



Farklı açık kaynak kodlu tek-frekanslı hassas nokta konum belirleme (SF-PPP) yazılımlarının statik moddaki konum belirleme yeteneklerinin değerlendirilmesi

Mert Bezcioglu*¹

¹Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Kocaeli, Türkiye, mbezcioglu@gtu.edu.tr

Kaynak Göster: Bezcioglu, M.(2024). Farklı açık kaynak kodlu tek-frekanslı hassas nokta konum belirleme (SF-PPP) yazılımlarının statik moddaki konum belirleme yeteneklerinin değerlendirilmesi. Geomatik, 9 (3), 313-322

DOI: 10.29128/geomatik.1477892

Anahtar Kelimeler

GNSS
SF-PPP
GAMP
PPPLib
SUPREME

Araştırma Makalesi

Geliş: 03.05.2024
Revize: 24.05.2024
Kabul: 05.06.2024
Yayınlanma: 02.12.2024



Öz

Bu çalışma tek-frekanslı hassas nokta konum belirleme (SF-PPP) çözümleri elde etme imkânı sunan açık kaynak kodlu GAMP, PPPLib ve SUPREME yazılımlarının statik moddaki konum belirleme yeteneklerini değerlendirmektedir. Çalışmada, üç farklı Uluslararası GNSS Servisi (IGS) istasyonundan elde edilen ardışık 7 gündeki çoklu- Küresel Uydu Navigasyon Sistemi (GNSS) gözlemleri ilgili yazılımlar ile SF-PPP tekniği kullanılarak değerlendirilmiş ve elde edilen çözümler IGS haftalık çözümler ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar yakınsama süresi, tekrar edilebilirlik ve doğruluk açısından incelenmiştir. Çalışmanın bulguları, GAMP yazılımının SUPREME ve PPPLib yazılımlarından sırasıyla %24.3 ve %85.8 oranında daha hızlı yakınsama süresi sağladığını ifade etmektedir. Ek olarak, GAMP yazılımı PPPLib yazılımından %68.5 oranında daha tutarlı iken, SUPREME yazılımından %17.2 oranında daha tutarlı sonuç sağlamaktadır. Çalışmada değerlendiren tüm günlerden elde edilen konum doğrulukları göz önüne alındığında ise GAMP, PPPLib ve SUPREME yazılımlarından elde edilen üç boyutlu Karesel Ortalama Hata (KOH) değerleri sırasıyla 8.4 cm, 39.6 cm ve 10.9 cm'dir. Bu sonuçlar GAMP yazılımının diğer yazılımlara olan üstünlüğünü açıkça göstermektedir. Son olarak, çalışmada elde edilen sonuçlar tek-frekanslı GNSS gözlemleri kullanılarak PPPLib yazılımından elde edilen sonuçların yüksek doğruluk ve hassasiyet gerektiren uygulamalarda yeterli olmayacağını, buna karşılık cm mertebesindeki doğruluğun yeterli olacağı uygulamalarda tek-frekanslı gözlemlerin GAMP ve SUPREME yazılımları ile değerlendirilebileceğini ifade etmektedir.

Evaluation of the positioning capabilities of different open-source single-frequency precise point positioning (SF-PPP) software in static mode

Keywords

GNSS
SF-PPP
GAMP
PPPLib
SUPREME

Research Article

Received: 03.05.2024
Revised: 24.05.2024
Accepted: 05.06.2024
Published: 02.12.2024

Abstract

This investigation evaluates the positioning capabilities of the open-source GAMP, PPPLib, and SUPREME software in static mode, which provide the opportunity to obtain single-frequency precise point positioning (SF-PPP) solutions. In the study, multi-Global Satellite Navigation System (GNSS) observations obtained from three different International GNSS Service (IGS) stations on consecutive 7 days were evaluated with the aforesaid software, and the obtained solutions were compared with IGS weekly solutions. The results obtained were examined in terms of convergence time, repeatability, and accuracy. The findings indicate that GAMP provides 24.3% and 85.8% faster convergence time than SUPREME and PPPLib, respectively. Moreover, GAMP provides 68.5% more consistent results than PPPLib and 17.2% more consistent results than SUPREME. Considering the positioning accuracies derived from all evaluated days, the three-dimensional Root Mean Square Error (RMSE) values obtained from GAMP, PPPLib, and SUPREME are 8.4 cm, 39.6 cm, and 10.9 cm, respectively. These outcomes clearly demonstrate the superiority of GAMP over others. Finally, the results show that the results obtained from PPPLib software using single-frequency GNSS observations would not be sufficient in applications requiring high accuracy and precision, whereas single-frequency observations can be evaluated with GAMP and SUPREME software in applications where cm-level accuracy would be sufficient.

1. Giriş

Hassas Nokta Konum Belirleme (PPP), 1990'lı yıllarda Küresel Uydu Navigasyon Sistemi (GNSS) topluluğuna tanıtılmış olup, sabit GNSS istasyonlarından düzeltmeler gibi ilave GNSS altyapısı gerektirmeden yüksek doğruluk ve hassasiyet sağlama yeteneği nedeniyle oldukça popüler bir GNSS gözlemlerini değerlendirme yöntemidir (Malys ve Jensen, 1990; Ogutcu ve ark., 2022; Zumberge ve ark., 1997). Geleneksel-PPP tekniği, birinci-dereceden iyonosferik gecikmeyi ortadan kaldırmak için çift-frekanslı faz ve kod gözlemlerini kullanmaktadır (Kouba ve Héroux, 2001; Ogutcu, 2020a). Son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalar doğruluk ve hassasiyet bakımından geleneksel-PPP tekniğinin rölatif konum belirleme yöntemine yaklaştığını ifade etmektedir (Bezioglu ve ark., 2023; Ogutcu, 2020b). Ancak binlerce dolara mal olan çift-frekanslı jeodezik alıcıların yüksek maliyeti nedeniyle GNSS kullanıcılarının büyük bir bölümünün birkaç yüz dolar değerinde olan tek-frekanslı alıcılara yönelmesi, çift-frekanslı PPP (DF-PPP) tekniğinin, tek-frekanslı PPP'ye (SF-PPP) uyarlanması neden olmuş durumdadır (Hong ve ark., 2021). Ancak burada, SF-PPP tekniğinin yüksek doğruluk gerektiren jeodezik çalışmalarda halen daha yeterli doğruluğa ulaşamadığı ve gelişen de teknolojinin yardımı ile son dönemlerde çift-frekanslı düşük maliyetli GNSS alıcılarının geliştirildiği de ayrıca belirtilmelidir (Bezioglu, 2023a; Birinci ve ark., 2024). Son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalar SF-PPP tekniğinin konum belirleme (Bezioglu, 2023b; Cai ve ark., 2013; de Bakker ve Tiberius, 2017; Sterle ve ark., 2015), atmosfer (Bahadur, 2022), ve dinamik davranışların belirlenmesi (Bezioglu ve ark., 2024; Zheng ve ark., 2019) uygulamalarındaki performansını ifade etmiş durumdadır. Ancak iyonosferik gecikmenin SF-PPP tekniği için önemli bir hata kaynağı olduğunun altı çizilmelidir (Cai ve ark., 2017; Kalita ve Chetia, 2020; Zhu ve ark., 2020).

SF-PPP tekniğinde iyonosfer gecikmelerini elemine etmek veya etkisini azaltmak için çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir. İlk olarak, SF-PPP gözlem modelinde yer alan iyonosferik gecikme bilinmeyen parametre olarak ele alınabilir ve böylece fark alınmamış (undifferenced) ve kombine edilmemiş (uncombined) (UC) modeli elde edilir (Zhang ve ark., 2018; Zhou ve ark., 2018). Ek olarak, SF-PPP tekniğinde yer alan iyonosferik gecikme, faz ve kod gözlemlerinin kombinasyonu ile ortadan kaldırılabilir. Bu yaklaşım, aynı zamanda Grup ve Faz İyonosfer Düzeltmesi (GRAPHIC) olarak da tanımlanır (Yunck, 1993). Son olarak, iyonosferik gecikme SF-PPP tekniğinde bölgesel iyonosfer modeli, ampirik Klobuchar modeli, Küresel İyonosfer Haritası (GIM) ürünleri gibi harici iyonosfer ürünleri kullanılarak, herhangi bir ek iyonosferik parametre tahmin edilmeden ortadan kaldırılabilir. Bu model ise iyonosfer-zorlamalı (IC) SF-PPP tekniği olarak adlandırılmaktadır (Shen ve ark., 2022; Zhu ve ark., 2021).

