT sensörü ile olan farklarının karesel ortalama hata (KOH) değerleri hesaplanmış ve elde edilen KOH değerlerinin görselleştirmesi Şekil 3'te ifade edilmiştir. Şekil incelendiğinde, çoklu-GNSS gözlemlerinin tüm tartışılan yöntemlere etkisi açıkça görülmektedir. Sarsma tablası ile üretilen tüm durumlarda, VADASE-GPS ile LVDT arasındaki maksimum farklar 12.4 mm'ye kadar ulaşırken, çoklu-GNSS gözlemleri ile gerçekleştirilen VADASE gözlemlerinde maksimum hata değeri 9.3 mm'dir. Bununla birlikte, çoklu-GNSS gözlemleri ile elde edilen VADASE çözümlerimim KOH değerleri ile VADASE-GPS çözümlerinin KOH değerleri karşılaştırıldığında %25'e varan iyileşme söz konusudur. Bu iyileşme değerleri bağıl yöntem

için yaklaşık olarak %35'e, PPP tekniği içinse %25'e kadar uzanmaktadır. Ayrıca zaman alanı analizi sonuçları, VADASE yaklaşımının bağıl yöntem ve PPP tekniklerinden daha üstün bir performans gösterdiğini açıkça vurgulamaktadır. Bunun sebebi, daha önce de bahsedildiği gibi alıcı donanımı kaynaklı gürültüler ile ifade edilmektedir.

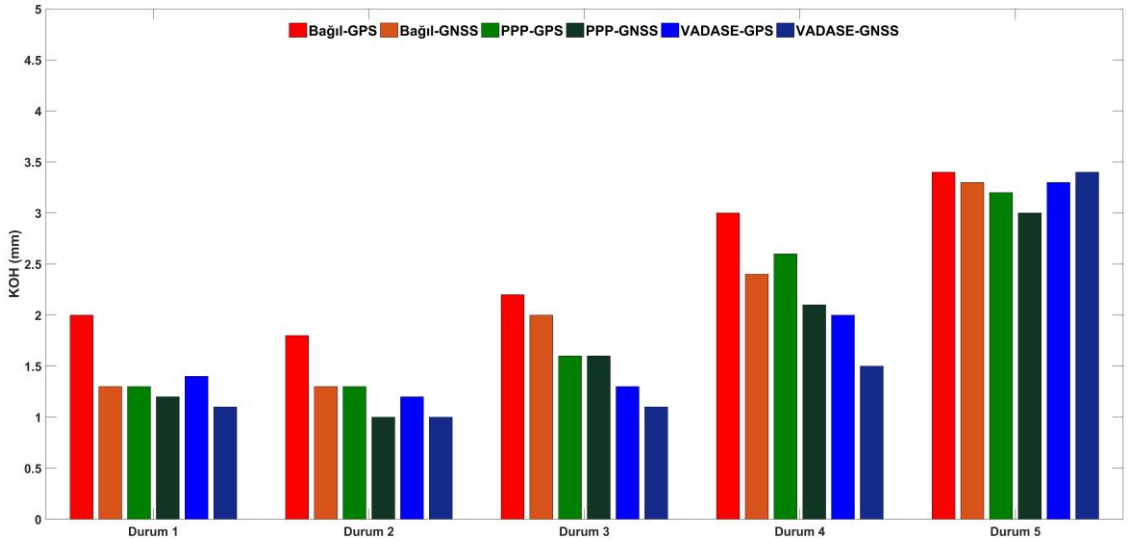
Tüm deneylerden elde edilen KOH değerlerinin çubuk grafikleri incelendiğinde açıkça görülmektedir ki bağıl yöntem ve VADASE yaklaşımları sırasıyla en yüksek ve en düşük KOH değerlerini verirken, PPP tekniği bu yöntemlerin ortasında sonuç üretmiştir. Bunun nedeni, bağıl yöntemin çözümünde yöntemin doğası gereği kullanılan iki adet CHC I80 GNSS alıcısının gürültüsü sonucu etkilerken, PPP tekniğinde bir adet CHC I80 GNSS alıcısının gürültüsü sonucu etkilemektedir. VADASE yaklaşımının hem bağıl çözümden hem de PPP çözümünden iyi olmasının temel nedeni Leica GR30 alıcısının CHC I80 alıcısından daha az gürültü olması ve yöntemin doğası gereğidir. Zaman alanındaki sonuçlar, yüksek gürültülü GNSS alıcıları ile harmonik salınımların belirlenmesi çalışmalarında tek GNSS alıcısı ile deplasman bilgisi elde etmeye olanak sağlayan VADASE yönteminin etkinliğini açıkça göstermektedir. Ayrıca, harmonik salınım deneyleri mega/büyük depremler nedeniyle referans GNSS istasyonu verilerinin erişilemez veya kullanılamaz olması durumunda, mühendislik yapılarının doğal frekanslarını ve deplasmanlarını belirlemek için VADASE yaklaşımının güvenli bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 2. Örnek durum zaman serileri (sol) ve FFT spektrumları (sağ)

