

Farklı troposfer modellerinin gerçek zamanlı çoklu-GNSS PPP performansına etkisi

Impact of different troposphere models on the real-time multi-GNSS PPP performance

Berkay BAHADUR*^{1,a}

¹Hacettepe Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 06800, Çankaya, Ankara

• Geliş tarihi / Received: 22.01.2022

• Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 05.04.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 17.04.2022

Öz

IGS (International GNSS Service) gerçek zamanlı ürünlerin kullanıma açılmasıyla gerçek zamanlı Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning, PPP) uygulamaları GNSS (Global Navigation Satellite Systems) kullanıcıları arasında ilgi çekici bir konu haline gelmiştir. Troposferin GNSS sinyalleri üzerindeki etkisi gerçek zamanlı PPP çözümü açısından en önemli hata kaynaklarından bir tanesidir. PPP tekniğinde troposferik gecikmenin kuru bileşeni genellikle deneysel modeller aracılığıyla düzeltilirken ıslak bileşen tahmin sürecinde bilinmeyen bir parametre olarak kestirilir. Dolayısıyla PPP çözümünde kullanılan troposfer modeli elde edilecek çözüm performansı üzerine önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle bu çalışmanın temel amacı farklı troposfer modellerinin gerçek zamanlı çoklu-GNSS PPP performansına olan etkisini incelemektir. Çalışma kapsamında GNSS çözümlerinde en sık kullanılan Saastamoinen ve Hopfield modellerinin GPT (Global Pressure and Temperature) 2 ve 3 modelleri ile ayrı ayrı kullanıldığı toplamda dört farklı troposfer modeli oluşturulmuştur. Bu kapsamda 19-28 Aralık 2021 tarihleri arasındaki on günlük dönem için toplamda on altı farklı IGS istasyonundan elde edilen gözlem verisi dört farklı troposfer modeli kullanarak işlenmiştir. PPP çözümleri konum belirleme performansına ek olarak toplam zenit gecikme (zenith total delay, ZTD) kestirimi açısından da analiz edilmiştir. Sonuçlar, en yüksek konum belirleme performansının Saastamoinen modelin GPT3 ile eşlenik kullanıldığı durumda elde edilebileceğini göstermektedir. İlgili çözümden elde edilen üç boyutlu konum doğruluğu 2.72 cm olup en yakın çözüme kıyasla %9.2 oranında daha iyidir. Öte yandan, ZTD kestirimi açısından en iyi performans yine Saastamoinen modelin GPT3 ile eşlenik kullanılması durumunda elde edilmiştir. Bu çözümün ise ZTD kestirim doğruluğu 1.24 cm olarak hesap edilmiştir ve bu değer en yakın çözüme göre %10.2 oranında daha iyi bir performansa işaret etmektedir.

Anahtar kelimeler: Gerçek zamanlı, GNSS, Hassas Nokta Konumlama, PPP, Troposfer

Abstract

With the initialization of IGS (International GNSS Service) real-time service products, real-time Precise Point Positioning (PPP) applications have been a popular topic within the GNSS (Global Navigation Satellite Systems) users. The impact of the troposphere on GNSS signals is one of the most crucial error sources regarding the real-time PPP solution. In the PPP technique, the dry component of tropospheric delay is usually corrected by means of empirical models, while its wet component is estimated as an unknown parameter in the adjustment process. Hence, the troposphere model employed in the PPP solution has a considerable impact on the performance of the obtained solution. Therefore, the main objective of this study is to investigate the impact of different troposphere models on the performance of real-time multi-GNSS PPP. As a part of this study, four different troposphere models, where Saastamoinen and Hopfield models that are most frequently used in GNSS solutions are used together with GPT (Global Pressure and Temperature) 2 and 3 models separately, were constituted. In this context, the observation dataset acquired from a total of 16 different IGS stations over a ten-day period of December 19-28, 2021, were processed utilizing four different troposphere models. In addition to the positioning performance, PPP solutions were also analyzed in terms of zenith total delay (ZTD) estimation. The results show that the best positioning performance can be obtained when the Saastamoinen model is used in combination with GPT3. The three-dimensional positioning accuracy acquired from the corresponding solution is 2.72 cm, which is better than the closest solution by a ratio of 9.2%. Besides, in terms of the ZTD estimation, the best performance is achieved again in the case when the Saastamoinen model is used in combination with GPT3. For the related solution, the accuracy of ZTD estimation is calculated as 1.24 cm and this value indicates a better performance by a ratio of 10.2% compared with the closest solution.

Keywords: Real-time, GNSS, Precise Point Positioning, PPP, Troposphere

*a Berkay BAHADUR; berkaybahadur@hacettepe.edu.tr, Tel: (0312) 297 69 90, orcid.org/0000-0003-3169-8862

1. Giriş

1. Introduction

Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning, PPP) yalnızca tek bir alıcı kullanarak küresel ölçekte yüksek konum doğruluğu sağlayabilen Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) temelli bir konum belirleme tekniğidir (Zumberge vd., 1997; Kouba & Héroux, 2001). PPP tekniğinde uydu yörünge ve saat hatasını ortadan kaldırmak için küresel bir ağdan, örneğin IGS (International GNSS Service), elde edilen hassas ürünler kullanılmaktadır. Diferansiyel ve/veya rölatif konum belirleme tekniklerinde ihtiyaç duyulan referans istasyon kullanımını ortadan kaldırması PPP tekniğinin en büyük avantajı olarak görülmektedir. Geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında PPP tekniği referans istasyon gerektirmemesi nedeniyle hem işlem maliyetini düşürmekte hem de uygulamada önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Bu nedenle PPP son yıllarda GNSS kullanıcıları arasında yüksek ilgi gören bir konu olmuş ve atmosferin modellenmesi, yapı sağlığının izlenmesi, yer kaynaklı tehlikelerin belirlenmesi gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmıştır (Tu vd., 2013; Lu vd., 2015; Wright vd., 2012; Li vd., 2013; Yigit & Gurlek, 2017). Ayrıca son yıllarda ortaya çıkan Galileo ve BDS gibi yeni küresel navigasyon sistemleri PPP tekniğinin en büyük dezavantajı olarak görülen yakınsama süresinin iyileştirilmesi açısından önemli fırsatlar getirmiş ve böylece tekniğin popülerliğinin giderek artmasına neden olmuştur (Li vd., 2015; Pan vd., 2017; Bahadur & Nohutcu, 2018a).

Standart PPP yaklaşımında kullanılan hassas ürünler yaklaşık iki haftalık bir gecikme ile elde edildiğinden bu ürünlerin gerçek zamanlı GNSS uygulamalarında kullanılması mümkün değildir. Bu durum PPP tekniğinin daha geniş kullanım alanlarına ulaşmasını engelleyen en önemli faktörlerin başında gelmektedir. Ancak son yıllarda gerçek zamanlı GNSS çözümlerine olan ilginin bir sonucu olarak IGS 2013 yılında kendi gerçek zamanlı servisini hayata geçirmiştir. Bu sayede IGS analiz merkezleri tarafından üretilen uydu yörünge ve saat bilgilerine anlık olarak erişmek ve dolayısıyla gerçek zamanlı PPP çözümünü gerçekleştirmek mümkün hale gelmiştir (Hadas & Bosy, 2015). Bu tarihten itibaren yapılan birçok çalışma gerçek zamanlı PPP çözümünün GNSS uygulamalarında başarıyla kullanılabilirliğini göstermiştir. Örneğin, Shi vd. (2017) gerçek zamanlı PPP çözümünün havai nirengi uygulamalarında başarıyla kullanılabilirliğini göstermiştir. Zhao vd. (2018a) gerçek zamanlı PPP

çözümü ile atmosferdeki yağışa dönüşebilir su buharı miktarının belirlenmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirmiş ve bu yolla yüklü yağışların büyük çoğunlukla önceden tahmin edilebileceği sonucuna varmıştır. Ayrıca, Jin ve Su (2019) yaptıkları çalışmada yüksek frekanslı GNSS verisi ve PPP çözümü kullanarak deprem kaynaklı yer değişimlerinin gerçek zamanlı izlenebileceğini belirtmiştir. Son olarak, Nie vd. (2020) düşük maliyetli GNSS alıcılarıyla gerçek zamanlı PPP performansını incelemiş ve yatayda yarım metrelik konum doğruluğu elde edilebileceğini ortaya koymuştur. Ancak belirtmelidir ki bu çalışmalarda elde edilen konum doğruluğu ilgili hata kaynaklarının uygun modeller kullanılarak düzeltilmesi veya gerekli stokastik yaklaşımlarla kestirilmesiyle yakından ilişkilidir.

