



Düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı gerçek-zamanlı hassas nokta konum belirleme (RT-PPP) tekniğinin performansının değerlendirilmesi ve çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısı

Evaluation of the performance of the real-time precise point positioning (RT-PPP) technique based on low-cost GNSS observations and contribution of multi-GNSS observations

Mert Bezcioglu^{1,*} 

¹ Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Kocaeli Türkiye

Öz

Bu çalışma, düşük maliyetli Küresel Uydu Navigasyon Sistemi (Global Navigation Satellite Systems -GNSS-) gözlemlerine dayalı Gerçek-Zamanlı Hassas Nokta Konum Belirleme (Real-Time Precise Point Positioning -RT-PPP-) tekniğinin konum belirleme performansının araştırılmasını ve yönteme çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısını sunmaktadır. Çalışmada, iki adet düşük maliyetli u-blox ZED-F9P alıcısı ve ANN-MB-00 anteni kullanılarak statik ve kinematik modda iki farklı deney gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen iki deney setinde de Küresel Konum Belirleme Sistemi (Global Positioning System -GPS-) ve GPS+Galileo gözlemlerine dayalı olarak IGS03 akışından elde edilen gerçek-zamanlı hassas yörünge ve saat düzeltmelerinden elde edilen ürünlerle RT-PPP çözümleri gerçekleştirilmiş ve bu sonuçlar, GPS+Galileo gözlemlerine dayalı Gerçek-Zamanlı Kinematik (Real-Time Kinematic -RTK-) verileri ile karşılaştırılmıştır. Statik modda gerçekleştirilen deneyin bulguları, çoklu-GNSS gözlemlerinin sadece-GPS gözlemlerine kıyasla yaklaşık olarak 30 dakika daha erken yakınsadığını ve sağa, yukarı ve h bileşenleri için sırasıyla ± 3 , ± 11 ve ± 6 cm mertebesinde daha hassas konum doğruluğu sağladığını açıkça göstermektedir. Kinematik deney sonuçları ise çoklu-GNSS gözlemlerinin tek sisteme kıyasla elde edilen konum doğruluğunu yatay ve düşey bileşenler için sırasıyla %33 ve %25 oranında iyileştirdiğini ifade etmektedir. Ancak, her iki deneyden elde edilen sonuçların dm mertebesinde olduğu göz önüne alındığında, düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğinin yüksek doğruluk gerektiren jeodezik uygulamalarda yeterli olmayacağını, buna karşılık navigasyon uygulamaları için yeterli doğruluk sağladığı açıktır.

Anahtar kelimeler: GNSS, Düşük-maliyetli GNSS, RTK, RT-PPP, u-blox

1 Giriş

Hassas Nokta Konum Belirleme (Precise Point Positioning -PPP-), rölatif konum belirleme yönteminin aksine sabit bir Küresel Uydu Navigasyon Sistemi (Global

Abstract

This study presents an investigation of the positioning performance of the Real-Time Precise Point Positioning (RT-PPP) technique based on low-cost Global Navigation Satellite Systems (GNSS) observations and the contribution of multi-GNSS observations to the method. In the study, two different experiments were performed in static and kinematic modes employing two low-cost u-blox ZED-F9P receivers and ANN-MB-00 antennas. In both experiments, RT-PPP solutions were performed using the products obtained from the real-time precise orbit and clock corrections from the IGS03 stream based on Global Positioning System (GPS) and GPS+Galileo observations, and these results were compared with the Real-Time Kinematic (RTK) data based on GPS+Galileo observations. The findings of the experiment realized in static mode clearly demonstrated that the multi-GNSS observations converge about 30 minutes earlier than GPS-only observations and provide approximately ± 3 , ± 11 , and ± 6 cm more precise position accuracy for the east, north, and up components, respectively. The kinematic test results indicated that the multi-GNSS observations improved the position accuracy obtained compared to a single system by 33% and 25% for horizontal and vertical components, respectively. However, considering that the results obtained from both experiments are in the order of dm, it is clear that the RT-PPP technique based on low-cost GNSS observations will not be sufficient in geodetic applications that require high accuracy, whereas it provides sufficient accuracy for navigation applications.

Keywords: GNSS, Low-cost GNSS, RTK, RT-PPP, u-blox

Navigation Satellite Systems -GNSS-) istasyonu gibi harici bir altyapı gerektirmeden tek GNSS alıcısından gelen gözlemleri kullanarak yüksek hassasiyette konum belirlemeye olanak sağlayan oldukça güçlü bir tekniktir [1-3]. Son yıllarda PPP tekniğinin seyrüsefer uygulamaları [4,

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mbezcioglu@gtu.edu.tr (M. Bezcioglu)
Geliş / Received: 06.06.2023 Kabul / Accepted: 04.09.2023 Yayınlanma / Published: 15.10.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1310577

5], hassas tarım [6], dinamik davranışların ve deprem kaynaklı şiddetli yer değiştirmelerinin belirlenmesi [7, 8] ve atmosfer [9, 10] çalışmaları gibi birçok alanda kullanılabilirliği gerçekleştirilen çalışmalar ile birlikte öne sürülmüştür. Ek olarak, PPP tekniği yüksek hassasiyette konum belirlemek için hassas yörünge ve saat düzeltmelerine ihtiyaç duymaktadır [11]. Ancak Uluslararası GNSS Servisi (International GNSS Service -IGS-) gibi farklı analiz merkezleri tarafından kullanıcılara sunulan ultra-rapid, rapid ve final ürünler sırasıyla 2 saat, 17 saat ve 13 günlük bir gecikme ile GNSS kullanıcısı ile paylaşılmaktadır ki, bu durum söz konusu yörünge ve saat ürünlerinin gerçek-zamanlı uygulamalar için kullanışlı olmayacağı anlamına gelmektedir [12].

Gerçek-zamanlı olarak tek GNSS alıcısı ile konum belirlemeye yönelik yükselen ilginin bir sonucu olarak IGS tarafından 2000'li yılların ortasında Gerçek Zamanlı Pilot Projesi (Real Time Pilot Project -RTPP-) başlatılmış ve bu projenin sonucunda yaklaşık olarak on yıldır Deniz Hizmetleri Radyo Teknik Komisyonu (Radio Technical Commission for Maritime Services -RTCM-) aracılığı ile GNSS kullanıcıları gerçek-zamanlı hassas yörünge ve saat düzeltmelerine erişim imkanına sahiptir [13, 14]. Gerçek-zamanlı ürünler Küresel Konum Belirleme Sistemi (Global Positioning System -GPS-) sistemine saat bilgisi için 0.3 ns ve yörünge bilgisi için 5 cm doğrulukta destek vermektedir [15]. Ek olarak, gerçek-zamanlı ürünler kullanılarak gerçekleştirilen Gerçek-Zamanlı Hassas Nokta Konum Belirleme (Real-Time Precise Point Positioning -RT-PPP-) tekniğinin statik ve kinematik moddaki konum belirleme performansı [16–18], deprem ve tsunami kaynaklı güçlü yer sarsıntılarını belirleyebilme yeteneği [19, 20], yapı sağlığı izleme alanındaki kullanılabilirliği [21, 22] ve atmosfer [23–25] çalışmalarındaki başarısını inceleyen çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin, Öcalan ve Soycan [26], RT-PPP tekniğinin konum belirleme performansını incelemek amacıyla sabit bir istasyondan elde edilen verileri BNC v2.5 yazılımı ile değerlendirmiş ve RT-PPP yönteminin yatay ve düşey bileşenlerde cm mertebesinde konum bilgisi elde etmeye olanak sağladığını ileri sürmüşlerdir. Alçay [27], IGS-Gerçek-zamanlı Servis (Real-Time Service -RTS-) aracılığı ile elde edilen 7 farklı istasyondan elde ettiği verileri BNC v.2.12.6 yazılımı ile değerlendirmiş ve RT-PPP tekniğinin yakınsama süresi sonunda ± 10 cm doğruluk sağladığını ifade etmiştir. Alçay ve Atiz [28], sabit bir IGS istasyonundan elde ettiği verileri BNC v2.12, RTKLIB v2.4.3 ve PPP-WIZARD v1.4.2 yazılımları ile sadece-GPS gözlemlerine dayalı olarak gerçek-zamanlı olarak değerlendirmiş ve 1 saatlik bir yakınsama süresinin ardından BNC ve RTKLIB yazılımları ile yatay bileşenlerde ± 10 cm, düşey bileşende ise ± 20 cm elde edildiğini belirtmişlerdir. Alkan vd. [29], Antarktika bölgesindeki bir IGS istasyonundan elde ettiği verileri BNC v2.12 yazılımı ile sadece-GPS, GPS+GLONASS, GPS+GLONASS+Galileo, GPS+GLONASS+Galileo+BeiDou uydu kombinasyonları ile değerlendirmiş ve sonuçların RT-PPP yönteminin kullanıcıya kullanılan uydu sistemine bağlı olarak yatay bileşenlerde ± 3 - ± 12 cm, düşey bileşende ise ± 5 - ± 17 cm aralığında konum bilgisi sağladığını öne sürmüşlerdir. İnal