Tablo 2. Tüm durumlar için FFT spektrumu değerleri

	LVDT (G)		LVDT (GNSS)		Bağıl-GPS		Bağıl-GNSS		PPP-GPS		PPP-GNSS		VADASE-GPS		VADASE-GNSS	
	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)
Durum 1	0.25	4.7	0.25	4.3	0.25	4.2	0.25	4.0	0.25	4.0	0.25	3.6	0.25	4.3	0.25	3.7
Durum 2	0.60	4.2	0.60	4.1	0.60	4.2	0.60	4.2	0.60	4.3	0.60	4.1	0.60	4.4	0.60	4.1
Durum 3	1.50	4.2	1.50	4.2	1.50	5.4	1.50	6.0	1.50	5.4	1.50	5.7	1.50	4.3	1.50	4.7
Durum 4	2.00	3.8	2.00	3.8	2.00	6.1	2.00	6.3	2.00	5.9	2.00	6.0	2.00	4.4	2.00	4.4
Durum 5	3.50	3.2	3.50	3.2	3.50	5.8	3.50	5.7	3.50	5.8	3.50	5.5	3.50	5.9	3.50	6.0



Şekil 3. Tüm durumlar için GNSS tabanlı yöntemler ve LVDT arasındaki farkların KOH değerleri