Gerçek zamanlı PPP çözümünde ele alınması gereken en önemli hata kaynaklarından bir tanesi troposferin GNSS sinyalleri üzerine olan etkisidir. Troposfer etkisi, GNSS çözümlerinde genel olarak kuru ve ıslak bileşenlerine ayrılarak ele alınır (Davis vd., 1985). Troposferik etkinin kuru bileşeni deneysel modeller yardımıyla elde edilebilirken atmosferdeki su buharı miktarındaki ani değişimler nedeniyle ıslak bileşeni modellemek oldukça zordur. Bu nedenle PPP tekniğinde troposferik etkinin kuru bileşeni modeller aracılığıyla düzeltilirken ıslak bileşen ise bir bilinmeyen parametre olarak kestirilmektedir (Kouba & Héroux, 2001). Literatürde troposferik etkinin kuru bileşenini elde etmek için geliştirilmiş birçok deneysel modele rastlanmaktadır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan iki tanesi Saastamoinen (1972) ve Hopfield (1969) modelleridir. Bu modellerde istasyon konumuna ek olarak basınç ve sıcaklık gibi meteorolojik parametreler kullanılarak kuru troposferik gecikme hesap edilmektedir. Burada ihtiyaç duyulan meteorolojik parametreler ise genellikle küresel basınç ve sıcaklık modellerinden elde edilmektedir, örneğin GPT (Global Pressure and Temperature) (Böhm vd., 2007). Bu nedenle kullanılan troposfer modeli ve meteorolojik parametrelerin elde edilmiş olması PPP performansı açısından önem arz etmektedir. Literatür incelendiğinde mevcut çalışmaların çoğunlukla gerçek zamanlı PPP çözümü ile troposferik gecikme kestirimi üzerine odaklandığı görülmektedir (Dousa & Vaclavovic, 2014; Hadas vd., 2017; Zhao vd., 2018b). Mevcut literatürde farklı troposfer modellerinin gerçek zamanlı PPP performansı açısından değerlendirildiği kayda değer bir çalışma bulunmamaktadır. Dolayısıyla bu çalışmanın temel amacı farklı troposfer modellerinin gerçek zamanlı

PPP performansına olan etkisinin araştırılmasıdır. Bu kapsamda dört küresel sistemin, yani GPS, GLONASS, Galileo ve BDS, dahil edildiği çoklu-GNSS PPP çözümünün konum belirleme ve toplam zenit gecikme (zenith total delay, ZTD) kestirim performansları çeşitli uygulamalar aracılığıyla analiz edilmiştir.

2. Metodoloji

2. Methodology

Bu bölümde öncelikle gerçek zamanlı çoklu-GNSS PPP modeli sunulacaktır. Ardından çalışmada kullanılan iki farklı troposfer modeli detaylarıyla birlikte açıklanacaktır.

2.1. Gerçek zamanlı çoklu-GNSS PPP modeli

2.1. Real-time multi-GNSS PPP model

PPP tekniğinin ölçü modeli çift frekanslı kod ve faz gözlemlerinin iyonosferden bağımsız (İB) doğrusal kombinasyonlarından oluşmaktadır. Daha önceden de belirtildiği üzere PPP tekniğinin en temel özelliği uydu yörünge ve saat hatalarını gidermek için küresel bir ağdan elde edilen hassas ürünlerin kullanılmasıdır. Gerçek zamanlı PPP çözümünde ise IGS gerçek zamanlı servisi tarafından yayınlanan uydu yörünge ve saat düzeltmeleri kullanılmaktadır. IGS hassas ürünleri gibi gerçek

zamanlı ürünler de belirli bir sinyal ya da sinyal kombinasyonu baz alınarak üretilmektedir. Örneğin, GPS uydularına ait ürünler L1 ve L2 sinyalleri üzerindeki kod gözlemlerinin İB kombinasyonları kullanılarak üretilmektedir (Teunissen & Montenbruck, 2017). Benzer şekilde GLONASS uyduları için G1 ve G2 sinyalleri, Galileo uyduları için E1 ve E5a sinyalleri, BDS uyduları için de B1 ve B3 sinyalleri üzerindeki kod gözlemlerinin İB kombinasyonları ilgili ürünlerin üretiminde referans gözlem olarak kullanılmaktadır (Steigenberger vd., 2015). Bu nedenle IGS gerçek zamanlı ürünlerde sunulan uydu saat düzeltmeleri de bu referans gözlemler dikkate alınarak üretilir ve gerçek uydu saat hatasına ek olarak İB kombinasyonuna ait uydu kod donanım hatasını da içermektedir. Bu ürünler kullanılırken uydu kod donanım hataları orijinal saat hatasına eklenerek düzeltilmektedir. Diğer taraftan alıcı saat hatası ve ona ait kod donanım hatası aralarındaki yüksek korelasyon nedeniyle birlikte kestirilir (Kouba & Héroux, 2001). Faz donanım hataları için ayrı ürünler olmadığından bu hatalar faz belirsizlik parametresine yüklenerek tek bir bilinmeyen olarak kestirilmektedir. Tüm bunlar göz önüne alınarak çift frekanslı kod (P) ve faz (L) gözlemlerinin İB kombinasyonları aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$P_{IB}^{j,k} = \rho_r^{j,k} + c\widehat{dt}_r^j - c\widehat{dT}^{j,k} + T_r^{j,k} + \varepsilon(P_{IB}^{j,k}) \quad (1)$$

$$L_{IB}^{j,k} = \rho_r^{j,k} + c\widehat{dt}_r^j - c\widehat{dT}^{j,k} + T_r^{j,k} + \lambda_{IB}^j \widehat{N}_{IB}^{j,k} + \varepsilon(L_{IB}^{j,k}) \quad (2)$$

burada

$$c\widehat{dt}_r^j = cdt_r^j + b_{IB,r}^j, c\widehat{dT}^{j,k} = cdT^{j,k} + b_{IB}^{j,k} \text{ ve } \widehat{N}_{IB}^{j,k} = N_{IB}^{j,k} + (B_{IB,r}^j - B_{IB}^{j,k}) - (b_{IB,r}^j - b_{IB}^{j,k}) \quad (3)$$

Ayrıca r , j ve k sırasıyla alıcıyı, GNSS indeksini (G: GPS, R: GLONASS, E: Galileo, C: BDS) ve uydu numarasını göstermektedir. $\rho_r^{j,k}$ uydu ile alıcı arasındaki geometrik mesafeyi, c ışık hızını, \widehat{dt}_r^j ve $\widehat{dT}^{j,k}$ sırasıyla İB doğrusal kombinasyon için düzenlenmiş alıcı ve uydu saat hatasını, $T_r^{j,k}$ troposferik gecikmeyi, λ_{IB}^j ve $\widehat{N}_{IB}^{j,k}$ sırasıyla İB doğrusal kombinasyon için sinyal dalga boyunu ve düzenlenmiş belirsizlik parametresini, ε ise ilgili gözlem için çoklu-yol etkisini de içeren gözlem gürültüsünü göstermektedir. Ayrıca dt_r^j ve $dT^{j,k}$ orijinal alıcı ve uydu saat hatalarını, $b_{IB,r}^j$ ve $b_{IB}^{j,k}$ İB doğrusal kombinasyon için alıcı ve uydu kod donanım hatalarını, $B_{IB,r}^j$ ve $B_{IB}^{j,k}$ İB doğrusal kombinasyon için alıcı ve uydu faz donanım hatalarını, $N_{IB}^{j,k}$ ise İB doğrusal kombinasyon için

orijinal tam sayı belirsizlik parametresini göstermektedir.