vd. [30], jeomanyetik aktivitelerin yoğun olduğu bir günde 3 farklı IGS istasyonundan elde ettiği gözlemleri RTKLIB yazılımı ile gerçek-zamanlı şartlar altında farklı uydu sistemlerinin kombinasyonunu da dikkate alarak sonradan değerlendirmiş ve RT-PPP tekniğinin dm mertebesinde doğruluk sağladığını bildirmişlerdir.

PPP yöntemi kullanarak hassas ve doğru sonuçlar elde etmek ve GNSS gözlemlerinin en önemli hata kaynaklarından biri olan iyonosfer hatasını elemine etmek için genellikle yüksek maliyetli üst düzey bir çift/çoklu frekans gözlemlerini toplayabilme yeteneğine sahip GNSS alıcısı kullanılmaktadır. Üst düzey GNSS alıcılarının yüksek maliyeti ise geniş bir kullanıcı kitlesi tarafından benimsenmesinin önündeki en büyük engeldir. Tek-frekanslı GNSS alıcıları bugüne kadar düşük-maliyetli pazarda hala baskın olmasına rağmen, gelişen teknoloji ile birlikte son zamanlarda düşük maliyetli ve çoklu-GNSS gözlemlerini toplayabilme yeteneğine sahip çift-frekanslı GNSS modülleri ortaya çıkmıştır [31]. Örneğin, yaklaşık olarak 5 yıl önce İsviçreli bir firma olan u-blox tarafından yaklaşık olarak 200 USD maliyetli ve çift-frekanslı GNSS alıcısı ZED-F9P piyasaya sürülmüştür [32]. Mevcut tüm GNSS sistemlerinden gözlem toplayama olarak sağlayan bu alıcısının ise birçok farklı alanda uygulanabilirliği test edilmiş durumdadır [33]. Janos ve Kuras [32], u-blox ZED-F9P alıcısının zorlu koşullar altında Gerçek-Zamanlı Kinematik (Real-Time Kinematic -RTK-) modundaki performansını çoklu-GNSS gözlemlerine dayalı olarak hem jeodezik hem de düşük maliyetli antenler ile test etmiş ve söz konusu alıcının RTK modunda yatayda cm, düşeyde ise dm mertebesinde doğruluk ve hassasiyet sağladığını belirtmişlerdir. Sanna vd. [34], u-blox ZED-F9P alıcısının statik ve kinematik moddaki RTK yeteneğini çoklu-GNSS gözlemlerine dayalı olarak jeodezik ve düşük maliyetli antenler ile incelemiş ve yatay ve düşey bileşenlerde sırasıyla ± 3 cm ve ± 10 cm'lik duyarlılık elde edebileceğini ifade etmişlerdir. Nie vd [31], u-blox ZED-F9P alıcısının statik ve kinematik moddaki RT-PPP performansını GPS ve GLONASS uydu kombinasyonuna dayalı olarak düşük maliyetli anten ile RTK tekniği ile karşılaştırmalı olarak değerlendirmiş ve buradan elde edilen sonuçların iyileştirilmesi için yeni bir model önermişlerdir. Kinematik modda elde ettikleri ham RT-PPP sonuçlarında sağa, yukarı ve h bileşenleri için sırasıyla ± 47 cm, ± 23 cm ve ± 65 cm'lik doğruluk elde ettiklerini, önerdikleri yeni yöntem ile bu sonuçların yatay bileşenlerde ortalama olarak 7 cm düşey bileşende ise 30 cm'lik iyileşme sağlanabileceğini öne sürmüşlerdir. Di vd [35], u-blox ZED-F9P alıcısının seyrüsefer uygulamalarındaki RT-PPP performansını jeodezik antenden elde edilen gözlemler ile Antarktika bölgesinde GPS ve GPS+GLONASS+BeiDou uydu kombinasyonlarına dayalı olarak final ürünlere bağlı sonradan-değerlendirme PPP sonuçları ile karşılaştırmalı olarak değerlendirmiş ve sadece-GPS sonuçlarında dm mertebesinde doğruluk elde edilirken, çoklu-GNSS gözlemlerinde mm mertebesinde doğruluk elde edildiğini ifade etmişlerdir. Hohensinn vd. [36], u-blox ZED-F9P alıcısının dinamik davranışları belirleyebilme yeteneğini RT-PPP tekniği ile jeodezik ve düşük maliyetli anten kullanarak

değerlendirmiş ve u-blox ZED-F9P alıcısının jeodezik anten ile daha başarılı sonuçlar elde edebileceğini öne sürmüşlerdir. Son olarak Oku Topal vd [37], u-blox ZED-F9P alıcısından elde edilen gözlemlere dayalı PPP tekniğinin yatay yönlü kalıcı deplasmanları tespit edebilme yeteneğini ultra-rapid, rapid ve final ürünler ile değerlendirmiş ve düşük maliyetli-GNSS alıcılarının jeodezik antenlere güçlü bir alternatif olabileceğini vurgulamışlardır.

Mevcut literatür incelendiğinde yüksek bütçeli jeodezik anten ve alıcılar ile RT-PPP tekniğinin performansının ve ve çoklu-GNSS gözlemlerinin ilgili yöntemle olan katkısının yeterince değerlendirildiği görülmektedir. Ancak, düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı statik ve kinematik moddaki RT-PPP tekniğinin performansı ve bu yöntemle çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısının RTK tekniği ile karşılaştırmalı bir analizinin henüz detaylı bir şekilde incelenmediği son derece açıktır. Bu çalışmada mevcut literatürdeki çalışmalardan farklı olarak ilk defa düşük maliyetli GNSS alıcısı ve antenine dayalı RT-PPP tekniğinin konum belirleme performansı RTK tekniği ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve GPS gözlemlerine Galileo uydu takımı yıldızlarının katkısı araştırılmıştır. Çalışmanın amacı doğrultusunda önce statik, daha sonra da kinematik moda gerçek-zamanlı olarak deneyler gerçekleştirilmiş ve RT-PPP sonuçları RTK çözümleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmayı mevcut literatürdeki çalışmalardan ayıran en önemli özelliklerden biri, çalışma kapsamında elde edilen G (GPS) ve GE (GPS+Galileo) RT-PPP ve GE RTK sonuçların gerçek-zamanlı moda eş zamanlı olarak edilmesi ve RT-PPP tekniğinin performansının RTK yöntemine ne kadar yaklaşabildiğinin detaylı olarak incelenmesidir.