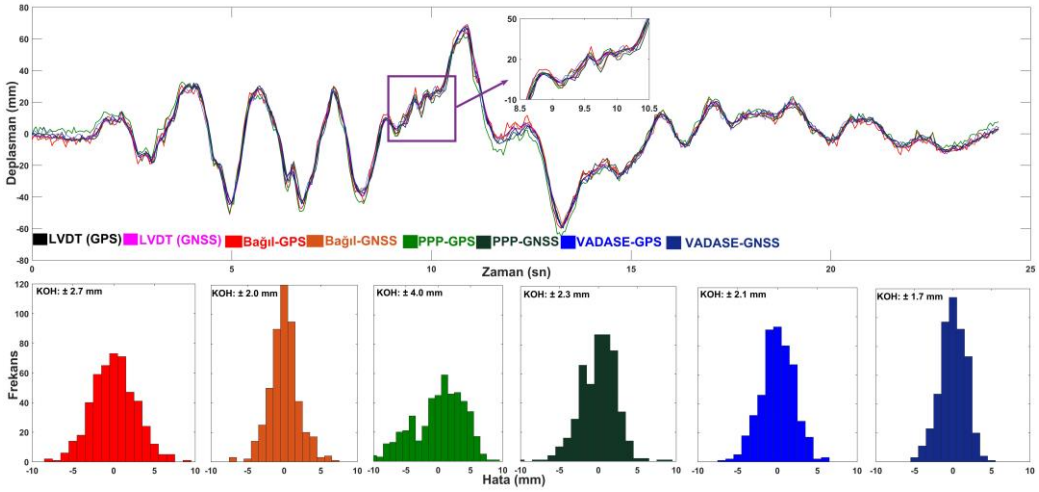
5. DEPREM SİMÜLASYONU SONUÇLARI

Çalışmanın bu bölümünde, olası erken uyarı sistemlerinde kullanılma potansiyeli olan VADASE yaklaşımının şiddetli yer sarsıntıları kaynaklı sismik dalgaları tespit edebilme yeteneği değerlendirilmiştir. Yöntemin performansının incelenmesi için sarsma tablası üzerinde 6.9 Mw Kobe depremi üretilmiştir. LVDT verileri, harmonik salınım deneylerine benzer bir şekilde sismik dalga formlarının tespit edilmesinde VADASE yaklaşımının etkinliğini doğrulamak için referans olarak kullanılmıştır.

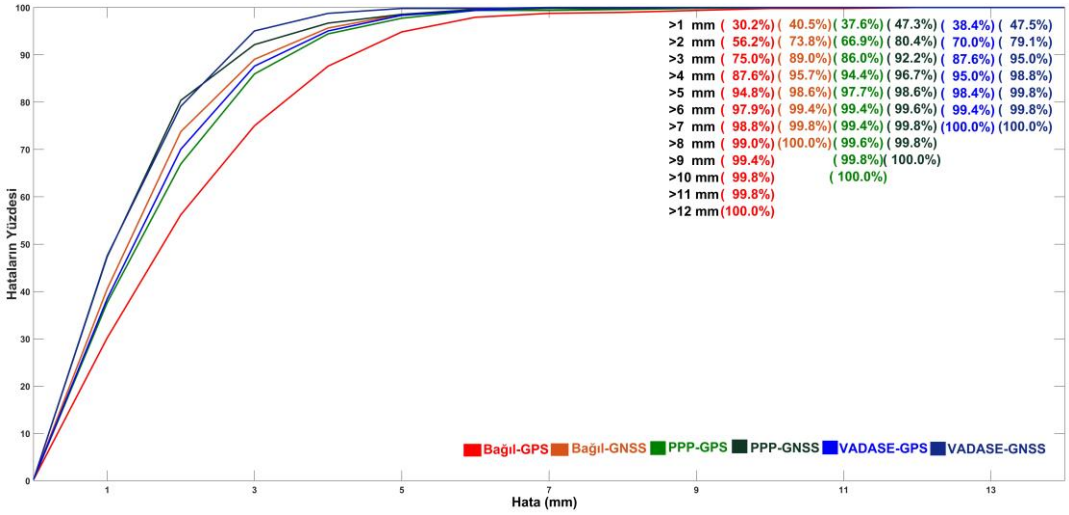
"Büyük Hanshin Depremi" olarak da bilinen Kobe depremi, 16 Ocak 1995'te saat 20:46 UTC'de Hyogo vilayetinin güney kesiminde 6.9 MW büyüklüğünde meydana gelmiştir. Bu çalışmada, Kobe depremi sırasında Kakogawa-KKGW istasyonunda kaydedilen doğal dalga formları kullanılmıştır. Depremin merkez üssünden kayıt istasyonuna olan mesafe yaklaşık olarak 20 km'dir. Çalışmada kullanılan kayıt yüksek genlikli ve kısa sürelidir (yaklaşık 20 saniye). İvme verilerinden hesaplanan deplasman değerleri, sarsma tablası limitlerine uyması için 0.35 çarpanıyla küçültülmüştür.

Şekil 4, Kobe depreminden seçilen bir kaydın simülasyonu ile GNSS-tabanlı yöntemlerden elde edilen deplasman zaman serilerinin yanı sıra, LVDT ve çalışma kapsamında tartışılan yöntemler arasındaki farkların histogramlarını içermektedir. Her iki uydu kombinasyonu ile elde edilen yöntemlerin LVDT ile iyi bir uyum sergilediği açıkça görülmektedir. Elde edilen farkların histogramlarına bakıldığında, bağıl yöntem ve VADASE yaklaşımlarının histogramlarının Gauss hata dağılımına uygun olduğu ve KOH değerlerinin GPS ve çoklu-GNSS için sırasıyla 2.7 mm, 2.0 mm, 2.1 mm ve 1.7 mm olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısını açıkça göstermektedir. PPP-GPS tekniğinin histogramı Gauss hata dağılımından biraz uzaklaşsa da tespit edilen dalga formu dikkate alındığında yöntemin başarılı olduğu ve VADASE sonuçlarına benzer bir şekilde çoklu-GNSS gözlemlerinin PPP sonuçlarını iyileştirdiği açıktır.