Yukarıdaki eşitlikler PPP ölçü modelini oluşturmaktadır. (1) ve (2) eşitliklerinden görüleceği üzere her uydu sistemi için farklı alıcı ve uydu saat hatası bulunmaktadır. Bunun temel nedeni her uydu sisteminin kendine has bir zaman ölçeği kullanmasıdır. Uydu saat hataları IGS gerçek zamanlı ürünler kullanılarak düzeltilir. Alıcı saat hatasına gelince çoklu-GNSS uygulamalarında genellikle her uydu sistemi için ayrı bir saat hatası tanımlanmaz. Bunun yerine seçilen bir referans zaman ölçeğine göre, çoğunlukla GPS zamanı, eklenen diğer sistemler için sistemler arası fark (SAF) parametresi tanımlanmaktadır (Cai & Gao, 2013; Abd Rabbou vd., 2018). Sonuç olarak bu modelde üç konum

bileşeni, bir alıcı saat hatası, bir troposferik gecikme (ıslak bileşen), gözlenen her uydu için bir belirsizlik parametresi ve eklenen her yeni sistem için bir SAF parametresi bilinmeyenler vektörünü oluşturmaktadır.

2.2. Troposfer modelleri

2.2. Troposphere models

$$T_r^{j,k} = M_K(E)ZTD_K + M_I(E)ZTD_I \quad (4)$$

burada ZTD_K ve ZTD_I sırasıyla zenit doğrultusunda kuru ve ıslak troposferik gecikmeyi, M_K ve M_I ise uydunun yükselim açısına (E) bağlı iz düşüm fonksiyonunun kuru ve ıslak bileşenlerini göstermektedir. Daha önceden belirtildiği üzere troposferik etkinin kuru bileşeni istasyon konumu ve meteorolojik parametrelere bağlı olarak deneysel modeller yardımıyla düzeltilebilirken ıslak bileşeni modellemek oldukça zordur. Bu

$$ZTD_K = (0.0022768 \cdot p)/(1 - 0.00266 \cdot \cos(2\varphi) - 0.28 \cdot 10^{-6} h_{el}) \quad (5)$$

burada φ ve h_{el} sırasıyla istasyonun enlemini ve elipsoit yüksekliğini (m), p ise ilgili istasyon için basınç değerini (milibar) göstermektedir. Diğer taraftan troposferik etkinin kuru bileşenini

$$ZTD_K = ((77.64 \cdot p)/T) \cdot 10^{-6} \sum_{i=1}^9 (f_{K,i}/i) r_K \quad (6)$$

Burada p yine basınç değerini (milibar), T ise sıcaklık değerini (Kelvin) göstermektedir. r_K ise aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$r_K = \sqrt{(R_e + h_K)^2 - R_e^2 \sin^2(z) - R_e \cos(z)} \quad \text{ve} \quad h_K = 40136 + 148.72(T - 273.15) \text{ m} \quad (7)$$

burada R_e Dünya'nın yarıçapını (6378137 m), z ise ilgili uydunun zenit açısını göstermektedir. Ayrıca f_K katsayıları aşağıdaki şekilde hesap edilmektedir.

$$f_{K,1} = 1, \quad f_{K,2} = 4a, \quad f_{K,3} = 6a^2 + 4b, \quad f_{K,4} = 4a(a^2 + 3b), \quad f_{K,5} = a^4 + 12a^2b + 6b^2, \\ f_{K,6} = 4ab(a^2 + 3b), \quad f_{K,7} = b^2(6a^2 + 4b), \quad f_{K,8} = 4ab^3 \quad \text{ve} \quad f_{K,9} = b^4 \quad (8)$$

burada $a = -\cos(z)/h_K$ ve $b = -\sin^2(z)/(2h_K R_e)$ şeklinde elde edilmektedir.

Her iki modelde de görüldüğü üzere troposferik etkinin kuru bileşeni istasyonun konumuna ek olarak basınç ve sıcaklık gibi meteorolojik parametrelere dayalı olarak hesap edilmektedir. Dolayısıyla troposferik modeller ilgili istasyon için meteorolojik parametrelere ihtiyaç duyar. Bu parametreleri genel olarak yerinde ölçmek oldukça güçtür. Bunun yerine yaygın yaklaşım ilgili parametreleri küresel basınç ve sıcaklık modellerinden elde etmektir. Bu amaçla en güncel modeller olan GPT2 ve GPT3 istasyona ait meteorolojik parametrelerin elde edilmesinde

Uydu jeodezisi tekniklerinde genel bir yaklaşım olarak troposferin GNSS sinyalleri üzerine olan etkisi kuru ve ıslak bileşenlere ayrılarak ele alınır. Troposferik gecikme zenit açısı doğrultusunda modellenerek iz düşüm fonksiyonları aracılığıyla ilgili sinyal doğrultusuna indirgenmektedir. Toplam troposferik gecikme zenit doğrultusunda aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilir (Davis vd., 1985).

nedenle troposferik etkinin ıslak bileşeni bir önceki bölümde de belirtildiği üzere bilinmeyen bir parametre olarak tahmin sürecinde kestirilir.

Saastamoinen (1972) model GNSS uygulamalarında kuru troposferik gecikmeyi düzeltmek için sıklıkla kullanılan modellerden bir tanesidir. Bu modele göre troposferik etkinin kuru bileşeni aşağıdaki eşitlik yardımıyla elde edilebilir.

hesaplamak için yaygın olarak kullanılan bir diğer model ise Hopfield (1969) modelidir. Bu modele göre kuru troposferik gecikme aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir.

kullanılabilir. Bu modellerle eşlenik iz düşüm fonksiyonları VMF1 (Vienna Mapping Functions) ve VMF3 de zenit doğrultusunda modellenen troposferik gecikmeyi sinyal doğrultusuna indirmek için kullanılmaktadır (Lagler vd., 2013; Landskron, & Böhm, 2018).