2 Materyal ve metot

2.1 RT-PPP tekniği

RT-PPP tekniğinin matematiksel modeli öncelikle Denklem (1) ve Denklem (2)'de ifade edilen iyonosfer-bağımsız çift-frekanslı GNSS ham kod ve taşıyıcı faz gözlemlerine dayanmaktadır. Aşağıda belirtilen denklemlerde L_3 ve P_3 iyonosfer-bağımsız faz ve kod ölçülerini temsil etmektedir. ρ alıcı-uydu arasındaki mesafeyi ifade ederken, c ışığın uzay boşluğundaki hızına karşılık gelmektedir. dt^s ve dt^r sembolleri sırasıyla uydu ve alıcı saat hatasını, b_*^r ve b_*^s ifadeleri ise sırasıyla alıcı ve uydu kayıklıklarını ifade etmektedir. T gözlemlerde meydana gelen troposferik gecikmeyi temsil ederken, ε_{L3} ve ε_{P3} sembolleri faz ve kod ölçülerinde gürültülere karşılık gelmektedir.

$$L_3 = \rho + d_{orb} + c(dt^r - dt^s) + T - \lambda_3 N_3 + b_{L3}^r - b_{L3}^s + \varepsilon_{L3} \quad (1)$$

$$P_3 = \rho + d_{orb} + c(dt^r - dt^s) + T + b_{P3}^r - b_{P3}^s + \varepsilon_{P3} \quad (2)$$

RT-PPP tekniği, temelde geleneksel-PPP tekniğine dayandığı için gerçek-zamanlı hassas yörünge ve saat düzeltmelerine ihtiyaç duymaktadır. RT-PPP yöntemi için gerekli düzeltmeler bu amaç doğrultusunda ortaya çıkmış çeşitli protokoller kullanılarak kullanıcıya sunulmaktadır.

Gerçek-zamanlı yörünge ve saat düzeltmeleri, bu protokoller vasıtasıyla GNSS-kullanıcısına sunulan ve gözlemler sırasında elde edilen yayın yörünge bilgilerinin düzeltmelerini içermektedir. Gerçek-zamanlı hassas yörünge ve saat ürünleri Δ_{SSR} sembolü ile ifade edilmekte ve t_0 referans epogunda ve RTCM-Durum Uzay Temsili (State Space Representation -SSR-) formatında kullanıcıya iletilir. İletilen bilgilerde ilgili düzeltmelerin uydu yörüngesi boyunca (δ_a), dünya yer merkezini birleştiren doğrultu boyunca (δ_r), ve uydu yörüngesi doğrultusuna dik (δ_c) doğrultuda bilgileri ve bu bilgilerin hızları ($\delta_{\dot{r}}, \delta_{\dot{a}}, \delta_{\dot{c}}$) efemeris yayın zamanını (IOD) bilgileri ile yer almaktadır [15, 38].

$$\Delta_{SSR} = (t_0, IOD) = (\delta_r, \delta_a, \delta_c, \delta_{\dot{r}}, \delta_{\dot{a}}, \delta_{\dot{c}}, c_0, c_1, c_2) \quad (3)$$

Denklem (3)'te yer alan c_0, c_1 ve c_2 sembolleri hassas saat düzeltme bilgilerini elde edebilmek için kullanılan polinom katsayılarıdır. Δ_{SSR} bilgisinden faydalanılarak t ölçme epogundaki uydu yörüngesi boyunca, doğrultu boyunca ve uydu yörüngesi doğrultusuna dik doğrultudaki yörünge düzeltmeleri Denklem (4)'te ifade edildiği gibi elde edilebilir.

$$\delta = \begin{bmatrix} \delta R \\ \delta A \\ \delta C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_r \\ \delta_a \\ \delta_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{\dot{r}} \\ \delta_{\dot{a}} \\ \delta_{\dot{c}} \end{bmatrix} (t - t_0) \quad (4)$$

RTCM-SSR hassas yörünge ürünleri kullanıcıya uydu sabit-sistemde iletildiği için bu düzeltmelerin uydu yörüngesi boyunca, dünya yer merkezini birleştiren doğrultu boyunca ve uydu yörüngesi doğrultusuna dik doğrultudaki birim vektörler (e_A, e_c, e_r) kullanılarak Yer-Merkezli, Yer-Sabit (Earth-Centered, Earth-Fixed -ECEF-) koordinat sistemine dönüşümü sağlanmalıdır.

$$e_A = \frac{\dot{r}}{|\dot{r}|}, \quad e_c = \frac{r \times \dot{r}}{|r \times \dot{r}|}, \quad e_r = e_A \times e_c \quad (5)$$

Denklem (5)'te yer alan \dot{r} ve r sembolleri sırasıyla yayın yörünge bilgileri kullanılarak elde edilen uydu pozisyon hızını ve uydu pozisyonunu temsil etmektedir. Son aşamada ise, gerçek-zamanlı olarak kullanıcıya sunulan düzeltmelerin uydu-sabit sistemden jeosentrik koordinat sistemine dönüştürülmesinin ardından gerçek-zamanlı hassas yörünge bilgileri elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{bmatrix} + [e_r \quad e_A \quad e_c] \begin{bmatrix} \delta R \\ \delta A \\ \delta C \end{bmatrix} \quad (6)$$

Denklem (6)'da yer verilen p ve b sembolleri sırasıyla hassas ve yayın uydu pozisyonlarını temsil etmektedir. Bu aşamada elde edilen hassas yörünge bilgilerinin Anten Faz Merkezi (Antenna Phase Centre -APC-) veya Kütle Merkezi (Center of Mass -CoM-) olarak kullanıcıya sunulabileceğini ifade etmek gerekmektedir. APC düzeltmeleri direkt olarak

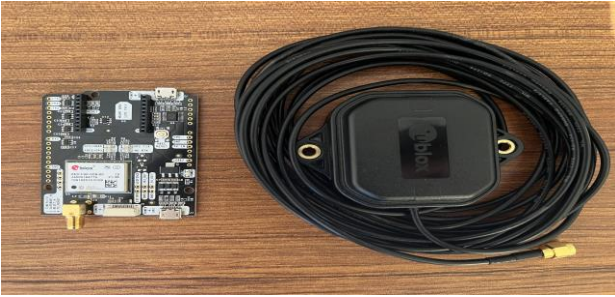
konum bilgisi elde etmek için kullanılırken, CoM bilgileri ek olarak faz merkezi kayıklığı bilgisi gerektirmektedir.