Günümüzde birçok çevrimiçi PPP servisi bulunmaktadır. Söz konusu bu servisler arasında oldukça yaygın olarak kullanılan servisler APPS, GAPS, CSRS-PPP ve magic-GNSS'dir. Çeşitli çalışmalar çevrimiçi PPP hizmetlerinin çeşitli uygulamalardaki performansını

incelemiştir (Bilgen ve ark., 2022). Örneğin Alçay ve ark., (2013) CSRS-PPP, Magic-GNSS ve APPS yazılımlarının statik moddaki konum belirleme performanslarını değerlendirmiş ve söz konusu yazılımlar arasında dikkate değer anlamlı bir farkın olmadığını ifade etmişlerdir. Bahadur ve Üstün, (2014) CSRS-PPP, Magic-GNSS ve APPS servislerine ek olarak AUSPOS, Trimble CenterPoint RTX ve OPUS yazılımlarını değerlendirmiş ve yeterli sürede gözlem elde edilmesi durumunda çevrimiçi PPP servislerinin klasik yöntemi kullanan servisler kadar başarılı sonuç verdiğini ifade etmişlerdir. Şimşek ve ark., (2019) tektonik hareketlerin belirlenmesi uyumalarında CSRS-PPP servisinin performansını OPUS ve AUSPOS yazılımları ile karşılaştırılmalı olarak incelemiş ve çevrimiçi servislerin tektonik faaliyetlerin belirlenmesi uygulamalarında kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. İnyurt ve Ulukavak, (2020) CSRS-PPP ve Trimble-RTX servislerinin performansını irdelemiş ve CSRS-PPP servisinin küçük farklarla RTX servिसinden daha iyi olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Özdemir, (2022) Magic-GNSS, CSRS-PPP, OPUS ve AUSPOS servislerinin konum belirleme yeteneklerini değerlendirmiş ve Magic-GNSS ve CSRS-PPP servislerinin benzer performans gösterdiğini ifade etmiştir. Pırtı ve Yazıcı, (2022) AUSPOS, CSRS-PPP ve Trimble RTX servislerinin performansını incelemiş ve CSRS-PPP ve Trimble RTX servislerinin AUSPOS servisi ile benzer sonuç sağladığını belirtmişlerdir. Buna ek olarak, CSRS-PPP servिसinden elde edilen çözümlerin referans olarak ele alındığı çalışmalar da bulunmaktadır (Alçay ve Atiz, 2021).

Burada, yukarıda ifade edilen çevrimiçi PPP servislerinin tek-frekanslı GNSS gözlemlerini değerlendirme yeteneğinin olmadığını altı çizilmelidir. Buna ek olarak, mevcut durumda GNSS topluluğunun ulaşabileceği PPPH, Net_diff ve RTKLIB gibi birçok açık kaynak kodlu PPP yazılımı bulunmaktadır (Bahadur ve Nohutcu, 2018; Takasu ve Yasuda, 2009; Zhang ve ark., 2020). İlgili yazılımlar çift- veya çok-frekanslı GNSS gözlemlerini değerlendirebilme yeteneğine sahiptir. GNSS topluluğunun tek-frekanslı GNSS gözlemlerini değerlendirebilme yeteneğine sahip açık kaynak kodlu PPP yazılımı talebi ise 2018 yılında karşılık bulmuş, UC ve IC SF-PPP çözümleri gerçekleştirme yeteneğine sahip GAMP yazılımı tanıtılmıştır (Zhou ve ark., 2018). GAMP yazılımını ise GRAPHIC algoritması ile SF-PPP çözümü gerçekleştirme yeteneğine sahip PPPLib yazılımı izlemiştir (Chen ve Chang, 2021). Burada, GAMP ve PPPLib yazılımlarının tek-frekanslı gözlemlere ek olarak çift- ve çok-frekanslı GNSS gözlemlerini de değerlendirebildiği ifade edilmelidir. En son olarak, UC SF-PPP çözümüne olanak sağlayan ve sadece tek-frekanslı GNSS gözlemlerini değerlendirebilen SUPREME yazılımı GNSS topluluğunun kullanımına sunulmuştur (Zhao ve ark., 2021). Ek olarak, GNSS tekniğinde çoklu-GNSS gözlemlerinin öneminden ayrıca bahsedilmelidir (Erdem ve Demirel, 2022; Konukseven ve ark., 2022). Burada, söz konusu üç yazılımın da çoklu-GNSS gözlemlerini değerlendirebildiği ifade edilmelidir.

Mevcut ulusal ve uluslararası literatür incelendiğinde çevrimiçi PPP servislerinin ve çok-frekanslı gözlemleri değerlendirme yeteneğine sahip açık kaynak kodlu GNSS yazılımlarının konum belirleme performanslarının değerlendirildiği görülmektedir (Mou

ve ark., 2023; Vázquez-Ontiveros ve ark., 2023). Ancak, tek-frekanslı hassas nokta konum belirleme yeteneğine sahip açık kaynak kodlu yazılımların konum belirleme yeteneklerinin henüz detaylı bir şekilde incelenmediği son derece açıktır. Bu çalışmada, mevcut ulusal ve uluslararası literatürdeki çalışmalardan farklı olarak ilk defa GNSS kullanıcılarına tek-frekanslı GNSS gözlemlerini kullanarak hassas nokta konum belirleme çözümleri elde etme olanağı sağlayan açık kaynak kodlu GAMP, PPPLib ve SUPREME yazılımlarının konum belirleme performansı karşılaştırmalı bir yaklaşımla sunulmaktadır. Çalışmanın amacı göz önüne alınarak üç farklı Uluslararası GNSS Servisi (IGS) istasyonunda elde edilen 7 günlük gözlemler ilgili yazılımlar ile statik moda değerlendirilmiş ve farklı yazılımlara ve yaklaşımlara dayalı olarak elde edilen SF-PPP çözümleri IGS haftalık çözümler ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ise yakınsama süresi, doğruluk ve tekrar edilebilirlik açısından incelenerek okuyucuya sunulmuştur. Çalışmayı öne çıkaran bir diğer özellik ise, UC SF-PPP tekniğini kullanan GAMP ve SUPREME ile GRAPHIC algoritmasını kullanan PPPLib yazılımları kullanılarak, temelde iki farklı SF-PPP algoritmasının performansı da ayrıca sunulmuş olmasıdır.

2. Yöntem

Bu bölümde, öncelikle tek-frekanslı kod ve faz gözlemlerine dayalı gözlem denklemi tartışılacak, ardından bu çalışmada kullanılan GAMP, PPPLib ve SUPREME yazılımlarının kullandığı fark alınmamış ve kombine edilmemiş SF-PPP tekniği ve GRAPHIC modeli sunulacaktır. Son olarak deney tasarımından söz edilecektir.