3. Deneysel test ve analizler

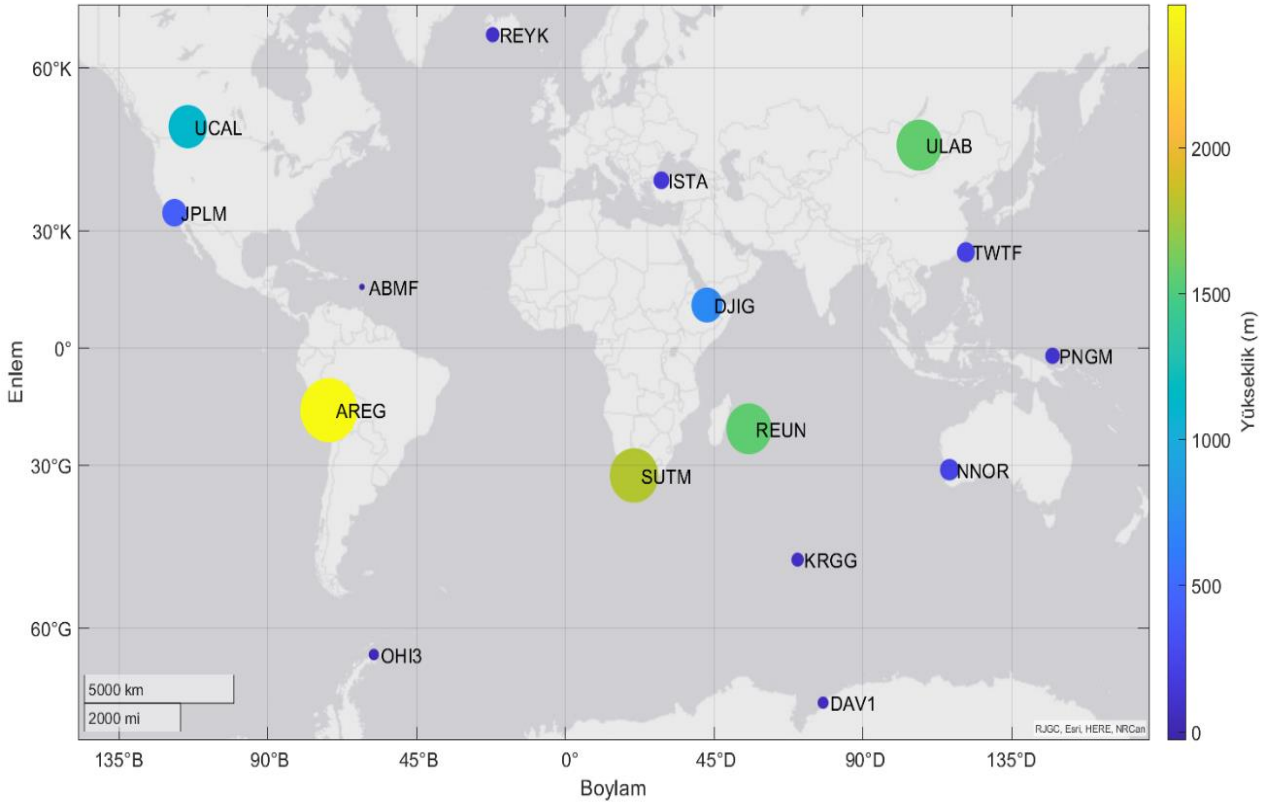
3. Experimental tests and analyses

Bu bölümde öncelikle uygulamada kullanılan veri seti ve gerçek zamanlı PPP çözümü için kullanılan

işlem stratejileri açıklanacaktır. Devamında farklı troposfer modellerinin gerçek zamanlı PPP performansına olan etkisi önce konum belirleme performansı ve daha sonra ZTD kestirimi açısından değerlendirilecektir.

Çalışma kapsamında 19-28 Aralık 2021 tarihleri (yılım 353 ile 362. günleri) arasındaki ardışık on gün boyunca toplamda 16 IGS istasyonunda toplanmış olan GNSS gözlem verisi kullanılmıştır. Bu istasyonların tamamı dört küresel sistemin gözlemlerini kaydedebilen çoklu-GNSS alıcılarla donatılmış olup gözlemlerin veri aralığı 30

saniedir. İstasyonlar küresel anlamda dünyayı en iyi şekilde temsil edecek ve ayrıca farklı yüksekliklere sahip olacak şekilde seçilmiştir. İstasyonlar ve tarihlerin seçiminde Kp indeks değerleri dikkate alınarak yüksek iyonosferik aktivitenin olmasından kaçınılmıştır. Ayrıca büyük tektonik hareketlerin varlığı da kontrol edilmiştir. İstasyonların yarısı kuzey diğer yarısı ise güney yarım kürede yer almaktadır. İlgili istasyonların coğrafi konumları ve elipsoidal yükseklikleri Şekil 1'de sunulmuştur. İstasyonların elipsoidal yükseklikleri-25.6 m (ABMF) ile 2489.4 m (AREG) arasında değişmektedir.



Şekil 1. Uygulamada kullanılan istasyonların coğrafi konumları ve elipsoidal yükseklikleri.

Figure 1. Geographical locations and ellipsoidal heights of the stations utilized in the experiment.

3.1. Gerçek zamanlı PPP işlem stratejisi

Bu çalışmada uydu yörünge ve saat düzeltmelerini elde etmek için IGS gerçek zamanlı servisi aracılığıyla yayınlanan ve CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) analiz merkezi tarafından üretilen SSRA00CNE0 mesajı kullanılmıştır. IGS gerçek zamanlı ürünleri ise BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie) tarafından geliştirilen NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) istemci programı (BNC) yardımıyla elde edilmiştir (BNC, 2022). IGS

gerçek zamanlı ürünleri navigasyon mesajından elde edilen uydu yörünge ve saat bilgisine düzeltme olarak yayımlandığı için ilgili servis aracılığıyla sistemlere ait navigasyon mesajları da aynı şekilde elde edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada PPP çözümleri, PPPH yazılımının gerçek zamanlı çözümlerin gerçekleşmesine olanak sağlayan genişletilmiş bir versiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Bahadur & Nohutcu, 2018b). Çözümlerde uygulanan işlem stratejileri Tablo 1'de detaylı bir şekilde sunulmuştur.

Tablo 1. Gerçek zamanlı PPP çözümlerinde uygulanan işlem stratejileri.**Table 1.** Processing strategies applied in the real-time PPP processes.

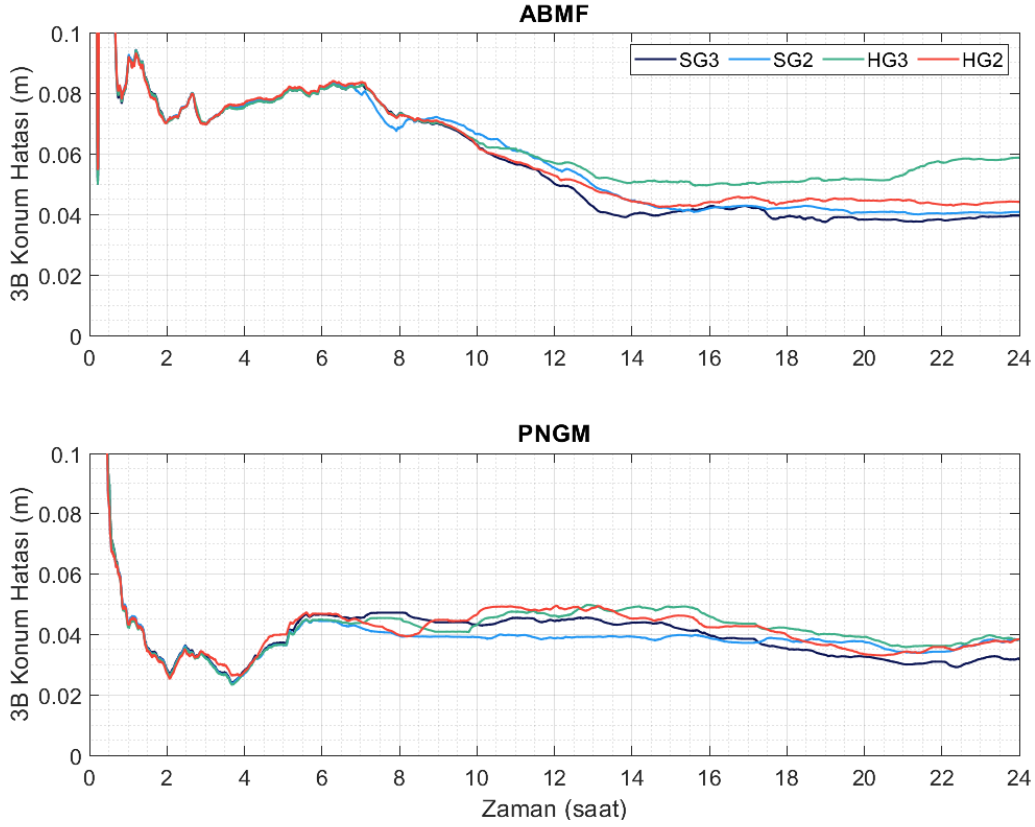
| | |
|---------------------------------------|--|
| Gözlemler | GPS için L1 ve L2, GLONASS için G1 ve G2, Galileo için E1 ve E5a, BDS için B1 ve B3 sinyalleri üzerindeki çift-frekanslı kod ve faz gözlemlerinin İB kombinasyonları |
| Uydu yörünge ve saat düzeltmesi | CNES gerçek zamanlı ürünleri |
| Troposfer | |
| Kuru bileşen | Saastamoinen ve Hopfield modelleri ile düzeltildi |
| Islak bileşen | Epok bazlı kestirildi |
| Alıcı anten faz merkezi ve değişimi | Güncel IGS anten modeli (igs14.atx) ile düzeltildi |
| Rölativistik etkiler | Düzeltildi (Kouba, 2015) |
| Faz dönüklüğü | Düzeltildi (Wu vd., 1993) |
| Katı Yer gelgiti ve okyanus yüklemesi | Düzeltildi (Petit & Luzum, 2010) |
| Kestirim metodu | Kalman filtresi |
| Gözlemlerin standart sapmaları | Kod ve faz gözlemleri için 0.3 ve 0.003 m |
| Gözlem ağırlık yöntemi | Yükselim açısına bağlı |