Son aşamada ise **Denklem (7)**'de ifade edildiği gibi, ölçü epoğundaki hassas saat bilgilerini elde etmek amacıyla Δ_{SSR} düzeltmelerinin içinde yer alan polinom katsayıları kullanılmaktadır. Söz konusu denklemde T_b ve T_p sembolleri sırasıyla gerçek-zamanlı olarak elde edilen yayın ve hassas saat düzeltme bilgilerini temsil etmektedir.

$$dT_p = dT_b + \frac{c_0 + c_1(t - t_0) + C_2(t - t_0)^2}{c} \quad (7)$$

2.2 Deney tasarımı

Düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğinin konum belirleme performansının incelenmesi ve RT-PPP tekniğine çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısının değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilen deneyler çalışmanın bu bölümünde okuyucuya sunulmaktadır. Çalışmanın ana fikri doğrultusunda statik ve kinematik modda olmak üzere iki farklı deney 29.05.2023 tarihinde Gebze Teknik Üniversitesi kampüsünde gerçekleştirilmiştir. Söz konusu iki deneyde de düşük maliyetli u-blox ZED-F9P alıcısı ve ANN-MB-00 anteni kullanılmıştır (**Şekil 1**). İ

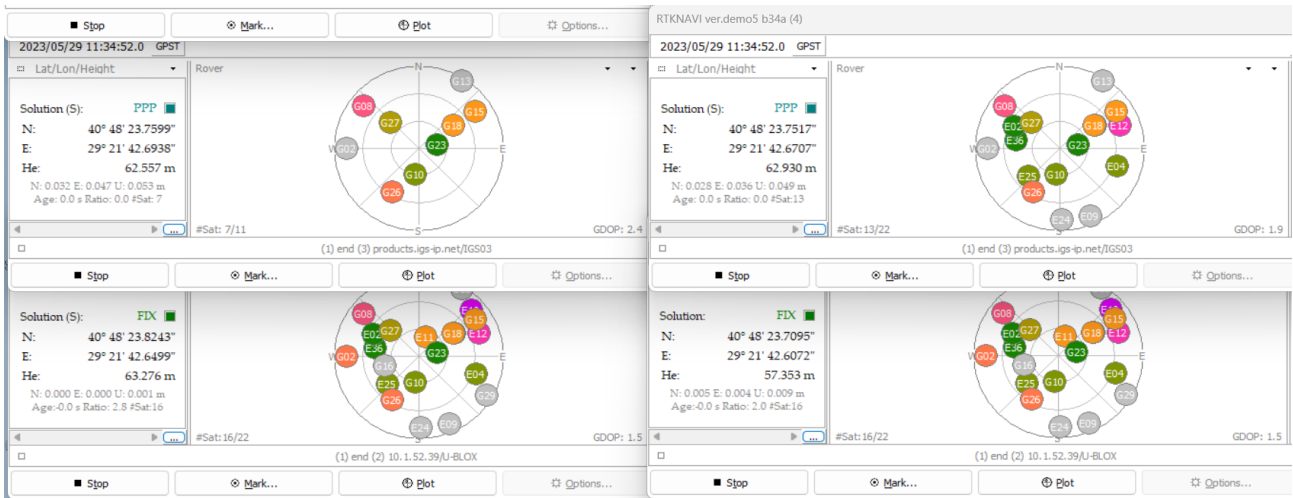


Şekil 1. Deneylerde kullanılan anten ve alıcı

lk deney, yukarıda da ifade edildiği gibi statik modda gerçekleştirilmiştir. Gebze Teknik Üniversitesi kampüsünde bulunan Harita Mühendisliği binasının çatısına biri sabit

değeri gezici olmak üzere yaklaşık olarak 20 m ara ile 1 Hz örneklem aralığına ayarlanmış, yansıtıcı yüzey etkisinden uzak ve çevresinde gözlem kaybına engel olabilecek herhangi bir obje olmayan iki alıcı yerleştirilmiş ve söz konusu alıcılar çift-frekanslı gözlemler elde etmişlerdir. Sabit alıcıdan elde edilen gözlemler çatının alt katında bulunan bir masaüstü bilgisayara aktarılmış ve bu bilgisayar üzerinden NTRIP aracılığı ile çatıda yer alan dizüstü bilgisayara iletilmiştir. Gezici alıcı verileri ise doğrudan bağlantı ile bilgisayara aktarılmıştır. Sabit ve gezici alıcıdan elde edilen gözlem verileri **Şekil 2**'de belirtildiği RTKLIB demo5_b34a yazılımının RTKNAVI modülünde RTK ve RT-PPP modlarında GPS (G) ve GPS+Galileo (GE) uydu kombinasyonlarına dayalı bir şekilde eş zamanlı olarak gerçek-zamanlı değerlendirilmiştir [39]. Statik deney yaklaşık olarak 130 dakika sürmüştür ve gözlemler 5°'lik uydu yükseklik açısı altında toplanmıştır. Deneyler sırasında gözlemlenmiştir. Bu süre içerisinde Galileo uydularının gözlemlenme sayısı ise 3 ile 7 arasındadır ve ortalama olarak 6 Galileo uydusundan gözlem elde edilmiştir. Ek olarak, sadece-GPS gözlemleri sırasında elde edilen ortalama PDOP değeri 1.3 iken, GPS+Galileo gözlemlerinin PDOP değeri 1.0'dır.

Düşük maliyetli GNSS alıcısı ve anteninden elde edilen gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğinin konum belirleme performansının ve bu performansa çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısının değerlendirilmesi kapsamında statik deneylere ek olarak kinematik bir deney de gerçekleştirilmiştir. Statik deneyler sırasında kurulan sabit istasyon verisi kesintisiz bir şekilde bu deney içinde gözlem toplamaya devam etmiştir. Gezici anteni ise **Şekil 3**'te gösterildiği gibi bir aracın üzerine monte edilmiştir. İlgili şekilde aracın içindeki bir dizüstü bilgisayara gezici alıcısının verileri doğrudan aktarılırken, statik deneylerde olduğu gibi sabit alıcının gözlemleri NTRIP akışından aracın içerisinde bulunan bilgisayara iletilmiştir. Kinematik deney sırasında alıcılar statik deneyde olduğu gibi 1 Hz örneklem aralığında gözlem elde etmişlerdir.



Şekil 2. Statik deneyler sırasında gerçekleştirilen çözümlerden bir görünüm (Sol üst: RT-PPP G, Sağ üst: RT-PPP GE, Sol alt: RTK GE)



Şekil 3. Kinematik deney testinde kullanılan araç/düşük maliyetli GNSS anteni (sol) ve deney rotası (sağ)

Statik deneylerin gerçekleştirilmesine benzer bir şekilde, kinematik deneyde de RTK ve RT-PPP çözümleri için RTKLIB demo5_b34a yazılımının RTKNAVI modülü kullanılmıştır. Şekil 4, kinematik deneyler sırasında elde edilen çözümlerden bir anı içermektedir. Kinematik deneyler sırasında çözümler başlatıldıktan sonra yaklaşık olarak 20 dakika boyunca araç hareketsiz olarak bekletilmiş ve daha sonrasında da Şekil 3'te belirtilen rota yaklaşık olarak 15 dakika boyunca takip edilmiştir. Deney sırasında statik deneye benzer şekilde uydu gözlemleri 5°'lik uydu yükseklik açısı altında toplanmıştır. Hareketsiz olarak beklenen sürelerde dahil olmak üzere kinematik deney sırasında GPS ve Galileo uydu takımı yıldızları için ortalama olarak 6 uydu gözlemlenmiştir. Kinematik deneyler sırasında sadece-GPS gözlemlerinin ortalama PDOP değeri 1.4 iken, GPS+Galileo gözlemlerinin ortalama PDOP değeri 1.0'dır.