LVDT ve çalışma kapsamında tartışılan üç yöntemden elde edilen Kobe depremi dalga formları arasındaki hataların yüzdesel dağılımı, her iki uydu kombinasyonu için, Şekil 5'te görselleştirilmiştir. Şekil 5'te görülebileceği gibi, VADASE yaklaşımı diğer yöntemlerden biraz daha etkilidir. Bağıl-GPS ve bağıl-GNSS için LVDT'den olan farklar sırasıyla 12 mm ve 8 mm'nin altında kalırken, bu farklar PPP-GPS ve PPP-GNSS için 10 mm ve 9 mm'dir. VADASE yaklaşımında ise her iki uydu kombinasyonunun LVDT'den olan farkları 7 mm'nin altında kalmıştır. Bu sonuçlar bağıl ve PPP yöntemlerine çoklu-GNSS'in katkısını açıkça vurgularken, VADASE yönteminin depremler sırasında zeminde oluşan sismik dalga formlarını gerçek-zamanlı olarak başarılı bir şekilde yakalayabileceğini net bir şekilde göstermiştir. Kobe depremi simülasyonu deneyi sonuçları, depremler sırasında meydana gelebilecek can kayıplarını önlemeyi amaçlayan deprem/tsunami erken uyarı sistemlerinde, gerçek-zamanlı tek bir GNSS alıcısı ile izleme gerçekleştirme olanağı sağlayan VADASE yaklaşımının güvenli bir şekilde kullanılabileceğini açıkça işaret etmiştir



Şekil 4. Kobe depremi simülasyondan elde edilen zaman serileri (üst) ve LVDT ile GNSS sensörleri arasındaki hataların histogram ve KOH değerleri (alt).



Şekil 5. Kobe depremi için LVDT ile GNSS sensörleri arasındaki hataların yüzdesel dağılımı

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, tek bir GNSS alıcısı ile herhangi bir internet bağlantısı gerektirmeden dinamik hareketlerin gerçek zamanlı olarak izlenmesini sağlayan VADASE yaklaşımının kısa süreli dinamik hareketleri ve sismik dalga formlarını tespit etme performansını ve çoklu-GNSS gözlemlerinin yönteme olan katkısını sunmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, 5 mm genlik değerine ve 0.25 Hz ile 3.5 Hz arasında salınım frekansına sahip 5 adet harmonik salınım deneyi ve 6.9 Mw büyüklüğündeki 1995 Kobe depreminin simülasyonu tek eksenli bir sarsma tablasında üretilmiştir. Tasarlanan deney setlerinde VADASE tekniği ile gerçek-zamanlı olarak elde edilen elde edilen dinamik hareketlerin doğrulanması bağıl yöntem, PPP ve GNSS-bağımsız LVDT sensörleri ile sağlanmıştır. Frekans alanındaki harmonik salınım deneylerinin analizi, 3.5 Hz'e kadar olan frekansların, GPS ve çoklu-GNSS gözlemleri kullanılarak VADASE yaklaşımıyla başarılı bir şekilde tespit edilebileceğini ortaya koymuştur. Ancak, tespit edilen baskın frekansa karşılık gelen genlik değerleri mm düzeyinde farklılıklar vardır. Bu farklılıkların 2.8 mm'nin altında kaldığı düşünülürse tekniğin başarısı oldukça açıktır. VADASE tekniğinin harmonik salınımları algılama etkinliğini daha da detaylı incelemek için, frekans alanında gerçekleştirilen analizlere ek olarak zaman alanında da birtakım analizler gerçekleştirilmiştir. Bu alandaki bulgular, VADASE yaklaşımının bağıl yöntem ve PPP tekniklerinden biraz daha iyi performans gösterdiğini ve