3.2. Konum belirleme performansı

Farklı troposfer modellerinin gerçek zamanlı PPP performansına olan etkisini araştırmak için Saastamoinen ve Hopfield modellerinin kullanıldığı iki farklı senaryo oluşturulmuştur. Ayrıca bu modellerde ihtiyaç duyulan meteorolojik parametreleri elde etmek için de hem GPT2 hem de GPT3 modelleri eşlenik iz düşüm fonksiyonları VMF1 ve VMF3 ile ayrı ayrı kullanılmıştır. Dolayısıyla Saastamoinen GPT3, Saastamoinen GPT2, Hopfield GPT3 ve Hopfield GPT2 olmak üzere toplamda dört farklı troposferik işlem senaryosu oluşturulmuştur. Bu senaryolar çalışmanın devamında SG3, SG2, HG3 ve HG2 modelleri olarak adlandırılacaktır. 16 istasyona ait 10 günlük veri seti bu dört farklı senaryo altında ayrı ayrı işlenmiştir. PPP çözümlerinin konum belirleme performansını değerlendirebilmek için IGS haftalık çözümlerinde yayınlanan yüksek doğruluğa sahip istasyon koordinatları referans kabul edilerek lokal koordinat sisteminde (kuzey, doğu, yukarı) konum hataları hesaplanmıştır. Konum hataları PPP çözümünün gerçekleştirildiği her epok için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Şekil 2, 19 Aralık 2021 tarihli ABMF ve PNGM istasyonlarına ait veriler kullanılarak gerçekleştirilen farklı troposfer modellerinin kullanıldığı gerçek zamanlı PPP çözümlerinden elde edilen üç boyutlu (3B) konum hatalarını göstermektedir. Şekilden görüleceği üzere kullanılan troposfer modeline göre elde edilen konum belirleme performansı önemli ölçüde değişmektedir. Farklı troposfer

modellerinin kullanılması her iki istasyon için de özellikle sekizinci saatten sonra PPP performansında kayda değer değişikliklere yol açmıştır. Gün sonundaki konum hataları incelendiğinde her iki istasyonda da SG3 modelinin kullanıldığı çözümünün diğer çözümlere göre daha düşük konum hatasına sahip olduğu görülmektedir.

Diğer taraftan her bir istasyonda dört farklı troposfer modelinin kullanıldığı gerçek zamanlı PPP çözümlerinden elde edilen 3B konum hataları için hesaplanan Karesel Ortalama Hata (KOH) değerleri Tablo 2’de sunulmuştur. KOH değerlerinin hesabında ilgili istasyonların on günlük dönem boyunca tüm günlük çözümleri dikkate alınmıştır. Tablodan görüleceği üzere elde edilen hatalar istasyona ve troposfer yaklaşımına bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. İstasyonlar arası farklılıklar temel olarak istasyonun konumu, istasyonun yüksekliği ve atmosfer koşullarındaki değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Aynı istasyona ait çözümlerde ise yine kullanılan troposfer modeline göre önemli değişiklikler gözlenmektedir. Tüm istasyonlar incelendiğinde en düşük KOH değerlerinin istasyonların 10 tanesinde SG3 modelinin kullanıldığı çözümde, 2 tanesinde SG2 modelinin kullanıldığı çözümde, 3 tanesinde HG3 modelinin kullanıldığı çözümde ve 1 tanesinde ise HG2 modelinin kullanıldığı çözümde elde edildiği görülmektedir.



Şekil 2. 19 Aralık 2021 tarihinde ABMF ve PNGM istasyonları için farklı troposfer modellerinin kullanıldığı PPP çözümlerinden elde edilen 3B konum hataları.

Figure 2. 3D positioning errors obtained from PPP solutions that different troposphere models are employed for the stations of ABMF and PNGM on December 19, 2021.

Tablo 2. Farklı troposfer modellerinin kullanıldığı PPP çözümlerinden elde edilen 3B konum hataları için hesap edilen istasyon bazlı KOH değerleri (m).

Table 2. Station-wise RMS values computed for 3D positioning errors acquired from PPP solutions that different troposphere models are employed (m).

| İstasyon | Model | | | |
|----------|--------|--------|--------|--------|
| | SG3 | SG2 | HG3 | HG2 |
| ABMF | 0.0312 | 0.0360 | 0.0400 | 0.0387 |
| AREG | 0.0341 | 0.0342 | 0.0342 | 0.0356 |
| DAV1 | 0.0310 | 0.0579 | 0.0446 | 0.0556 |
| DJIG | 0.0232 | 0.0208 | 0.0232 | 0.0239 |
| ISTA | 0.0242 | 0.0250 | 0.0239 | 0.0242 |
| JPLM | 0.0152 | 0.0163 | 0.0157 | 0.0156 |
| KRGG | 0.0212 | 0.0250 | 0.0236 | 0.0244 |
| NNOR | 0.0232 | 0.0212 | 0.0234 | 0.0234 |
| OHI3 | 0.0193 | 0.0202 | 0.0196 | 0.0199 |
| PNGM | 0.0422 | 0.0433 | 0.0471 | 0.0446 |
| REUN | 0.0228 | 0.0313 | 0.0312 | 0.0317 |
| REYK | 0.0280 | 0.0278 | 0.0276 | 0.0274 |
| SUTM | 0.0284 | 0.0299 | 0.0288 | 0.0299 |
| TWTF | 0.0294 | 0.0374 | 0.0289 | 0.0376 |
| UCAL | 0.0212 | 0.0226 | 0.0221 | 0.0216 |
| ULAB | 0.0317 | 0.0338 | 0.0311 | 0.0336 |

On günlük dönem boyunca tüm istasyonlara ait sonuçlar göz önüne alındığında dört farklı troposfer modeli için kuzey, doğu, yukarı yönlerde elde edilen konum hataları için hesaplanan KOH değerleri Tablo 3'te verilmiştir. İlgili tablo ayrıca tüm istasyonlardan elde edilen 3B konum hataları için hesap edilen KOH değerlerini de sunmaktadır. Tablo incelendiğinde beklenildiği üzere yukarı yöndeki hatanın diğer yönlerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Farklı troposfer modellerinin PPP çözümüne etkisine gelince kuzey yönde elde edilen KOH değerleri birbirine

yakınken diğer yönlerdeki değerler arasında kayda değer farklar gözlenmektedir. SG3 modelinin kullanıldığı çözümün tüm bileşenler için en düşük KOH değerine sahip olduğu yine tablodan görülmektedir. 3B konum hatası için hesaplanan KOH değerleri düşünüldüğünde SG3 modelinin kullanıldığı çözümün SG2, HG3 ve HG2 modellerinin kullanıldığı çözümlere kıyasla gerçek zamanlı PPP'nin konum belirleme performansını sırasıyla %13.7, %9.2 ve %14.4 oranında iyileştirdiği sonuçlardan anlaşılmaktadır.

Tablo 3. Tüm istasyonlar göz önüne alınarak farklı troposfer modellerinin kullanıldığı PPP çözümlerinden elde edilen konum hataları için hesaplanan KOH değerleri (m).

Table 3. RMS values computed for positioning errors acquired from PPP solutions that different troposphere models are employed considering all stations (m).