2.1. Tek-frekanslı gözlem modeli

SF-PPP tekniği için, r alıcısı, s uydusu ve T GNSS uydu takımyıldızı için (GPS'i G , GLONASS'ı R , BeiDou'yu C ve Galileo'yu E temsil etmektedir), faz (L) ve kod (P) ölçümlerinin gözlem modeli aşağıdaki gibi tanımlanabilir (Bezioglu, 2023b).

$$L_{r,1}^{s,T} = \rho_r^s + c(dt_r - dt^{s,T}) + m_r^{s,T} \cdot Z_w - I_{r,1}^{s,T} + \lambda_1^{s,T}(N_{r,1}^{s,T} + b_{r,1}^{s,T} - b_1^{s,T}) + \varepsilon_{r,1}^{s,T} \quad (1)$$

$$P_{r,1}^{s,T} = \rho_r^s + c(dt_r - dt^{s,T}) + c(d_{r,1}^{s,T} - d_1^{s,T}) + m_r^{s,T} \cdot Z_w + I_{r,1}^{s,T} + e_{r,1}^{s,T} \quad (2)$$

denklem (1) ve (2)'de yer alan $L_{r,1}^{s,T}$ and $P_{r,1}^{s,T}$ terimleri sırasıyla görelilik etkisi, anten faz merkezi ve değişimi ve gelgit etkileri gibi etkilerden arındırılmış kod ve faz gözlemlerini temsil etmektedir (Kouba 2015). ρ_r^s uydu ve alıcı arasındaki geometrik mesafeyi tanımlamaktadır. Burada, ρ_r^s sembolü ayrıca $(u_r^{s,T} \cdot x)$ olarak da tanımlanabilir. Bu ifade de $u_r^{s,T}$ uydu-alıcı arasındaki birim vektör bileşenini temsil ederken, x gözlem başlangıç konuma göre alıcı konumunun artışının vektörüdür. c boşluktaki ışık hızını ifade ederken, $dt^{s,T}$ ve dt_r sembolleri sırasıyla uydu ve alıcı saati gecikmelerini tanımlamaktadır. $d_1^{s,T}$ ve $d_{r,1}^{s,T}$ terimleri ise sırasıyla uydu ve alıcı için kalibre edilmemiş kod

gecikmeleri (UCDs)'ne karşılık gelmektedir. Troposferik zenit ıslak gecikmesi Z_w ile ifade edilirken, $m_r^{s,T}$ sembolü ise uydu yükseklik açısına bağlı ıslak haritalama fonksiyonunu temsil etmektedir. $I_{r,1}^{s,T}$ ve $\lambda_1^{s,T}$ terimleri ise sırasıyla iyonosferik gecikme ve taşıyıcı dalga boyuna karşılık gelmektedir. $N_{r,1}^{s,T}$ ise başlangıç faz belirsizliğine karşılık gelmektedir. Uydu ve alıcı için kalibre edilmemiş faz gecikmeleri (UPDs) sırasıyla $b_1^{s,T}$ ve $b_{r,1}^{s,T}$ sembolleri ile ifade edilirken, $e_{r,1}^{s,T}$ ve $\varepsilon_{r,1}^{s,T}$ terimleri sırasıyla kod ve faz gözlemlerinin gürültülerini temsil etmektedir.

IGS hassas uydu saati ürünleri çift-frekanslı iyonosfer-bağımsız (IF) gözlemlerden yararlanılarak üretildiğinden, hassas uydu saati ürünleri uydu UCD'lerini ve uydu saatinin IF kombinasyonlarını içermektedir. Bu nedenle SF-PPP tekniğinde, alıcı koordinatları elde edilmeden önce gözlem denklemleri (1) ve (2) uydu saati için güncellenmelidir. Bu işlem için SF-PPP tekniğinde Diferansiyel Kod Bias (DCB) ürünleri geleneksel DF-PPP'den farklı olarak kullanılmaktadır.

2.2. Fark alınmamış ve kombine edilmemiş SF-PPP tekniği

UC SF-PPP tekniğinde yer alan alıcı saati gecikmesi, alıcı UCD'lerini absorbe edebilmektedir. Burada, m adet uydunun bir alıcı tarafından sürekli gözlemlendiği dikkate alınırsa denklem (1) ve (2) aşağıdaki şekilde yeniden yazılabilir (Shen ve ark., 2022).

$$\begin{bmatrix} P_{r,1}^{1,T} \\ L_{r,1}^{1,T} \\ \vdots \\ P_{r,1}^{m,T} \\ L_{r,1}^{m,T} \end{bmatrix} = [-u_r \quad \mathbf{1} \quad M_w \quad K \quad R_1] \begin{bmatrix} x \\ d_r^{-T} \\ Z_w \\ I_{r,1}^T \\ N_{r,1}^{-T} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{r,1}^T \\ \varepsilon_{r,1}^T \end{bmatrix}, Q_L \quad (3)$$

Denklem (3)'de yer alan d_r^{-T} ve $N_{r,1}^{-T}$ ifadelerinin karşılıkları aşağıda yer almaktadır;

$$d_r^{-T} = dt_r + d_{r,1}^T \quad (4)$$

$$N_{r,1}^{-T} = \lambda_1^T(N_{r,1}^{s,T} + b_{r,1}^{s,T} - b_1^{s,T}) + d_{IF_{12}}^{s,T} - d_{r,1}^T \quad (5)$$

Denklem (3)'de yer alan alıcı saat parametresi, $2 \times m$ satır ve bir sütuna sahip ve her elemanı bir olan vektör $\mathbf{1}$ ile temsil edilir. Denklem (4)'de yer alan K matrisinde, karşılık gelen $P_{r,1}^{1,T}$ ifadesine karşılık gelen eleman 1'dir. $I_{r,1}^{s,T}$ ise -1 olarak tanımlanır ve $I_{r,1}^T$ parametresine karşılık gelir. R_1 ifadesi ise denklem (5)'i temsil etmektedir. Son olarak, Q_L sembolü gözlemlerin stokastik modelini temsil etmektedir. Daha önce de belirtilen ve UC SF-PPP tekniğinde düzeltilmesi gereken, çift-frekanslı IF gözlemleriyle elde edilen hassas uydu saati parametresini ise $d_{IF_{12}}^{s,T}$ sembolü temsil etmektedir.

Sonuç olarak, UC SF-PPP tekniğinde elde edilen parametrelerin vektörü aşağıdaki gibidir;

$$X_{UC\ SF-PPP} = [d_x \quad d_y \quad d_z \quad d_r^{-T} \quad Z_w \quad I_{r,1}^T \quad N_{r,1}^{-T}] \quad (6)$$

2.3. GRAPHIC yaklaşımına dayalı SF-PPP tekniği

Denklem (1) ve (2)'deki kod ve faz gözlemleri IF SF-PPP yaklaşımında birinci-dereceden iyonosferik gecikmeyi ortadan kaldırmak için doğrusal olarak kombine edilir ve bu işlem sonucunda elde edilen denklemler aşağıdaki gibidir (Yunck, 1993):

$$\frac{(P_{r,1}^s + L_{r,1}^s)/2}{(e_{r,1}^s + \varepsilon_{r,1}^s)/2} = u_r^s \cdot x + c \cdot dt_r + m_r^s \cdot Z_w + N_{r,1}^{\hat{s}} + \quad (7)$$

$$c \cdot dt_r = c \cdot dt_r + c \cdot dt_{r,1} \cdot \frac{1}{2}; N_{r,1}^{\hat{s}} = [\lambda_1^s (N_{r,1}^s + b_{r,1}^s - b_1^s) + c \cdot d_{IF,12}^s]/2 \quad (8)$$

Burada, IF SF-PPP modeli için tahmin edilen parametre vektörü şu şekilde tanımlanabilir:

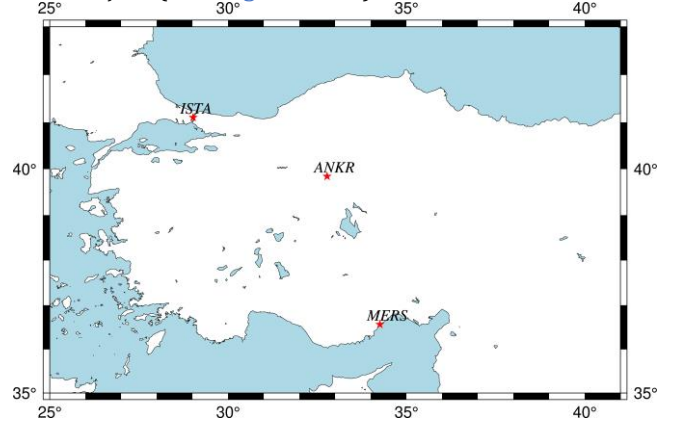
$$X_{IF\text{-}SF\text{-}PPP} = [d_x \ d_y \ d_z \ c \cdot dt_r \ Z_w \ N_{r,1}^{\hat{s}}] \quad (9)$$