Şekil 4. Kinematik deneyler sırasında gerçekleştirilen çözümlerden bir görünüm (Üst: RT-PPP GE, Alt: RT-PPP G)

Tablo 1. RTK çözümleri için seçilen değerlendirme parametreleri

	Konumlama Modu	RTK Statik / Kinematik
	Frekanslar / Filtre Tipi	L1+L2 / Forward
Çözüm Parametreleri	Yükseklik Açısı (°) / SNR Maskesi (dBHz)	5° / OFF
	Alıcı Dinamikleri / Katı Yer Gel-Git Düzeltmesi	OFF / OFF
	İyonosferik Düzeltme	Broadcast
	Troposferik Düzeltme	Saastamoinen
	Uydu Yörünge/Saat	Broadcast
	Tamsayı Faz Belirsizliği Çözümü	Continuous
	Belirsizliği Çözmek için Min. Oran Testi Değeri	2
Başlangıç Faz Belirsizliği Parametreleri ve Eşik Değerleri	Belirsizlik Çözümü için Min. Kitlenme/ Kesme Açısı (°)	0 / 0
	Belirsizliği Sıfırlamak için Kesinti/ Faz Sıçraması Eşik Değeri (m)	5 / 0.050
	İki İstasyon Arasındaki Farkların Maks. Değeri (s)	30.0
	GDOP Eşiği / Kalman Filtresi Innov. Eşiği (m)	30.0 / 30.0
Ölçü Hataları (1-sigma)	Maks. # Amb. İter. /# Filtre İter.	1 / 1
	Kod/Faz Hata Oranı L1/L2	100.0 / 100.0
	Kod/Faz Hatası a+b/sinE1 (m)	0.003 / 0.003
	Kod/Faz Hatası /Baz Vektörü (m/10km)	0.000
	Doppler Frekansı (Hz)	10000
Ölçü Gürültüleri (1-sigma/sqrt(s))	Alıcı İvmesi Yatay/Düşey (m/s2)	10.0 / 10.0
	Taşıyıcı Faz (cycle)	0.0001
	Düşey İyonosferik Gecikme (m/10km)	0.001
	Zenith Troposferik Gecikme (m)	0.0001

Tablo 2. RT-PPP çözümleri için seçilen değerlendirme parametreleri

	Konumlama Modu	PPP-Statik/Kinematik	
Çözüm Parametreleri	Frekanslar / Filtre Tipi	L1+L2 / Forward	
	Yükseklik Açısı (°) / SNR Maskesi (dBHz)	5° / OFF	
	Alıcı Dinamikleri / Katı Yer Gel-Git Düzeltmesi	ON / Solid+OTL	
	İyonosferik Düzeltme	Iono-Free LC	
	Troposferik Düzeltme	Estimate ZTD+Grad	
	Uydu Yörünge/Saat	Broadcast +SSR APC	
	Uydu Anten Faz Merkezi Düzeltmesi	✓	
	Alıcı Anten Faz Merkezi Düzeltmesi	✓	
	Faz Salınım Etkisi Düzeltmesi	✓	
	Gölgelenen Uyduları Reddet (GPS Block IIA için)	✓	
	Alıcı-Özerk Bütünlük Takibi (RAIM) Hata Tarama ve Giderme (FDE)	✓	
	DBC Düzeltmesi	✓	
	Eşik Değerleri	Belirsizliği Sıfırlamak için Kesinti / Faz Sıçraması Eşik Değeri (m)	5 / 0.050
		GDOP Eşiği / Kalman Filtresi Innov. Eşiği (m)	30.0 / 30.0
# Filtre İter.		1	
Ölçü Hataları (1-sigma)	Kod/Faz Hata Oranı L1/L2	100.0 / 100.0	
	Kod/Faz Hatası a+b/sinEl (m)	0.003 / 0.003	
	Kod/Faz Hatası /Baz Vektörü (m/10km)	0.000	
	Doppler Frekansı (Hz)	10.000	
Ölçü Gürültüleri (1-sigma/sqrt(s))	Alıcı İvmesi Yatay/Düşey (m/s2)	10.0 / 10.0	
	Taşıyıcı Faz (cycle)	0.0001	
	Düşey İyonosferik Gecikme (m/10km)	0.001	
	Zenith Troposferik Gecikme (m)	0.0001	

Düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğinin konum belirleme performansının değerlendirilmesinde referans yöntem olan RTK tekniği için yukarıda da belirtildiği üzere GPS ve Galileo uydu takımı yıldızlarının kombinasyonundan yararlanılmış ve ilgili yazılımda statik ve kinematik deneylerde tercih edilen işlem parametrelerine ise **Tablo 1**'de yer verilmiştir. Statik deneyler sırasında elde edilen tüm epoklar dikkate alındığında 130 dakikalık gözlem süresinin yaklaşık olarak %95'inde başlangıç faz belirsizliği değeri tamsayı olarak çözülmüştür. Kinematik deneylerde ise RTK tekniği tarafından elde edilen başlangıç faz belirsizliği çözüm oranı ise %89'dur. Her iki deneyde de RTK tekniği tarafından çözülemeyen başlangıç faz belirsizliğinin büyük bir bölümü deney sürecinin ilk aşamalarına karşılık gelmektedir.

Çalışmanın amacı ve kapsamı doğrultusunda gerçekleştirilen statik ve kinematik deneylerde RT-PPP çözümleri için gerekli olan gerçek-zamanlı hassas yörünge ve saat düzeltmeleri products.igs-ip.net:2101 aracılığı ile çoklu-GNSS gözlemlerine destek verme yeteneğine sahip IGS03 akışından elde edilmiştir. RT-PPP çözümleri için statik ve kinematik deneylerde kullanılan değerlendirme parametreleri ise **Tablo 2**'de özetlenmiştir. Çalışma kapsamında yürütülen iki deney sırasında da RT-PPP çözümleri herhangi bir kesintiye uğramamıştır.

3 Bulgular ve tartışma

Düşük maliyetli u-blox ZED-F9P alıcısı ve ANN-MB-00 anteninden elde edilen GNSS gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğinin konum belirleme performansının değerlendirilmesi ve çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısı bu bölümde değerlendirilecektir. Çalışmanın amacı doğrultusunda bölüm 2.2'de sunulan deney tasarımı gerçekleştirilmiş ve G ve GE gözlemlerine dayalı elde edilen RT-PPP sonuçları GE gözlemlerine dayalı elde edilen RTK sonuçları ile karşılaştırılmıştır. **Şekil 5**, statik deneyler sırasında farklı uydu kombinasyonlarına dayalı elde edilen RT-PPP çözümleri ile RTK sonuçları arasındaki farkların sağa, yukarı ve h bileşenleri için zaman serisini göstermektedir. Şekilden, her üç bileşen için GE uydu kombinasyonuna dayalı olarak elde edilen RT-PPP tekniğinin RTK yöntemi ile daha güçlü bir uyum gösterdiği açıkça görülmektedir. Ek olarak, güncel literatürde PPP tekniğinin yakınsama süresinin tespiti için yatay ve düşey bileşenlerde hataların sırasıyla 10 ve 20 cm değerinin altında ardışık olarak 60 epok boyunca kaldığı zaman değeri kabul görmektedir [40]. Ancak bu çalışmada elde edilen gözlemlerin düşük maliyetli GNSS alıcısı ve anteninden elde edildiği göz önünde bulundurularak yatay ve düşey bileşenler için sırasıyla 35 ve 70 cm değerinin altında kaldığı ve bu andan sonra belirlenen bu eşik değerlerinin üzerine