yaklaşıma çoklu-GNSS gözlemlerinin zaman alanındaki katkısını açıkça vurgulamıştır. VADASE tekniğinin dinamik deplasmanların tespitinde bağıl yöntem ve PPP tekniğinden kısmen daha iyi performans göstermesi ve referans LVDT sensörüne daha yakın sonuçlar vermesinin nedenlerinden biri de VADASE için ayrı, bağıl yöntem ve PPP tekniği için ayrı alıcı ve anten donanımı kullanılmasıdır. Kullanılan iki farklı alıcı ve antenin sahip olduğu donanım kaynaklı gürültü seviyelerinin farklı olması, dinamik deplasmanların tespitini etkilemektedir. Harmonik salınım deneylerinin sonuçları, yapı sağlığı izleme sistemlerinin VADASE yaklaşımı ile işletilebileceğini ve bu yöntemle mühendislik yapılarının doğal frekanslarının belirlenebileceğini açıkça göstermiştir. VADASE yaklaşımının kuvvetli yer hareketlerinin neden olduğu sismik dalga formlarını tespit etme performansı 6.9 Mw büyüklüğüne sahip 1995 Kobe depremi simülasyonu ile incelenmiştir. Bu deneyde, VADASE yaklaşımı harmonik salınım testlerine benzer bir şekilde bağıl yöntem ve PPP tekniğinden biraz daha iyi performans gösterirken, çoklu-GNSS gözlemlerinin VADASE yaklaşımına olan katkısı doğrulanmıştır. Deprem simülasyon deneyi, deprem/tsunami erken uyarı sistemlerinin VADASE yaklaşımı ile işletilebileceğini ortaya koymuştur. Genel olarak bu çalışmanın sonuçları, gerçek zamanlı izleme gerektiren ve meydana gelebilecek can kayıplarını önlemeyi amaçlayan erken uyarı ve/veya yapı sağlığı izleme sistemlerinde VADASE yaklaşımının rahatlıkla kullanılabileceğini göstermiştir

TEŞEKKÜR

Çalışma sırasında sağlamış oldukları donanım ve yazılım destekleri için Sistem A.Ş. ve Leica-Geosystems AG firmalarına ve Net_Diff yazılımı için Dr. Yize Zhang'a teşekkür ederiz.

ORCID

Mert BEZCİOĞLU https://orcid.org/0000-0001-7179-8361
Barış KARADENİZ https://orcid.org/0000-0002-5093-5467
Cemal Özer YİĞİT https://orcid.org/0000-0002-1942-7667
Ahmet Anıl DİNDAR https://orcid.org/0000-0003-3168-8322
Fırat BEZİR https://orcid.org/0000-0002-4146-1992
Özgür AVCI https://orcid.org/0000-0002-1667-2587

KAYNAKLAR

Allen, R. M. ve Ziv, A. (2011). Application of real-time GPS to earthquake early warning. *Geophysical Research Letters*, *38*(16), 1–7. doi:10.1029/2011GL047947

Avallone, A., Latorre, D., Serpelloni, E., Cavaliere, A., Herrero, A., Cecere, G., … Selvaggi, G. (2016). Coseismic displacement waveforms for the 2016 August 24 Mw 6.0 Amatrice earthquake (central Italy) carried out from high-rate GPS data. *Annals of Geophysics*, *59*(FASTTRACK5), 0–11. doi:10.4401/ag-7275

Avallone, A., Marzario, M., Cirella, A., Piatanesi, A., Rovelli, A., Di Alessandro, C., … Mattone, M. (2011). Very high rate (10 Hz) GPS seismology for moderate-magnitude earthquakes: The case of the Mw 6.3 L'Aquila (central Italy) event. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *116*(2). doi:10.1029/2010JB007834