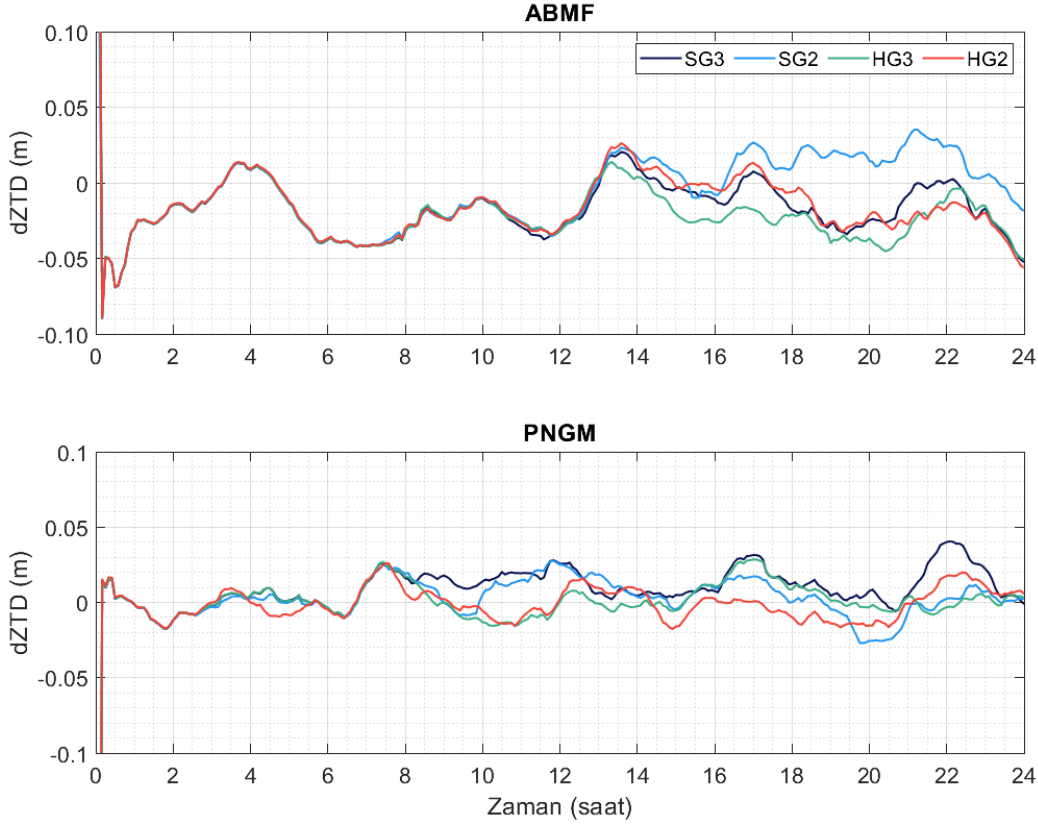
| Model | Konum hatası | | | |
|-------|--------------|--------|--------|--------|
| | Kuzey | Doğu | Yukarı | 3B |
| SG3 | 0.0095 | 0.0138 | 0.0215 | 0.0272 |
| SG2 | 0.0099 | 0.0158 | 0.0255 | 0.0316 |
| HG3 | 0.0097 | 0.0162 | 0.0233 | 0.0300 |
| HG2 | 0.0098 | 0.0172 | 0.0249 | 0.0318 |

Son olarak bu çalışmada PPP çözümlerinin konum belirleme performansının bir değerlendirme ölçütü olarak yakınsama süresi incelenmiştir. Burada yakınsama süresi 3B konum hatasının 10 cm altına düştüğü ve devamındaki 10 dakika 10 cm üzerine çıkmadığı epok olarak tanımlanmıştır. Bu tanıma göre test dönemi boyunca tüm istasyonlar göz önünde bulundurularak farklı troposfer modellerinin kullanıldığı PPP çözümleri için ortalama yakınsama süreleri hesap edilmiştir. Ortalama yakınsama süreleri SG3, SG2, HG3 ve HG2 modellerinin kullanıldığı PPP çözümleri için sırasıyla 35.40, 39.06, 37.89 ve 39.38 dakika olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar SG3 modelinin kullanıldığı çözümün ortalama yakınsama süresini SG2, HG3 ve HG2 modellerinin kullanıldığı çözümlere göre sırasıyla %9.4, %6.6 ve %10.1 oranında kısalttığını göstermektedir.

3.3. ZTD kestirim performansı

PPP tekniğinde troposferik etkinin kuru bileşeninin deneysel modellerle düzeltildiği ıslak bileşeninin de bilinmeyen bir parametre olarak tahmin sürecinde kestirildiği önceki bölümlerde belirtilmişti. Dolayısıyla troposferin kuru bileşenini düzeltmek için kullanılan model konum bileşenlerini olduğu gibi elde edilen troposfer kestirimini de etkilemektedir. Bunun sonucu olarak

kuru ve ıslak troposfer gecikmelerinin toplamı olan ZTD değeri de kullanılan troposfer modeline göre değişim göstermektedir. Bu çalışma kapsamında PPP performansının değerlendirilmesinde konum bileşenlerinin yanı sıra ZTD kestirimleri de analiz edilmiştir. ZTD kestirim performansını değerlendirmek için IGS tarafından yayınlanan hassas troposfer ürünleri referans olarak kabul edilmiş ve PPP çözümlerinden elde edilen ZTD değerleriyle arasındaki farklar (dZTD) hesaplanmıştır. IGS hassas troposfer ürünleri hassas uydu yörünge ve saat bilgileri kullanılarak PPP tekniği aracılığıyla elde edilmektedir. Bu ürünler GMF (Global Mapping Function) iz düşüm fonksiyonu kullanılarak ve ayrıca 7 derece yükselim açısının altındaki gözlemler elimine edilerek kestirilmektedir (Teke vd., 2011). IGS troposfer ürünlerinin veri aralığı 300 saniye olduğu için dZTD değerleri yalnızca ilgili epoklarda hesaplanmıştır. 19 Aralık 2021 tarihli ABMF ve PNGM istasyonlarına ait veriler kullanılarak gerçekleştirilen farklı troposfer modellerinin kullanıldığı PPP çözümlerinden elde edilen günlük dZTD değerleri Şekil 3'te sunulmuştur. Şekilden görüldüğü üzere gerçek zamanlı PPP çözümünden elde edilen ZTD kestirim performansı konum belirleme performansında olduğu gibi kullanılan troposfer modeline göre değişiklikler göstermektedir.



Şekil 3. 19 Aralık 2021 tarihinde ABMF ve PNGM istasyonları için farklı troposfer modellerinin kullanıldığı PPP çözümlerinden elde edilen dZTD değerleri.

Figure 3. dZTD values obtained from PPP solutions that different troposphere models are employed for the stations of ABMF and PNGM on December 19, 2021.