2.4. Deney tasarımı

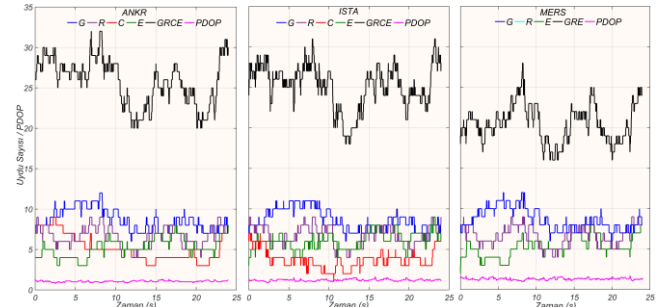
Tek-frekanslı GNSS gözlemlerini değerlendirebilme yeteneğine sahip açık kaynak kodlu yazılımların statik moddaki konum belirleme yeteneklerinin incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen deneylerin tasarımı çalışmanın bu bölümünde okuyucu ile paylaşmaktadır. Çalışma kapsamında, Türkiye'de konumlanan ISTA, ANKR ve MERS olmak üzere üç farklı IGS istasyonundan elde edilen, 2019 DOY 2 ile 2019 DOY 8 arasındaki 7 günlük (bir haftalık) gözlemler GAMP, PPPLib ve SUPREME yazılımları ile statik modda 30 saniye örneklem aralığı ile değerlendirilmiştir. Burada DOY ifadesinin ilgili yıl için değerlendirilen gözlem gününü temsil ettiğini ifade etmek gerekmektedir. Örneğin, 2019 DOY 2 ile ifade edilmek istenen 2019 yılının ikinci gözlem günüdür. ISTA ve ANKR istasyonundan elde edilen gözlemler GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou gözlemlerini içerirken, MERS istasyonundan elde edilen gözlemlerin ilgili gözlem günleri için GPS, GLONASS ve Galileo uydu takımyıldızlarını içerdiği belirtilmelidir. Burada ISTA ve ANKR istasyonlarında BeiDou-2 uydularının gözlemlendiği de belirtilmelidir. MERS istasyonunda BeiDou takımyıldızlarından gözlem toplanamaması durumu çalışmanın amacını etkilememiş, söz konusu yazılımlar eşit şartlar altında değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan IGS istasyonlarının coğrafi dağılımları ise Şekil 1'de ifade edilmiştir. Şekil 2 ise 2019 DOY 4'te çalışmada değerlendirilen üç istasyondan epok başına gözlemlenen uydu sayılarını ve PDOP değerlerini görselleştirmektedir. GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou uydu takımyıldızları için gözlenen ortalama uydu sayıları ANKR istasyonu için 12, 9, 8 ve 9 olmakla birlikte, bu değerler ISTA istasyonu için 11, 9, 9 ve 7'dir. MERS istasyonundan gözlemlenen ortalama GPS, GLONASS ve Galileo sayıları ise sırasıyla 12, 9 ve 8'dir. Dörtlü kombinasyon için ANKR, ISTA ve MERS istasyonlarının ortalama PDOP değeri ise sırasıyla 1.3, 1.6 ve 1.7'dir. Son olarak, söz konusu üç istasyondan gözlemlenen ortalama uydu sayıları ise 32, 31 ve 28'dir.

Daha önce de ifade edildiği gibi, bu çalışmada temelde UC SF-PPP tekniği ile GNSS kullanıcılarına SF-PPP çözümleri elde etmeye olanak sağlayan GAMP ve SUPREME yazılımları ile, IF SF-PPP algoritmasından faydalanan PPPLib yazılımı kullanılmıştır. İlgili

yazılımlarda tercih edilen değerlendirme parametreleri ise Tablo 1'de belirtilmiştir. Ayrıca bu çalışmada BeiDou GEO uydularının zayıf saat ve yörünge ürünlerine sahip olduğu dikkate alınarak, GPS, GLONASS ve Galileo sistemlerinin ağırlıkları eşit kabul edilirken, BeiDou takımyıldızının ağırlığı diğerlerine göre on kat daha az tutulmuştur (Beziçioğlu, 2023b).



Şekil 1. Çalışmada kullanılan IGS istasyonlarının konumları.



Şekil 2. ANKR, ISTA ve MERS istasyonlarından üçüncü günde epok başına gözlemlenen uydu sayıları ve PDOP değerleri.

3. Bulgular

UC SF-PPP ve IF SF-PPP yaklaşımlarını kullanarak GNSS kullanıcılarına tek-frekanslı GNSS alıcıları ile konum belirleme imkânı sağlayan GAMP, PPPLib ve SUPREME yazılımlarının statik moddaki konum belirleme performansları bu başlıkta değerlendirilmiştir. Çalışmanın amacı doğrultusunda bölüm 2.4'te ifade edilen deney tasarımı gerçekleştirilmiş ve önceki bölümlerde de ifade edildiği gibi ANKR, ISTA ve MERS istasyonlarından elde edilen 7 günlük gözlemler üç farklı yazılım ile SF-PPP tekniği kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen çözümler ise IGS haftalık çözümler referans olarak analiz edilmiştir. Burada gerçekleştirilen tüm analizlerin yakınsama süresi dikkate alınmıştır. Tablo 2, bu çalışmada kullanılan tüm istasyonlardan farklı yazılımlar dikkate alınarak elde edilen SF-PPP çözümlerinin yakınsama sürelerini içermektedir. Bu çalışmada yakınsama süresi 3 Boyutlu (3B) konum hatasının ardışık 10 dakika boyunca sırasıyla 0,5 m'nin altında kaldığı an olarak belirlenmiştir (Cai ve ark., 2017). Tablodan, tüm gözlem günleri dikkate alındığında GAMP, PPPLib ve SUPREME yazılımlarından elde edilen ortalama yakınsama sürelerinin sırasıyla 27, 190 ve 36 dakika olduğu görülebilir. Bu sonuçlar, Cai ve ark., (2017) ve Li ve ark., (2016)'da da ifade edildiği gibi,

GRAPHIC yaklaşımının oldukça uzun yakınsama süresine ihtiyaç duyduğunu doğrulamaktadır. Buna ek olarak, temelde aynı SF-PPP yaklaşımını kullanmasına rağmen GAMP yazılımının sağladığı yakınsama süresi küçük farklar ile SUPREME yazılımından daha kısadır. Üç yazılımın sağladığı ortalama yakınsama süreleri kıyaslandığında ise GAMP yazılımı PPPLib yazılımından yaklaşık olarak %86 oranında daha kısa yakınsama süresi sağlarken, SUPREME yazılımından %24 oranında daha kısa yakınsama süresi sağlamıştır.

GAMP, PPPLib ve SUPREME yazılımlarının statik moddaki konum belirleme performanslarını incelemek amacıyla temsili bir durum olarak MERS istasyonundan DOY 5'te elde edilen sağa, yukarı ve h bileşenindeki zaman serileri elde edilmiş ve Şekil 3'te ifade edilmiştir. Şekilden, her üç bileşen için GAMP ve SUPREME yazılımlarından elde edilen zaman serilerinin birbirleri ile tutarlı olduğu görülmektedir. Ayrıca, PPPLib yazılımından elde edilen zaman serilerinin diğer yazılımlara kıyasla daha geç yakınsadığı ve kısmen daha düşük doğruluk sağladığı açıktır. Burada, ilgili şekilde ifade edilen Karesel Ortalama Hata (KOH) değerlerinin yakınsama anından sonra elde edilen koordinatlar ile değerlendirilen istasyonların karşılık gelen IGS haftalık çözümleri arasındaki farklar dikkate alınarak elde edildiğini belirtmekte fayda vardır. Ek olarak, şekilden GAMP, PPPLib ve SUPREME yazılımlarının sırasıyla 6.7 cm, 20.3 cm ve 7.9 cm'lik 3B konum doğruluğu sağladığı açıktır. Bu sonuçlar UC SF-PPP tekniğinin IF SF-PPP tekniğine göre daha yüksek konum doğruluğu sağladığını ifade etmektedir.