Benedetti, E., Branzanti, M., Biagi, L., Colosimo, G., Mazzoni, A. ve Crespi, M. (2014). Global navigation satellite systems seismology for the 2012 Mw 6.1 emilia earthquake: Exploiting the vadase algorithm. *Seismological Research Letters*, *85*(3), 649–656. doi:10.1785/0220130094

Bock, Y., Melgar, D. ve Crowell, B. W. (2011). Real-time strong-motion broadband displacements from collocated GPS and accelerometers. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *101*(6), 2904–2925. doi:10.1785/0120110007

Branzanti, M., Colosimo, G. ve Mazzoni, A. (2015). Variometric approach for real-time GNSS navigation: First demonstration of Kin-VADASE capabilities. *Advances in Space Research*. doi:10.1016/j.asr.2016.09.026

Cai, C. ve Gao, Y. (2008). Precise Point Positioning Using Combined GPS and GLONASS Observations, *6*(1), 13–22. doi:10.1017/S0373463313000039

Chen, L., Zhao, Q., Hu, Z., Jiang, X., Geng, C., Ge, M. ve Shi, C. (2018). GNSS global real-time augmentation positioning: Real-time precise satellite clock estimation, prototype system construction and performance analysis. *Advances in Space Research*, *61*(1), 367–384. doi:10.1016/j.asr.2017.08.037

Colosimo, G., Crespi, M. ve 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. doi:10.1029/2010JB007941

Fortunato, M., Ravanelli, M. ve Mazzoni, A. (2019). Real-time geophysical applications with Android GNSS raw measurements. *Remote Sensing*, *11*(18), 1–13. doi:10.3390/rs11182113

Fratarcangeli, F., Savastano, G., D'Achille, M. C., Mazzoni, A., Crespi, M., Riguzzi, F., … Pietrantonio, G. (2018). VADASE reliability and accuracy of real-time displacement estimation: Application to the Central Italy 2016 earthquakes. *Remote Sensing*, *10*(8), 1–20. doi:10.3390/rs10081201

Geng, J., Bock, Y., Melgar, D., Crowell, B. W. ve Haase, J. S. (2013). A new seismogeodetic approach applied to GPS and accelerometer observations of the 2012 Brawley seismic swarm: Implications for earthquake early warning. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. doi:10.1002/ggge.20144

Geng, T., Xie, X., Fang, R., Su, X., Zhao, Q., Liu, G., … Liu, J. (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. doi:10.1002/2015GL067044

Hefty, J. ve Gerhatova, L. (2012). Potential of Precise Point Positioning using 1 Hz GPS data for detection of seismic-related displacements. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, *9*(3), 303–313.

Hoechner, A., Ge, M., Babeyko, A. Y. ve Sobolev, S. V. (2013). Instant tsunami early warning based on real-time GPS-Tohoku 2011 case study. *Natural Hazards and Earth System Science*, *13*(5), 1285–1292. doi:10.5194/nhess-13-1285-2013

Hung, H. K., Rau, R. J., Benedetti, E., Branzanti, M., Mazzoni, A., Colosimo, G. ve 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). doi:10.4401/ag-7399

Kaloop, M. R., Yigit, C. O., El-Mowafy, A., Bezcioglu, M., Dindar, A. A. ve Hu, J. W. (2020). Evaluation of multi-GNSS high-rate relative positioning for monitoring dynamic structural movements in the urban environment. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, *11*(1), 2239–2262. doi:10.1080/19475705.2020.1836040

Kouba, J. (2003). Measuring seismic waves induced by large earthquakes with GPS. *Studia Geophysica et Geodaetica*, *47*(4), 741–755. doi:10.1023/A:1026390618355

Larson, K. M. (2009). GPS seismology. *Journal of Geodesy*, *83*(3–4), 227–233. doi:10.1007/s00190-008-0233-x

Larson, K. M., Bodin, P. ve Gomberg, J. (2003). Using 1-Hz GPS data to measure deformations caused by the denali fault earthquake. *Science*, *300*(5624), 1421–1424. doi:10.1126/science.1084531

Li, X., Guo, B., Lu, C., Ge, M., Wickert, J. ve Schuh, H. (2014). Real-time GNSS seismology using a single receiver. *Geophysical Journal International*, *198*(1), 72–89. doi:10.1093/gji/ggu113