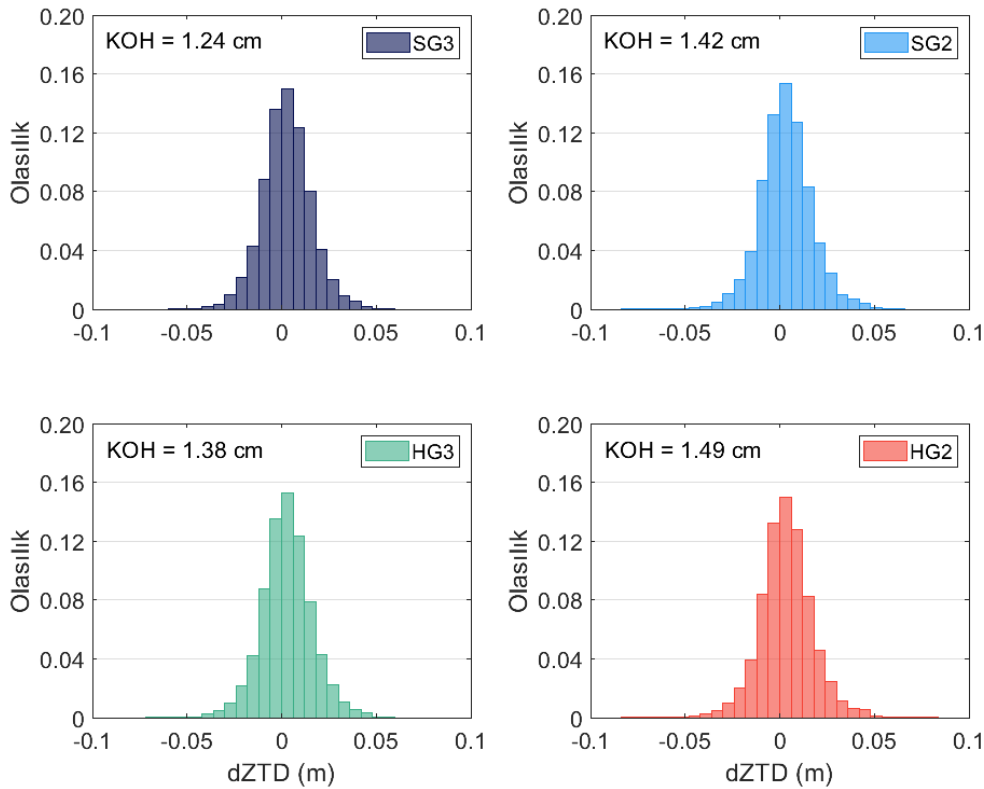
Diğer taraftan farklı troposfer modellerinin kullanıldığı PPP çözümlerinden elde edilen dZTD'ler için hesaplanan KOH değerleri her bir istasyon için Tablo 4'te verilmiştir. KOH hesaplanırken istasyon bazında 10 günlük dönem boyunca çözüm gerçekleştirilen her epoka ait dZTD değeri dikkate alınmıştır. Tablodan görüleceği üzere KOH değerleri istasyona ve kullanılan troposfer modeline bağlı olarak kayda değer miktarda değişmektedir. Sonuçlar incelendiğinde dZTD'ler için en küçük KOH değerlerinin 12 istasyonda SG3 modelinin kullanıldığı çözümden, 3 istasyonda SG2 modelinin kullanıldığı çözümden ve 1 istasyonda da HG3 modelinin kullanıldığı çözümden elde edildiği görülmektedir. Bu sonuçlar istasyonların büyük bir bölümünde SG3 modelinin kullanıldığı PPP çözümünün ZTD kestiriminde diğer modellerin kullanıldığı çözümlere kıyasla çok daha yüksek performans sergilediğini göstermektedir.

Tüm istasyonlar göz önüne alındığında farklı troposfer modellerinin kullanıldığı PPP çözümlerinden elde edilen dZTD değerlerine ait olasılık dağılımları Şekil 4'te sunulmuştur. Şekilde orijinal frekans değerleri yerine ilgili frekansların toplam epok sayısına bölümünden hesaplanan olasılık değerleri kullanılmıştır. Öte yandan farklı troposfer modellerinin kullanıldığı PPP çözümlerinden elde edilen dZTD'ler için hesaplanan KOH değerleri yine şekillerle birlikte verilmiştir. KOH değerleri SG3, SG2, HG3 ve HG2 modellerinin kullanıldığı PPP çözümleri için sırasıyla 1.24, 1.42, 1.38 ve 1.49 cm olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar SG3 modelinin kullanıldığı çözümün SG2, HG3 ve HG2 modellerinin kullanıldığı çözümlere kıyasla %12.7, %10.2 ve %16.8 oranında daha iyi ZTD kestirim performansına sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 4. Farklı troposfer modellerinin kullanıldığı PPP çözümlerinden elde edilen dZTD'ler için hesap edilen istasyon bazlı KOH değerleri (m).

Table 4. Station-wise RMS values computed for dZTDs acquired from PPP solutions that different troposphere models are employed (m).

| İstasyon | Model | | | |
|----------|--------|--------|--------|--------|
| | SG3 | SG2 | HG3 | HG2 |
| ABMF | 0.0196 | 0.0222 | 0.0217 | 0.0245 |
| AREG | 0.0133 | 0.0139 | 0.0135 | 0.0142 |
| DAV1 | 0.0099 | 0.0112 | 0.0121 | 0.0113 |
| DJIG | 0.0145 | 0.0195 | 0.0158 | 0.0187 |
| ISTA | 0.0082 | 0.0090 | 0.0086 | 0.0090 |
| JPLM | 0.0127 | 0.0129 | 0.0129 | 0.0138 |
| KRGG | 0.0113 | 0.0116 | 0.0112 | 0.0121 |
| NNOR | 0.0116 | 0.0142 | 0.0122 | 0.0141 |
| OHI3 | 0.0085 | 0.0096 | 0.0088 | 0.0097 |
| PNGM | 0.0198 | 0.0194 | 0.0200 | 0.0226 |
| REUN | 0.0145 | 0.0136 | 0.0141 | 0.0142 |
| REYK | 0.0117 | 0.0117 | 0.0123 | 0.0121 |
| SUTM | 0.0158 | 0.0151 | 0.0156 | 0.0158 |
| TWTF | 0.0124 | 0.0125 | 0.0124 | 0.0126 |
| UCAL | 0.0111 | 0.0115 | 0.0113 | 0.0111 |
| ULAB | 0.0099 | 0.0102 | 0.0103 | 0.0103 |



Şekil 4. Farklı troposfer modellerinin kullanıldığı PPP çözümlerinden elde edilen dZTD değerlerine ait olasılık dağılımları.

Figure 4. Probability distributions for dZTD values acquired from PPP solutions that different troposphere models are employed.

4. Sonuçlar

4. Conclusions

Bu çalışmada farklı troposfer modellerinin gerçek zamanlı çoklu-GNSS PPP performansı üzerine olan etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla Saastamoinen ve Hopfield modellerinin hem GPT2 hem de GPT3 modelleri ile kullanıldığı toplamda dört farklı troposfer modeli oluşturulmuştur. 19-28 Aralık 2021 tarihleri arasındaki on günlük dönem için toplamda 16 IGS istasyonundan elde edilen gözlem verisi dört farklı troposfer modeli kullanılarak ayrı ayrı işlenmiştir. Elde edilen sonuçlar hem konum belirleme hem de ZTD kestirim performansı açısından analiz edilmiştir.

Sonuçlar, tüm istasyonlar göz önüne alındığında SG3, SG2, HG3 ve HG2 modellerinin kullanıldığı PPP çözümlerinden elde edilen 3B konum hatalarına ait KOH değerlerinin sırasıyla 2.72, 3.16, 3.00 ve 3.18 cm olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar gerek Saastamoinen gerekse Hopfield modelleri için GPT3 modelinin kullanılması durumunda GPT2 modeline göre daha yüksek konum doğruluğu elde edilebileceğini işaret etmektedir. Bunun temel nedeni olarak GPT3'ün meteorolojik parametrelerin elde edilmesinde çeşitli iyileştirmeleri içeren daha güncel bir model olmasıdır. Diğer taraftan sonuçların işaret ettiği bir diğer husus Saastamoinen modelin Hopfield modele kıyasla gerçek zamanlı PPP çözümü için daha yüksek konum belirleme performansı sağladığıdır. Saastamoinen modelin GPT3 ile eşlenik kullanıldığı durumda (SG3) en düşük KOH değeri elde edilmiştir ve bu değer Hopfield modelinin kullanıldığı eş değer çözüme (HG3) göre 3B konum doğruluğunu ortalama %9.2 oranında iyileştirmiştir. Benzer şekilde SG3 modelinin kullanıldığı PPP çözümü 35.4 dakika ile en düşük yakınsama süresine sahiptir. Bu sonuç SG3 modelinin kullanıldığı çözümün en yakın çözüme göre %6.6 oranında daha kısa yakınsama süresine sahip olduğunu göstermektedir.