Yedi ardışık gün boyunca, farklı açık kaynak kodlu yazılımlar kullanılarak SF-PPP tekniği ile değerlendirilen tüm istasyonlardan elde edilen Sağa, Yukarı ve h bileşenlerindeki hata dağılımları Şekil 4'te sunulmuştur. Burada, ilgili şekilde ifade edilen hata değerlerinin yakınsama anından sonra elde edilen koordinatlar ile değerlendirilen istasyonların karşılık gelen IGS haftalık çözümleri arasındaki farklar dikkate alınarak elde edildiğinin altını çizmek gerekmektedir. Tüm gözlem günleri için elde edilen histogramların Gauss hata dağılımını takip ettiği açıktır. GAMP ve SUPREME yazılımları için Sağa, Yukarı ve h bileşenlerden elde edilen hataların yaklaşık olarak 0 civarında kümelendiği açıktır. PPPLib yazılımından elde edilen hataların ortalama değeri ise sırasıyla 13.7 cm, -2.6 cm ve 12.6 cm'dir. Ayrıca, tüm yazılımlar için h bileşenindeki hataların yatay yöndeki hatalardan daha büyük olduğu da belirtilmelidir. Bu sonuçlar konum doğruluğu açısından UC SF-PPP tekniğinin IF SF-PPP tekniğinden daha başarılı olduğunu açıkça ifade ederken, GAMP yazılımının diğerlerine kıyasla daha başarılı olduğunu da ortaya koymaktadır.

GAMP, PPPLib ve SUPREME yazılımlarının statik moddaki konum belirleme yeteneklerini incelemek amacıyla tüm gözlem günlerinden elde edilen yatay (2B) ve h bileşenlerindeki ortalama standart sapma (STD) ve KOH değerleri Şekil 5'te görselleştirilmiştir. Burada, ilgili yazılımların sağladığı konum doğruluğunu istatistiki olarak sunan KOH ve tekrar edilebilirliği ifade eden STD değerlerinin elde edilmiş şeklini hatırlatmak gerekmektedir. KOH değerleri gerçek hatalardan elde edilirken, STD değerleri görünen hatalardan elde

edilmiştir. Gerçek hatalar hesaplanırken yukarıda da bahsedildiği üzere IGS haftalık çözümleri referans alınırken, görünen hatalar elde edilirken ilgili gözlem gününde söz konusu yazılımlar ile yakınsama sonrası elde edilen tüm epoklardaki koordinat değerlerinin ortalaması dikkate alınmıştır. İlgili şekilde, PPPLib yazılımının GAMP ve SUPREME yazılımlarına kıyasla daha yüksek tekrar edilebilirlik ve doğruluk sağladığı açıkça görülmektedir. GAMP yazılımı yatay bileşenler için ortalama 4.1 cm'lik tekrar edilebilirlik sağarken, ortalama olarak 4.9 cm değerinde bir doğruluk sağlamaktadır. PPPLib yazılımı yatay bileşenler için ortalama 13.5 cm ve 24.3 cm'lik tekrar edilebilirlik ve doğruluk değeri sunmaktadır. SUPREME içinse bu değerler sırasıyla 5.2 cm ve 6.8 cm'dir. GAMP, PPPLib ve SUPREME yazılımlarından h bileşeni için elde edilen ortalama tekrar edilebilirlik değeri sırasıyla 4.7 cm, 14.2 cm ve 5.4 cm iken, KOH değerleri için bu değerler 6.8 cm, 30.8 cm ve 8.4 cm'dir. Bu sonuçlar UC SF-PPP tekniğinin GRAPHIC yaklaşımına olan üstünlüğünü bir kez daha vurgularken, bu katkıda değerlendiren üç yaklaşım göz önüne alındığında GAMP yazılımının diğerlerine olan üstünlüğünü de açıkça ortaya koymaktadır.

GAMP, PPPLib ve SUPREME yazılımlarının statik moddaki konum belirleme yeteneklerini daha da derinlemesine incelemek ve okuyucuya amacıyla tüm gözlem günlerinden elde edilen 3B ortalama STD ve KOH değerleri Şekil 6'da ifade edilmektedir. Şekilden GAMP yazılımının ANKR, ISTA ve MERS istasyonu için sırasıyla 6.4 cm, 6.3 cm ve 6.0 cm'lik tekrar edilebilirlik değeri sağladığı ve kendi içinde oldukça tutarlı olduğu görülmektedir. PPPLib yazılımı için bu değerler 22.6 cm, 17.5 cm ve 19.3 cm olmakla birlikte, SUPREME için ilgili istasyonlardan elde edilen tekrar edilebilirlik değerleri sırasıyla 10.7 cm, 6.0 cm ve 5.9 cm'dir. Bu sonuçlar GAMP yazılımının diğerlerine kıyasla kısmen daha tutarlı olduğunu belirtmektedir. Ek olarak, KOH değerleri göz önüne alındığında GAMP yazılımı ANKR, ISTA ve MERS istasyonlarından ortalama olarak 8.4 cm'lik bir doğruluk elde ederken, PPPLib ve SUPREME yazılımları sırasıyla 39.6 cm ve 10.9 cm'lik doğruluk sunmaktadır. Bu sonuçlar GAMP yazılımının PPPLib yazılımından %78.6 oranında daha doğru sonuç sağladığını ifade ederken, SUPREME yazılımından %22 oranında daha doğru sonuç sağladığını öne sürmektedir. Ayrıca, yazılımların kullandığı algoritmalar değerlendirilirse ve GAMP ve SUPREME yazılımlarından elde edilen doğrulukların ortalaması UC SF-PPP tekniğinin doğruluğu gibi düşünülürse, UC SF-PPP tekniği 8.2 cm'lik doğruluk sağlarken, GRAPHIC yaklaşımına kıyasla %79.3 oranında daha doğru konum bilgisi sunmuştur. Bu sonuçlar, UC SF-PPP tekniğinin GRAPHIC tabanlı SF-PPP yaklaşımına göre daha doğru ve tutarlı sonuç sağladığını açıkça ifade etmektedir. Bu durum, UC SF-PPP ile GRAPHIC yaklaşımlarının iyonosferik gecikmeyi ele alış biçimleri ile doğrudan ilişkilidir. Önceki bölümlerde ve özellikle denklem (7)'de de belirtildiği üzere GRAPHIC yaklaşımı kod ve faz gözlemlerinin doğrusal bir kombinasyonunu kullanmaktadır. Dolayısıyla kod gözlemlerinin gürültüsü faz gözlemiyle eşit kabul edildiği, yani, kod gözleminin sahip olduğu yüksek gürültü doğrudan doğruya sonuçlara yansdığı için UC SF-PPP yaklaşımı GRAPHIC tekniğine göre daha doğru konum doğruluğu ve tutarlı

tekrar edilebilirlik değerleri sağlamaktadır. Dolayısıyla, elde edilen bulgular, GAMP, PPPLib ve SUPREME yazılımları arasında PPPLib yazılımının diğerlerine kıyasla daha düşük tekrar edilebilirlik ve doğruluk

sağladığını, GAMP yazılımının ise mm mertebesindeki farklarla SUPREME yazılımından daha doğru ve tutarlı sonuç sağladığını açıkça vurgulamaktadır.

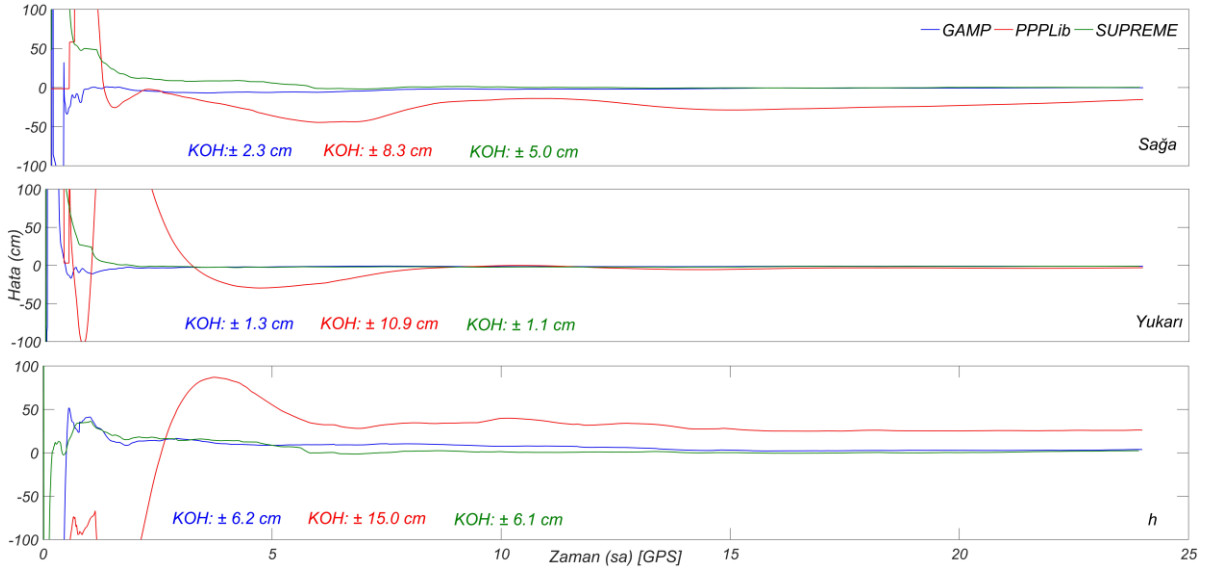
Tablo 1. GAMP, PPPLib ve SUPREME yazılımları için tercih edilen değerlendirme parametreleri.