Melgar, D., Crowell, B. W., Geng, J., Allen, R. M., Bock, Y., Riquelme, S., … Ganas, A. (2015). Earthquake magnitude calculation without saturation from the scaling of peak ground displacement. *Geophysical Research Letters*, *42*(13), 5197–5205. doi:10.1002/2015GL064278

Nie, Z., Gao, Y., Wang, Z., Ji, S. ve Yang, H. (2018). An approach to GPS clock prediction for real-time PPP during outages of RTS stream. *GPS Solutions*, *22*(1), 1–14. doi:10.1007/s10291-017-0681-y

Psimoulis, P., Houlié, N., Meindl, M. ve Rothacher, M. (2015). Consistency of PPP GPS and strong-motion records: Case study of Mw9.0 Tohoku-Oki 2011 earthquake. *Smart Structures and Systems*, *16*(2), 347–366. doi:10.12989/sss.2015.16.2.347

Shu, Y., Shi, Y., Xu, P., Niu, X. ve Liu, J. (2017). Error analysis of high-rate GNSS precise point positioning for seismic wave measurement. *Advances in Space Research*, *59*(11), 2691–2713. doi:10.1016/j.asr.2017.02.006

Wang, L., Li, Z., Ge, M., Neitzel, F., Wang, Z. ve Yuan, H. (2018). Validation and assessment of multi-GNSS real-time precise point positioning in simulated kinematic mode using IGS real-time service. *Remote Sensing*, *10*(2). doi:10.3390/rs10020337

Wang, Z., Li, Z., Wang, L., Wang, X. ve Yuan, H. (2018). Assessment of multiple GNSS real-Time SSR products from different analysis centers. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *7*(3). doi:10.3390/ijgi7030085

Xu, P., Shi, C., Fang, R., Liu, J., Niu, X., Zhang, Q. ve 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:10.1007/s00190-012-0606-z

Xu, P., Shu, Y., Liu, J., Nishimura, T., Shi, Y. ve Freymueller, J. T. (2019). A large scale of apparent sudden movements in Japan detected by high-rate GPS after the 2011 Tohoku Mw9.0 earthquake: Physical signals or unidentified artifacts? *Earth, Planets and Space*, *71*(1). doi:10.1186/s40623-019-1023-9

Yigit, C. O. (2016). Experimental assessment of post-processed kinematic Precise Point Positioning method for structural health monitoring. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, *7*(1), 360–383. doi:10.1080/19475705.2014.917724

Yigit, C. O., El-Mowafy, A., Anil Dindar, A., Bezcioglu, M. ve Tiryakioglu, I. (2021). Investigating Performance of High-Rate GNSS-PPP and PPP-AR for Structural Health Monitoring: Dynamic Tests on Shake Table. *Journal of Surveying Engineering*, *147*(1), 05020011. doi:10.1061/(asce)su.1943-5428.0000343

Yigit, C. O., El-Mowafy, A., Bezcioglu, M. ve Dindar, A. A. (2020). Investigating the effects of ultra-rapid, rapid vs. Final precise orbit and clock products on high-rate GNSS-PPP for capturing dynamic displacements. *Structural Engineering and Mechanics*, *73*(4), 424–436. doi:10.12989/sem.2020.73.4.427

Yigit, C. O. ve Gurlek, E. (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. doi:10.1080/19475705.2017.1284160

Zang, J., Xu, C. ve Li, X. (2020). Scaling earthquake magnitude in real time with high-rate GNSS peak ground displacement from variometric approach. *GPS Solutions*, *24*(4), 1–10. doi:10.1007/s10291-020-01013-x

Zhang, Y., Nie, Z., Wang, Z., Wu, H. ve Xu, X. (2021). Real-time coseismic displacement retrieval based on temporal point positioning with igs rts correction products. *Sensors (Switzerland)*, *21*(2), 1–17. doi:10.3390/s21020334

Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M. ve 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. doi:10.1029/96JB03860