Diğer taraftan tüm istasyonlar düşünüldüğünde SG3, SG2, HG3 ve HG2 modellerinin kullanıldığı PPP çözümlerinden elde edilen dZTD'ler için hesap edilen KOH değerleri sırasıyla 1.24, 1.42, 1.38 ve 1.49 cm'dir. Sonuçlar konum belirleme performansına benzer şekilde Saastamoinen modelin GPT3 ile eşlenik kullanılması durumunda (SG3) ZTD kestirim performansının diğer modellere kıyasla önemli ölçüde iyileştirilebileceğini göstermiştir. SG3 modelinin kullanıldığı PPP çözümünden elde edilen ZTD kestirim doğruluğu en yakın çözüme göre %10.2 oranında daha iyidir. Bu çalışma gerçek zamanlı

PPP çözümlerinde kullanılan troposfer modellerinin elde edilecek sonuçlar üzerine önemli etkisi olduğunu göstermektedir. Ayrıca gerek konum belirleme gerekse ZTD kestirimi açısından Saastamoinen modelin GPT3 ile kullanılması durumunda gerçek zamanlı çoklu-GNSS PPP çözümünden en yüksek performansın elde edilebileceği bu çalışmanın temel çıkarımlarından birisidir.

Yazar katkısı

Author contribution

Bu makalede uygulanan metodoloji, kavramsallaştırma, veri toplama, görselleştirme, yazma ve inceleme işlemleri Berkay BAHADUR tarafından yapılmıştır.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederim.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Abd Rabbou, M., El-Shazly, A., & Ahmed, K. (2018). Comparative analysis of multi-constellation GNSS single-frequency precise point positioning. *Survey Review*, 50(361), 373-382. <https://doi.org/10.1080/00396265.2017.1296628>
- Bahadur, B., & Nohutcu, M. (2018a). Türkiye ve yakın çevresi için çoklu-GNSS kombinasyonlarının PPP performansına etkisi. *Harita Dergisi*, 84(160), 1-11.
- Bahadur, B., & Nohutcu, M. (2018b). PPPH: a MATLAB-based software for multi-GNSS precise point positioning analysis. *GPS Solutions*, 22(4), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0777-z>
- BNC-BKG NTRIP Client (2022, 21 Ocak) <https://igs.bkg.bund.de/ntrip/download>
- Böhm, J., Heinkelmann, R., & Schuh, H. (2007). Short note: a global model of pressure and temperature

- for geodetic applications. *Journal of Geodesy*, 81(10), 679-683. <https://doi.org/10.1007/s00190-007-0135-3>
- Cai, C., & Gao, Y. (2013). Modeling and assessment of combined GPS/GLONASS precise point positioning. *GPS Solutions*, 17(2), 223-236. <https://doi.org/10.1007/s10291-012-0273-9>
- Davis, J.L., Herring, T.A., Shapiro, I.I., Rogers, A.E.E., & Elgered, G. (1985). Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Science*, 20(6), 1593-1607. <https://doi.org/10.1029/RS020i006p01593>
- Dousa, J., & Vaclavovic, P. (2014). Real-time zenith tropospheric delays in support of numerical weather prediction applications. *Advances in Space Research*, 53(9), 1347-1358. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.02.021>
- Hadas, T., & Bosy, J. (2015). IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time. *GPS Solutions*, 19(1), 93-105. <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0369-5>
- Hadas, T., Teferle, F.N., Kazmierski, K., Hordyniec, P., & Bosy, J. (2017). Optimum stochastic modeling for GNSS tropospheric delay estimation in real-time. *GPS Solutions*, 21(3), 1069-1081. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0595-0>
- Hopfield, H.S. (1969). Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. *Journal of Geophysical Research*, 74(18), 4487-4499. <https://doi.org/10.1029/JC074i018p04487>
- Jin, S., & Su, K. (2019). Co-seismic displacement and waveforms of the 2018 Alaska earthquake from high-rate GPS PPP velocity estimation. *Journal of Geodesy*, 93(9), 1559-1569. <https://doi.org/10.1007/s00190-019-01269-3>
- Kouba, J., & Héroux, P. (2001). GPS precise point positioning using IGS orbit products. *GPS Solutions*, 5(2), 12-28. <https://doi.org/10.1007/PL00012883>
- Kouba, J. (2015). A Guide to Using International GNSS Service (IGS) Products, IGS website <https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/201271873-A-Guide-to-Using-the-IGS-Products>
- Lagler, K., Schindelegger, M., Böhm, J., Krásná, H., & Nilsson, T. (2013). GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques. *Geophysical Research Letters*, 40(6), 1069-1073. <https://doi.org/10.1002/grl.50288>
- Landskron, D., & Böhm, J. (2018). VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. *Journal of Geodesy*, 92(4), 349-360. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1066-2>
- Li, X., Ge, M., Zhang, X., Zhang, Y., Guo, B., Wang, R., Klotz, J., & Wickert, J. (2013). 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. <https://doi.org/10.1002/grl.50138>
- Li, X., Ge, M., Dai, X., Ren, X., Fritsche, M., Wickert, J., & Schuh, H. (2015). Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo. *Journal of Geodesy*, 89(6), 607-635. <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0802-8>
- Lu, C., Li, X., Nilsson, T., Ning, T., Heinkelmann, R., Ge, M., Glaser, S., & Schuh, H. (2015). Real-time retrieval of precipitable water vapor from GPS and BeiDou observations. *Journal of Geodesy*, 89(9), 843-856. <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0818-0>
- Nie, Z., Liu, F., & Gao, Y. (2020). Real-time precise point positioning with a low-cost dual-frequency GNSS device. *GPS Solutions*, 24(1), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0922-3>
- Pan, Z., Chai, H., & Kong, Y. (2017). Integrating multi-GNSS to improve the performance of precise point positioning. *Advances in Space Research*, 60(12), 2596-2606. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.01.014>
- Petit, G., & Luzum, B. (2010). IERS Conventions 2010 IERS Techn. Note 36 Verlagdes Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, Germany, ISBN 3-89888-989-6
- Saastamoinen, J. (1972). Contributions to the theory of atmospheric refraction. *Bulletin Géodésique*, 105(1), 279-298. <https://doi.org/10.1007/BF02521844>
- Shi, J., Yuan, X., Cai, Y., & Wang, G. (2017). GPS real-time precise point positioning for aerial triangulation. *GPS Solutions*, 21(2), 405-414. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0532-2>
- Steigenberger, P., Hugentobler, U., Loyer, S., Perosanz, F., Prange, L., Dach, R., Uhlemann, M., Gendt, G., & Montenbruck, O. (2015). Galileo orbit and clock quality of the IGS Multi-GNSS Experiment. *Advances in Space Research*, 55(1), 269-281. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.06.030>
- Teke, K., Böhm, J., Nilsson, T., Schuh, H., Steigenberger, P., Dach, R., ... & Shimizu, S. (2011). Multi-technique comparison of troposphere zenith delays and gradients during

- CONT08. *Journal of Geodesy*, 85(7), 395-413. <https://doi.org/10.1007/s00190-010-0434-y>
- Teunissen, P.J.G., & Montenbruck, O. (Eds.) (2017). *Springer handbook of global navigation satellite systems*, Springer.
- Tu, R., Zhang, H., Ge, M., & Huang, G. (2013). A real-time ionospheric model based on GNSS Precise Point Positioning. *Advances in Space Research*, 52(6), 1125-1134. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.06.015>
- Wright, T. J., Houlié, N., Hildyard, M., & Iwabuchi, T. (2012). Real-time, reliable magnitudes for large earthquakes from 1 Hz GPS precise point positioning: The 2011 Tohoku-Oki (Japan) earthquake. *Geophysical Research Letters*, 39(12). <https://doi.org/10.1029/2012GL051894>
- Wu, J., Wu, S., Hajj, G., Bertiger, W., & Liechten, S. (1993). Effects of antenna orientation on GPS carrier phase, *Manuscripta Geodaetica*, 18(2), 91-98.
- Yigit, C. O., & 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. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1284160>
- Zhao, Q., Yao, Y., & Yao, W. (2018a). GPS-based PWV for precipitation forecasting and its application to a typhoon event. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 167, 124-133. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.11.013>
- Zhao, Q., Yao, Y., Yao, W., & Li, Z. (2018b). Real-time precise point positioning-based zenith tropospheric delay for precipitation forecasting. *Scientific Reports*, 8(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26299-3>
- 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. <https://doi.org/10.1029/96JB03860>