Çözüm Parametreleri	GAMP	PPPLib	SUPREME
Gözlemler	GPS L1; GLONASS R1; GALILEO E1; BeiDou B1	GPS L1; GLONASS R1; GALILEO E1; BeiDou B1	GPS L1; GLONASS R1; GALILEO E1; BeiDou B1
Fonksiyonel Model	UC SF-PPP	IF SF-PPP	UC SF-PPP
Dengeleme Modeli	Kalman	Kalman	En Küçük Kareler (Least-Squares (LSQ))
Yükseklik Açısı	7°	7°	7°
Örneklem Aralığı	30 sn	30 sn	30 sn
Konumlama Modu	Statik	Statik	Statik
Troposferik Gecikme	Tahmini ZTD* ve Yatay Yöndeki Gradyent (Horizontal Gradient) Parametreleri	Saastamoinen model (Saastamoinen, 1972)+ Rasgele Yürüyüş (Random Walk) + GMF* (Boehm ve ark., 2006)	Tahmini ZTD* + Rasgele Yürüyüş
İyonosferik Gecikme	Tahmini Görüş Hattındaki İyonosferik Gecikme (Line-Of-Sight (LOS) Ionospheric Delay)	GRAPHIC Kombinasyonu ile Elemine Edildi	Tahmini Önyargılı Eğik İyonosferik Gecikme (Biased Slant Ionospheric Delay)
Anten Faz Merkezi Değişimi ve Hatası	Düzeltildi (Kouba, 2015)	Düzeltildi (Kouba, 2015)	Düzeltildi (Kouba, 2015)
Gelgit Etkileri	Düzeltildi (Kouba, 2015)	Düzeltildi (Kouba, 2015)	Düzeltildi (Kouba, 2015)
Uydu Kod Gözlemi Gecikmesi	CODE* Ürünleri ile Düzeltildi	CODE* Ürünleri ile Düzeltildi	CODE* Ürünleri ile Düzeltildi
Sagnac Etkisi, Görelilik Etkisi, Faz Salınım Etkisi	Düzeltildi (Kouba, 2015; Wu ve ark., 1993)	Düzeltildi (Kouba, 2015; Wu ve ark., 1993)	Düzeltildi (Kouba, 2015; Wu ve ark., 1993)
Uydu Yörünge ve Saat Ürünleri	GFZ* Nihahi (Final) Ürünleri	GFZ* Nihahi Ürünleri	GFZ* Nihahi Ürünleri
Gözlemler için Standart Sapma Değerleri	Kod için 0.3 m; Faz için 0.003 m	Kod için 0.3 m; Faz için 0.003 m	Kod için 0.3 m; Faz için 0.003 m

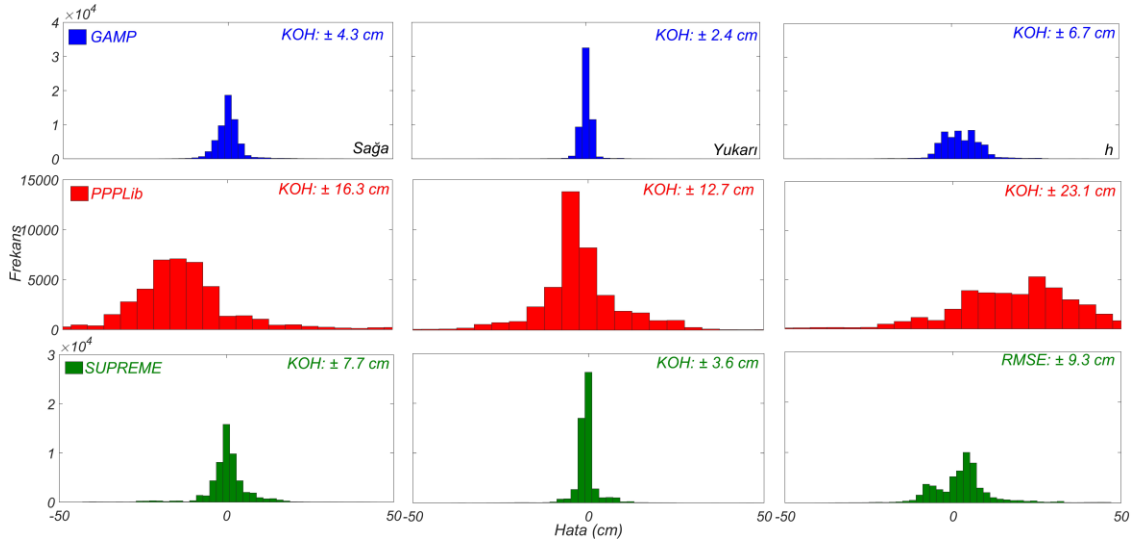
ZTD: Zenith Troposferik Gecikmesi (Zenith Tropospheric Delay); GMF: Küresel İzdüşüm Fonksiyon (Global Mapping Function), CODE: Avrupa Yörünge Belirleme Merkezi (Center for Orbit Determination in Europe); GFZ: Almanya Yer Bilimleri Araştırma Merkezi (German Research Centre for Geosciences)

Tablo 2. GAMP, PPPLib ve SUPREME yazılımları için değerlendirilen tüm istasyon ve günlerdeki dakika birimindeki yakınsama süreleri.

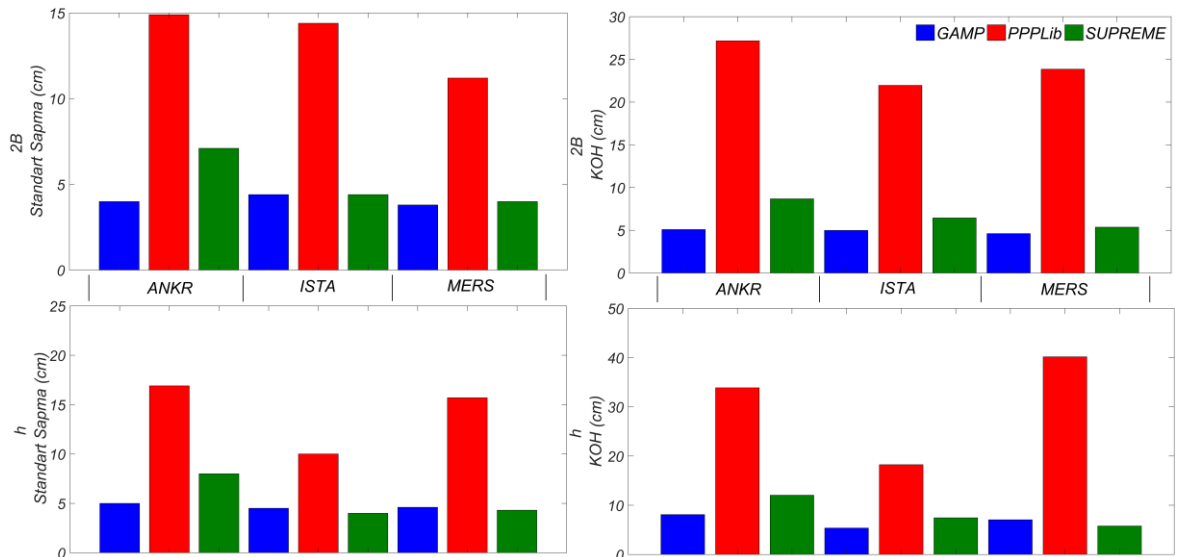
DOY	GAMP			PPPLib			SUPREME		
	ANKR	ISTA	MERS	ANKR	ISTA	MERS	ANKR	ISTA	MERS
2	20	27	23	174	415	213	20	26	34
3	27	38	56	49	119	185	18	46	46
4	18	16	48	119	110	253	49	42	61
5	6	45	23	314	93	75	22	39	49
6	8	32	38	87	113	257	25	47	42
7	8	18	34	123	133	174	6	37	48
8	22	34	33	555	159	276	14	33	54