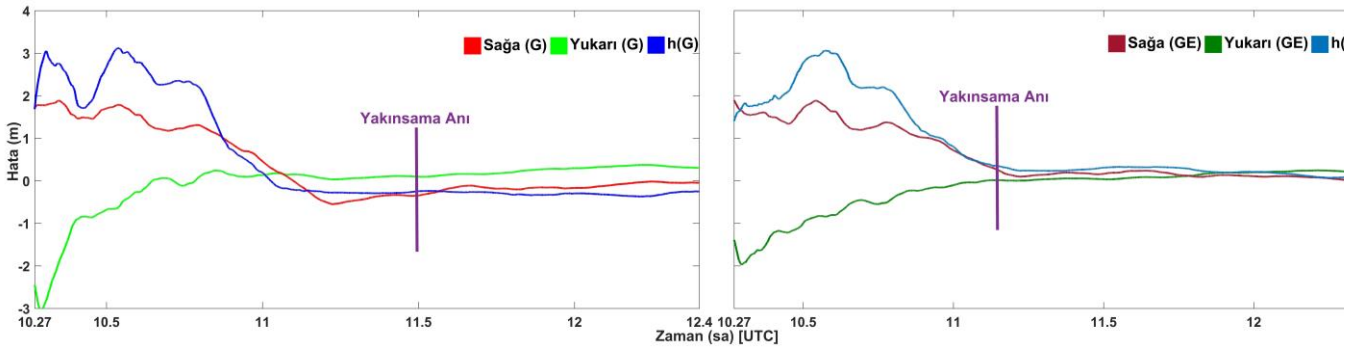
çıkmadığı zaman, yakınsama süresi olarak değerlendirilmiştir. Bu analizler sonucunda GPS uydu kombinasyonuna dayalı olarak elde edilen RT-PPP tekniğinin 77 dakikada yakınsadığı sonucuna varılırken, GPS+Galileo uydu kombinasyonuna dayalı olarak elde edilen RT-PPP tekniğinin 47 dakikada yakınsadığı görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlar, yakınsama süresi açısından çoklu-GNSS gözlemlerinin düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğine olan katkısı açıkça göstermektedir.

Düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğinin statik moddaki konum belirleme performansını daha detaylı incelemek ve derinlemesine analiz etmek için, G ve GE uydu kombinasyonlarına dayalı RT-PPP ile referans yöntem olan RTK tekniği arasındaki farkların istatistikî değerleri hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 3'te özetlenmiştir. Burada belirtmek gerekmektedir ki ilgili tabloda elde edilen değerler adil bir karşılaştırma yapmak amacıyla G RT-PPP ve GE RT-PPP tekniklerinin yakınsama sürelerinden sonra elde edilmiştir. Tablodan yatay bileşenler için G RT-PPP yönteminin minimum ve maksimum hatalarının yaklaşık olarak -1 cm ile -35 cm arasında değiştiği görülmektedir. Buna karşılık GE RT-PPP tekniği için bu değerler +8 mm ile +25 cm arasında değişmektedir.

Her iki çözümden yatay bileşen için elde edilen ortalama hata değerleri göz önüne alındığında ise GE uydu kombinasyonu, G uydu kombinasyonundan elde edilen

değerleri sağa ve yukarı bileşenleri için sırasıyla %25 ve %42 oranında iyileştirdiği açıkça görülmektedir. h bileşeni içinse GE RT-PPP tekniğinden elde edilen ortalama hata değerlerinin G RT-PPP'den elde edilenlere kıyasla 9 cm daha düşük olduğu açıktır. G ve GE RT-PPP çözümlerinin KOH (Karesel Ortalama Hata) değerleri incelendiğinde ise GE uydu kombinasyonunun G gözlemlerine olan üstünlüğü gözlemlenmektedir. GE gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğinden elde edilen sonuçlar G RT-PPP'den elde edilenleri sağa, yukarı ve h bileşenleri için sırasıyla %17, %42 ve %20 oranında iyileştirmiştir. Elde edilen bu sonuçlar çoklu-GNSS gözlemlerinin düşük maliyetli GNSS verilerine dayalı RT-PPP tekniğine olan katkısını açık bir şekilde göstermektedir. Ancak genel olarak, her iki kombinasyondan elde edilen RT-PPP sonuçları göz önüne alındığında ve karşılaştırılan doğruluk değerleri düşünüldüğünde, statik moda elde edilen düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğinin mm mertebesinde doğruluk gerektiren jeodezik çalışmalarda başarılı olamayacağı, buna karşılık navigasyon uygulamaları için son derece yüksek doğruluk sağladığı son derece açıktır.

Düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğinin konum belirleme performansının değerlendirilmesi amacı doğrultusunda alt başlık 2.2'de de bahsedildiği üzere statik deneye ek olarak kinematik deney de gerçekleştirilmiştir.



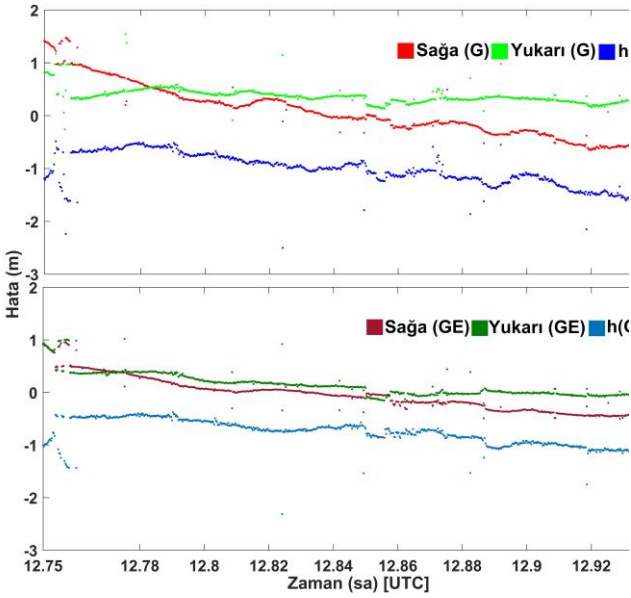
Şekil 5. G ve GE uydu kombinasyonlarına dayalı elde edilen RT-PPP ve RTK sonuçları arasındaki farklar

Tablo 3. RT-PPP çözümleri ve RTK sonuçları arasındaki farkların istatistikî değerleri

	G				GE			
	Min. (m)	Mak. (m)	Ort. (m)	KOH (m)	Min. (m)	Mak. (m)	Ort. (m)	KOH (m)
Sağa	0.150	0.349	0.159	0.184	0.008	0.237	0.124	±0.149
Yukarı	0.093	0.334	0.240	0.255	0.033	0.245	0.150	±0.149
h	0.231	0.369	0.297	0.299	0.054	0.332	0.211	±0.239

Tablo 4. RT-PPP çözümleri ve RTK sonuçları arasındaki farkların kinematik mod için istatistikî değerleri

	G				GE			
	Min. (m)	Mak. (m)	Ort. (m)	KOH (m)	Min. (m)	Mak. (m)	Ort. (m)	KOH (m)
Sağa	0.001	1.476	0.405	0.517	0.000	0.993	0.264	±0.336
Yukarı	0.057	1.539	0.377	0.410	0.000	1.053	0.187	±0.282
h	1.084	2.501	1.037	1.084	0.262	2.317	0.771	±0.809



Şekil 6. Kinematik deney sırasında elde edilen RT-PPP ve RTK sonuçları arasındaki farklar

Şekil 6, kinematik deney sırasında farklı uydu kombinasyonuna dayalı olarak elde edilen RT-PPP tekniği ve RTK yöntemi arasındaki farkları göstermektedir. İlgili şekilden, GPS ve Galileo uydu kombinasyonlarına dayalı olarak elde edilen RT-PPP çözümlerinin RTK tekniği ile daha uyumlu olduğu açıkça görülmektedir. Bu bulgu, statik moda benzer şekilde kinematik moda da çoklu-GNSS gözlemlerinin RT-PPP yöntemine olan katkısını doğrulamaktadır. Ancak iki yöntem için de yükseklik bileşeni için RT-PPP tekniğinin yatay bileşenlere kıyasla daha başarısız olduğu görülmektedir. Bu durum, deney sırasındaki gözlem verileri veya statik deneylerde elde edilen yakınsama süresi dikkate alındığında kinematik deneyde kullanılan aracın harekete başlamadan önce yaklaşık olarak 20 dakika hareketsiz kalması ile ilgili olabilir. Bu bulguların harici araştırmacılar ve araştırmalar tarafından doğrulanması gerekmektedir.