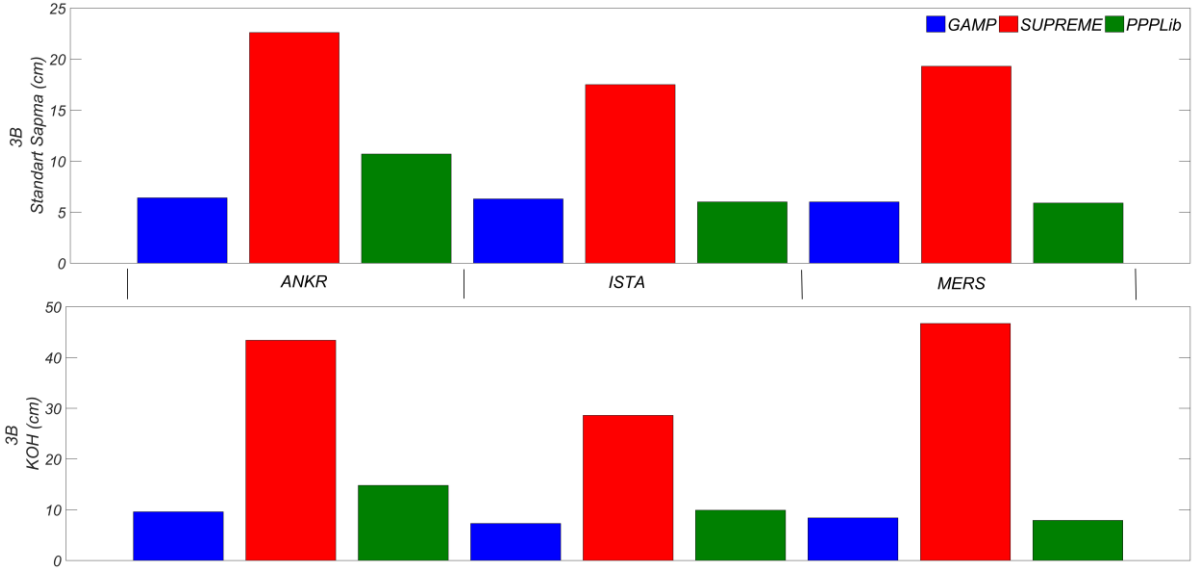
Şekil 3. 2019 DOY 5 için MERS istasyonundan elde edilen zaman serileri ve KOH değerleri.



Şekil 4. Farklı yazılımlar ile değerlendirilen istasyonlardan tüm günler için elde edilen SF-PPP sonuçlarının hata dağılımları.



Şekil 5. Farklı yazılımlar ile değerlendirilen istasyonlardan elde edilen SF-PPP sonuçlarının yatay ve düşey bileşenlerdeki ortalama STD ve KOH değerleri.



Şekil 6. Farklı yazılımlar ile değerlendirilen istasyonlardan elde edilen SF-PPP sonuçlarının üç boyutlu ortalama STD ve KOH değerleri.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada UC SF-PPP ve IF SF-PPP (GRAPHIC) yaklaşımlarına dayanarak GNSS kullanıcılarına tek-frekanslı hassas nokta konum belirleme çözümü imkânı sağlayan açık kaynak kodlu GAMP, PPPLib ve SUPREME yazılımlarının statik moddaki konum belirleme yetenekleri değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, ANKR, ISTA ve MERS istasyonlarından elde edilen bir haftalık gözlemler ilgili yazılımlar ile çoklu-GNSS gözlemlerinden yararlanılarak değerlendirilmiş ve sonuçlar IGS haftalık verileri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ise yakınsama, tekrar edilebilirlik ve doğruluk bakımından incelenmiştir. Elde edilen bulgular, tüm gözlem günleri dikkate alındığında GAMP yazılımının PPPLib ve SUPREME yazılımlarından sırasıyla %85.7 ve %24.4 oranlarında daha erken yakınsadığını göstermektedir. Buna ek olarak, GAMP yazılımından elde edilen sonuçlar 30 dakikanın altında bir sürede yakınsadığı da ayrıca belirtilmelidir. GAMP, PPPLib ve SUPREME yazılımlarından tüm istasyonlar ve tüm gözlem günleri için elde edilen ortalama STD değerleri ise sırasıyla 6.2, 19.8 cm ve 7.5 cm'dir. Bu sonuçlar GAMP ve SUPREME yazılımlarının benzer tekrar edilebilirlik değeri sağladığını ancak küçük bir farkla GAMP yazılımının daha güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır. İlave olarak, GAMP, PPPLib ve SUPREME yazılımlarından tüm istasyonlar ve tüm gözlem günleri için elde edilen ortalama KOH değerleri ise sırasıyla 8.4 cm, 39.6 cm ve 10.9 cm'dir. Bu sonuçlar GAMP yazılımının diğerlerine kıyasla daha başarılı olduğunu açıkça vurgulamaktadır. Ayrıca, GAMP ve SUPREME yazılımlarından elde edilen değerlerin ortalaması UC SF-PPP tekniğinin değeri olduğu göz önüne alınır, UC SF-PPP tekniği GRAPHIC yaklaşımından %83.4 oranında daha erken yakınsarken, %65.3 oranında daha hassas tekrar edilebilirlik değeri sunmaktadır. Buna ek olarak UC SF-PPP ve GRAPHIC yaklaşımlarından elde edilen doğruluk değerleri göz önüne alınır, UC SF-PPP tekniği GRAPHIC yaklaşımından %79.4 oranında daha doğru sonuç vermektedir. Çalışmada elde edilen tüm sonuçlar dikkate alındığında, GAMP ve SUPREME yazılımlarının

kullanıcılarına cm mertebesinde doğruluk sağladığı açıkça görülmekte ve GAMP yazılımının diğerlerine kıyasla en hassas sonucu sağladığı açıktır. Bulgular, IF SF-PPP tekniğini kullanan PPPLib yazılımının yüksek doğruluk gerektiren jeodezik uygulamalarda kullanılamayacağını da açıkça göstermektedir. Son olarak, GAMP yazılımının sağladığı hassasiyet dikkate alınır, ilgili yazılımın çeşitli jeodezik uygulamalarda başarılı bir şekilde kullanılabilirliği açıktır.

Bilgilendirme/Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan Uluslararası GNSS Servisi istasyonlarını ve ürünlerini GNSS topluluğuna sağladığı için Uluslararası GNSS Servisine, analizlerde kullanılan açık kaynak kodlu GAMP, PPPLib ve SUPREME yazılımlarının geliştiricilerine teşekkür ederim.