Ek olarak, statik deneye benzer şekilde RTK ve RT-PPP çözümleri arasındaki farkların istatistik bulguları elde edilmiş ve sonuçlar Tablo 4'te özetlenmiştir. Tablodan, Galileo uydu takımı yıldızının sadece-GPS gözlemlerine olan katkısı açık bir şekilde görülmektedir. Elde edilen ortalama hata değerleri dikkate alındığında çoklu-GNSS gözlemleri sadece-GPS gözlemlerinden elde edilen hata değerlerini üç bileşen için ortalama olarak 20 cm iyileştirdiği görülmektedir. Ayrıca KOH değerleri dikkate alındığında, GPS ve Galileo uydu sistemlerinin kombinasyonuna dayalı RT-PPP çözümleri sadece-GPS gözlemlerine kıyasla sağa yukarı bileşenleri için sırasıyla %35 ve %32 oranında iyileşme sağlarken bu iyileşme değeri yükseklik bileşeni için %26'dır. Burada elde edilen bulgular statik moda karşılaşılan bulguları doğrulamaktadır. Çoklu-GNSS gözlemleri RT-PPP tekniğine etkin bir şekilde katkı yaparken, düşük maliyetli GNSS anteni ve alıcısından elde edilen gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğinin kinematik moddaki performansı dikkate alındığında navigasyon ve

seyrüsefer gibi uygulamaların gerektirdiği doğruluğu sağladığı, buna karşılık yüksek hassasiyet ve doğruluk gerektiren jeodezik işler için henüz istenen seviyede olmadığı son derece açıktır.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada düşük maliyetli u-blox ZED-F9P alıcısı ve ANN-MB-00 anteninden elde edilen GNSS gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğinin konum belirleme performansı değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlara çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısı araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda statik ve kinematik moda iki farklı deney gerçekleştirilmiştir. Söz konusu her iki deneyde de GPS ve GPS+Galileo gözlemlerine dayalı RT-PPP sonuçları elde edilmiş ve elde edilen gözlemler GPS+Galileo gözlemlerine dayalı RTK sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Statik moda elde edilen sonuçlar çoklu-GNSS gözlemlerinin sadece-GPS gözlemlerine kıyasla yaklaşık 30 dakika daha erken yakınsadığını ve KOH değerleri dikkate alındığında GE gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğinden elde edilen sonuçların G RT-PPP'den elde edilenleri sağa, yukarı ve h bileşenleri için sırasıyla %17, %42 ve %20 oranında iyileştirdiğini açıkça göstermiştir. Kinematik deney sonuçları ise statik sonuçlara paralel olarak çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısını açıkça ifade etmiş ve her üç bileşen için sadece-GPS gözlemlerine kıyasla ortalama olarak 30 cm daha doğru sonuçlar sağlandığı sonucuna varılmıştır. Ancak hem statik hem de kinematik moda elde edilen bulgular düşük maliyetli GNSS gözlemlerine dayalı RT-PPP tekniğinin mm mertebesinde doğruluk gerektiren jeodezik çalışmalarda başarılı olamayacağını, buna karşılık navigasyon ve seyrüsefer gibi uygulamaların gerektirdiği doğruluğun söz konusu yöntem tarafından sağlandığını açıkça öne sürmektedir.

Teşekkür

Yazar saha çalışmalarındaki desteği için Emre Bozdoğan, Ahmet Yaman ve Yavuz Selçuk Ocak'a, gerçek-zamanlı hassas yörünge ve saat ürünleri için IGS'e ve RTKLIB programı geliştiricilerine teşekkür eder.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

- [1] S. Malys and P. A. Jensen, Geodetic point positioning with GPS carrier beat phase data from the CASA UNO Experiment, *Geophysical Research Letters*, 17(5), 651–654, 1990, <https://doi.org/10.1029/GL017i005p00651>.
- [2] J. F. Zumberge, M. B. Hefflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins, and F. H. Webb, 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, 1997, <https://doi.org/10.1029/96JB03860>.
- [3] J. Kouba and P. Héroux, Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products, *GPS Solutions*, 5 (2), 12–28, 2001, <https://doi.org/10.1007/PL00012883>.

- [4] J. Geng, F. N. Teferle, X. Meng, and A. H. Dodson, Kinematic precise point positioning at remote marine platforms, *GPS Solutions*, 14 (4), 343–350, 2010, <https://doi.org/10.1007/s10291-009-0157-9>.
- [5] M. Bezcioglu, C. Ö. Yigit, ve M. N. Bodur, Kinematik PPP-AR ve Geleneksel PPP Yöntemlerin Performanslarının Değerlendirilmesi: Antarktika Yarımadası Örneği, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19 (1), 162–169, 2019, <https://doi.org/10.35414/akufemubid.467336>.
- [6] J. Guo, X. Li, Z. Li, L. Hu, G. Yang, C. Zhao, D. Fairbairn, D. Watson, and M. Ge, Multi-GNSS precise point positioning for precision agriculture, *Precision Agriculture*, 19 (5), 895–911, 2018, <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9563-8>.
- [7] M. R. Kaloop, C. O. Yigit, A. El-Mowafy, A. A. Dindar, M. Bezcioglu, and J. W. Hu, Hybrid wavelet and principal component analyses approach for extracting dynamic motion characteristics from displacement series derived from multipath-affected high-rate GNSS observations, *Remote Sensing*, 12 (1), 2020, <https://doi.org/10.3390/RS12010079>.
- [8] P. Xu, C. Shi, R. Fang, J. Liu, X. Niu, Q. Zhang, and T. Yanagidani, 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, 2013, <https://doi.org/10.1007/s00190-012-0606-z>.
- [9] F. Zhou, X. Cao, Y. Ge, and W. Li, Assessment of the positioning performance and tropospheric delay retrieval with precise point positioning using products from different analysis centers, *GPS Solutions*, 24 (1), 1–11, 2020, <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0925-0>.
- [10] X. Ren, X. Zhang, W. Xie, K. Zhang, Y. Yuan, and X. Li, Global Ionospheric Modelling using Multi-GNSS: BeiDou, Galileo, GLONASS and GPS, *Scientific Reports*, 6, August, 1–11, 2016, <https://doi.org/10.1038/srep33499>.
- [11] J. Kouba, A Guide to using international GNSS Service (IGS) Products, Geodetic Survey Division Natural Resources Canada Ottawa, 6 (34), 2009, [Online]. Available: http://graypantherssf.igs.org/igs/scb/resource/pubs/Usin_gIGSProductsVer21.pdf
- [12] Z. Wang, Z. Li, L. Wang, X. Wang, and H. Yuan, Assessment of multiple GNSS real-time SSR products from different analysis centers, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7 (3), 2018, <https://doi.org/10.3390/ijgi7030085>.
- [13] L. Chen, Q. Zhao, Z. Hu, X. Jiang, C. Geng, M. Ge, and C. Shi, 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, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.08.037>.
- [14] L. Wang, Z. Li, M. Ge, F. Neitzel, Z. Wang, and H. Yuan, Validation and assessment of multi-GNSS real-time precise point positioning in simulated kinematic mode using IGS real-time service, *Remote Sensing*, 10 (2), 2018, <https://doi.org/10.3390/rs10020337>.
- [15] T. Hadas and J. Bosy, IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time, *GPS Solutions*, 19 (1), 93–105, 2015, <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0369-5>.
- [16] M. El-Diasty and M. Elsobeiey, Precise Point Positioning Technique with IGS Real-Time Service (RTS) for Maritime Applications, *Positioning*, 06 (04), 71–80, 2015, <https://doi.org/10.4236/pos.2015.64008>.
- [17] L. Wang, Z. Li, M. Ge, F. Neitzel, X. Wang, and H. Yuan, Investigation of the performance of real-time BDS-only precise point positioning using the IGS real-time service, *GPS Solutions*, 23 (3), 1–12, 2019, <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0856-9>.
- [18] M. Elsobeiey and S. Al-Harbi, Performance of real-time Precise Point Positioning using IGS real-time service, *GPS Solutions*, 20 (3), 565–571, 2016, <https://doi.org/10.1007/s10291-015-0467-z>.
- [19] N. Takahashi, Y. Ishihara, H. Ochi, T. Fukuda, J. Tahara, Y. Maeda, M. Kido, Y. Ohta, K. Mutoh, G. Hashimoto, S. Kogure, and Y. Kaneda, New buoy observation system for tsunami and crustal deformation, *Marine Geophysical Research*, 35 (3), 243–253, 2014, <https://doi.org/10.1007/s11001-014-9235-7>.
- [20] X. Li, M. Ge, X. Zhang, Y. Zhang, B. Guo, R. Wang, J. Klotz, and J. Wickert, Real-time high-rate co-seismic displacement from ambiguity-fixed precise point positioning: Application to earthquake early warning, *Geophysical Research Letters*, 40 (2), 295–300, 2013, <https://doi.org/10.1002/grl.50138>.
- [21] X. Tang, G. W. Roberts, X. Li, and C. M. Hancock, Real-time kinematic PPP GPS for structure monitoring applied on the Severn Suspension Bridge, UK, *Advances in Space Research*, 60 (5), 925–937, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.05.010>.
- [22] M. Bezcioglu, C. O. Yigit, B. Karadeniz, A. A. Dindar, A. El-Mowafy, and Ö. Avcı, Evaluation of real-time variometric approach and real-time precise point positioning in monitoring dynamic displacement based on high-rate (20 Hz) GPS Observations, *GPS Solutions*, 27 (1), 1–13, 2023, <https://doi.org/10.1007/s10291-022-01381-6>.
- [23] B. Bahadur, An improved weighting strategy for tropospheric delay estimation with real-time single-frequency precise positioning, *Earth Science Informatics*, 15 (2), 1267–1284, 2022, <https://doi.org/10.1007/s12145-022-00814-7>.
- [24] B. Bahadur, Impact of different troposphere models on the real-time multi-GNSS PPP performance, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12 (3), 756–768, 2022, <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1061668>.
- [25] E. Tunalı, Monitoring Water Vapor Variations with PPP and IGS Real Time Service, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18 (1), 343–356, 2018,

- <https://doi.org/10.5578/fmbd.66259>.
- [26] T. Öcalan ve M. Soycan, RTCM/SSR Mesajları İle Gerçek Zamanlı Hassas Nokta Konumlama (PPP-RTK) Tekniği, Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi, 4 (2), 30–41, 2012.
- [27] S. Alçay, Gerçek Zamanlı Hassas Nokta Konumlama (RT-PPP) Yönteminin Konum Belirleme Performansının Doğruluk Ve Hassasiyet Bakımında İncelenmesi, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8 (1), 121–133, 2019, <https://doi.org/10.28948/ngumuh.516842>.
- [28] S. Alçay and Ö. Atiz, Farklı Yazılımlar Kullanılarak Gerçek Zamanlı Hassas Nokta Konum Belirleme (RT-PPP) Yönteminin Performansının İncelenmesi, Geomatik, 6 (1), 77–83, 2021, <https://doi.org/10.29128/geomatik.687709>.
- [29] R. M. Alkan, S. Erol, ve B. Mutlu, IGS-RTS ürünleri kullanılarak gerçek-zamanlı hassas nokta konumlama (RT-PPP) tekniğinin performans analizi: Antarktika örneği, Yerbilimleri, 43 (1), 76–95, 2022, <https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1050124>.
- [30] C. İnal, B. Bilgen, S. Bülbül, ve M. Başbük, Farklı uydu sistemi kombinasyonlarının gerçek zamanlı hassas nokta konumlama etkisi, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11 (1), 109–115, 2021, <https://doi.org/10.28948/ngumuh.996018>.
- [31] Z. Nie, F. Liu, and Y. Gao, Real-time precise point positioning with a low-cost dual-frequency GNSS device, GPS Solutions, 24 (1), 1–11, 2020, <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0922-3>.
- [32] D. Janos, P. Kuras, and Ł. Ortyl, Evaluation of low-cost RTK GNSS receiver in motion under demanding conditions, Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 201, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111647>.
- [33] M. F. Karabulut, N. O. Aykut, B. Akpınar, G. Oku Topal, Z. B. Çakmak, B. Doran, A. A. Dindar, C. Ö. Yiğit, M. Bezcioglu, and A. Zafer, The Positioning Performance of Low-Cost Gns Receivers in Precise Point Positioning Method, Advances in Geodesy and Geoinformation, 71 (2), e29, 2022, <https://doi.org/10.24425/agg.2022.141916>.
- [34] G. Sanna, T. Pisanu, and S. Garau, Behavior of Low-Cost Receivers in Base-Rover Configuration with Geodetic-Grade Antennas, Sensors, 22 (7), 1–17, 2022, <https://doi.org/10.3390/s22072779>.
- [35] M. Di, B. Guo, J. Ren, X. Wu, Z. Zhang, Y. Liu, Q. Liu, and A. Zhang, GNSS Real-Time Precise Point Positioning in Arctic Northeast Passage, Journal of Marine Science and Engineering, 10 (10), 2022, <https://doi.org/10.3390/jmse10101345>.
- [36] R. Hohensinn, R. Stauffer, M. F. Glaner, I. D. Herrera Pinzón, E. Vuadens, Y. Rossi, J. Clinton, and M. Rothacher, Low-Cost GNSS and Real-Time PPP: Assessing the Precision of the u-blox ZED-F9P for Kinematic Monitoring Applications, Remote Sensing, 14 (20), 1–25, 2022, <https://doi.org/10.3390/rs14205100>.
- [37] G. Oku Topal, M. F. Karabulut, N. O. Aykut, and B. Akpınar, Performance of low-cost GNSS equipment in monitoring of horizontal displacements, Survey Review, 1–10, 2023, <https://doi.org/10.1080/00396265.2023.2179910>.
- [38] A. El-Mowafy, M. Deo, and N. Kubo, Maintaining real-time precise point positioning during outages of orbit and clock corrections, GPS Solutions, 1–11, 2016, <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0583-4>.
- [39] T. Takasu and A. Yasuda, Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB, International Symposium on GPS/GNSS, 4–6, 2009.
- [40] B. Li, H. Ge, Y. Bu, Y. Zheng, and L. Yuan, Comprehensive assessment of real-time precise products from IGS analysis centers, Satellite Navigation, 3 (1), 2022, <https://doi.org/10.1186/s43020-022-00074-2>.