Araştırmacıların katkı oranı

Mert Bezciöglü: Lüteratür Taraması, Veri Toplama, Kavramsallaştırma, Metodoloji, Modelleme ve Analiz, Görselleştirme ve Doğrulama, Yazım ve Düzenleme

Çatışma Beyanı

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynakça

- Alçay, S., & Atiz, Ö. (2021). Farklı Yazılımlar Kullanılarak Gerçek Zamanlı Hassas Nokta Konum Belirleme (RT-PPP) Yönteminin Performansının İncelenmesi. *Geomatik*, 6(1), 77-83. <https://doi.org/10.29128/geomatik.687709>.
- Alçay, S., Yiğit, C. Ö., & Ceylan, A. (2013). CSRS-PPP, MagicGNSS ve APPS Web Tabanlı Yazılımların Statik PPP Modüllerinin Karşılaştırılması. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5(1), 1-12.
- Bahadır, B. (2022). An improved weighting strategy for tropospheric delay estimation with real-time single-frequency precise positioning. *Earth Science*

- Informatics, 15(2), 1267–1284. <https://doi.org/10.1007/s12145-022-00814-7>.
- Bahadur, B., & Nohutcu, M. (2018). 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>.
- Bahadur, B., & Üstün, A. (2014). İnternet Tabanlı GNSS Veri Değerlendirme Servisleri. *Harita Dergisi*, 152(2), 40–50.
- Bezcioglu, M. (2023a). Düşük Maliyetli GNSS Gözlemlerine Dayalı Gerçek-Zamanlı Hassas Nokta Konum Belirleme (RT-PPP) Tekniğinin Performansının Değerlendirilmesi ve Çoklu-GNSS Gözlemlerinin Katkısı. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(4), 1341–1350. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1310577>.
- Bezcioglu, M. (2023b). An investigation of the contribution of multi-GNSS observations to the single-frequency precise point positioning method and validation of the global ionospheric maps provided by different IACs. *Earth Science Informatics*, 16(3), 2511–2528. <https://doi.org/10.1007/s12145-023-01058-9>.
- Bezcioglu, M., Ucar, T., & Yigit, C. O. (2023). Investigation of the capability of multi-GNSS PPP-AR method in detecting permanent displacements. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 8(3), 251–261. <https://doi.org/10.26833/ijeg.1140959>.
- Bezcioglu, M., Yigit, C. O., Dindar, A. A., El-Mowafy, A., & Wang, K. (2024). High-rate Single-Frequency Precise Point Positioning (SF-PPP) in the detection of structural displacements and ground motions. *Structural Engineering and Mechanics*, 89(6), 589–599. <https://doi.org/10.12989/sem.2024.89.6.589>.
- Bilgen, B., Bulbul, S., & Inal, C. (2022). Statistical Comparison on Accuracies of Web-Based Online PPP Services. *Journal of Surveying Engineering*, 148(4). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)su.1943-5428.0000403](https://doi.org/10.1061/(asce)su.1943-5428.0000403).
- Birinci, S., Soğukkuyu, F., Sözen, N., İkiz, M., Kerimoğlu, M. E., & Saka, M. H. (2024). Düşük Maliyetli GNSS Alıcılarının Çoklu-GNSS PPP Performanslarının Farklı Anten Tipleri ve Ağırlık Modellerine Göre Araştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(2), 360–373.
- Boehm, J., Niell, A., Tregoning, P., & Schuh, H. (2006). Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophysical Research Letters*, 33(7), 3–6. <https://doi.org/10.1029/2005GL025546>.
- Cai, C., Gong, Y., Gao, Y., & Kuang, C. (2017). An approach to speed up single-frequency PPP convergence with quad-constellation GNSS and GIM. *Sensors (Switzerland)*, 17(6). <https://doi.org/10.3390/s17061302>.
- Cai, C., Liu, Z., & Luo, X. (2013). Single-frequency Ionosphere-free Precise Point Positioning Using Combined GPS and GLONASS Observations. *Journal of Navigation*, 66(03), 417–434. <https://doi.org/10.1017/S0373463313000039>.
- Chen, C., & Chang, G. (2021). PPLib: An open-source software for precise point positioning using GPS, BeiDou, Galileo, GLONASS, and QZSS with multi-frequency observations. *GPS Solutions*, 25(1), 1–7. <https://doi.org/10.1007/s10291-020-01052-4>.
- de Bakker, P. F., & Tiberius, C. C. J. M. (2017). Real-time multi-GNSS single-frequency precise point positioning. *GPS Solutions*, 21(4), 1791–1803. <https://doi.org/10.1007/s10291-017-0653-2>.
- Erdem, N., & Demirel, A. (2022). The Current State of Use of Satellite-Based Positioning Systems in Turkey. *Advanced Geomatics*, 2(1), 23–29.
- Hong, J., Tu, R., Zhang, R., Fan, L., Han, J., Zhang, P., & Lu, X. (2021). Analysis of dual-frequency solution method for single-frequency precise point positioning based on SEID model for GPS and BDS. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 175(January), 109102. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109102>.
- İnyurt, S., & Ulukavak, M. (2020). Web tabanlı GNSS Yazılımlarının (CSRS-PPP, Trimble-RTX) Performansının Araştırılması. *Geomatik*, 5(2), 120–126. <https://doi.org/10.29128/geomatik.586990>.
- Kalita, S., & Chetia, B. (2020). A Novel Approach for Ionospheric Total Electron Content Earthquake Precursor and Epicenter Detection for Low-Latitude. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 5(2), 94–99. <https://doi.org/10.26833/ijeg.614856>.
- Konukseven, C., Öğütçü, S., & Alçay, S. (2022). GNSS Frequency Availability Analysis. *Advanced Geomatics*, 2(1), 14–16. <https://doi.org/10.31127/tuje.870620>.
- Kouba, J. (2015). A guide to using international GNSS service (IGS) products. https://files.igs.org/pub/resource/pubs/UsingIGSPProductsVer21_cor.pdf Accessed date: 29 Aralık 2023.
- Kouba, J., & Héroux, P. (2001). Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. *GPS Solutions*, 5(2), 12–28. <https://doi.org/10.1007/PL00012883>.
- Li, L., Jia, C., Zhao, L., Cheng, J., Liu, J., & Ding, J. (2016). Real-time single frequency precise point positioning using SBAS corrections. *Sensors (Switzerland)*, 16(8). <https://doi.org/10.3390/s16081261>.
- Malys, S., & Jensen, P. A. (1990). Geodetic point positioning with GPS carrier beat phase data from the CASA UNO Experiment. *Geophysical Research Letters*, 17(5), 651–654. <https://doi.org/10.1029/GL017i005p00651>.
- Mou, Y., Luo, X., Xie, Z., & Peng, X. (2023). Performance analysis of four PPP service software under different intensity geomagnetic storms. *Advances in Space Research*, 72(5), 1593–1604. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.04.026>.
- Ogutcu, S. (2020a). Performance Analysis of Ambiguity Resolution on Ppp and Relative Positioning Techniques: Consideration of Satellite Geometry. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 5(2), 73–93. <https://doi.org/10.26833/ijeg.580027>.
- Ogutcu, S. (2020b). Performance Assessment of Igs Combined/Jpl Individual Rapid and Ultra-Rapid Products: Consideration of Precise Point Positioning Technique. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 5(1), 1–14. <https://doi.org/10.26833/ijeg.577385>.

- Ogutcu, S., Shakor, A. Q., & Farhan, H. T. (2022). Investigating the effect of observation interval on GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou static PPP. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 7(3), 294–301. <https://doi.org/10.26833/ijeg.980148>.
- Özdemir, E. G. (2022). Bağlı ve mutlak (PPP) konum çözüm yaklaşımı sunan Web-Tabanlı çevrimiçi veri değerlendirme servislerinin farklı gözlem periyotlarındaki performanslarının araştırılması. *Geomatik*, 7(1), 41–51. <https://doi.org/10.29128/geomatik.809826>.
- Pırtı, A., & Yazıcı, D. (2022). İnternet tabanlı GNSS yazılımlarının doğruluk açısından değerlendirilmesi. *Geomatik*, 7(2), 88–105. <https://doi.org/10.29128/geomatik.882843>.
- Saastamoinen, J. (1972). Contributions to the theory of atmospheric refraction. *Bulletin Géodésique*, 105, 279–298. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF02521844>.
- Shen, H., Li, S., Li, L., Zhang, W., Tian, Y., Hao, W., & Li, R. (2022). Evaluation of ionospheric-constrained single-frequency PPP enhanced with an improved stochastic model. *Earth Science Informatics*, 15(3), 1671–1681. <https://doi.org/10.1007/s12145-022-00827-2>.
- Şimşek, M., Özarpacı, S., & Doğan, U. (2019). Yer Kabuğu Hareketlerinin Belirlenmesinde Web Tabanlı Çevrimiçi GNSS Servislerinin Performans Analizi. *Geomatik*, 4(2), 147–159. <https://doi.org/10.29128/geomatik.511758>.
- Sterle, O., Stopar, B., & Pavlovčič Prešeren, P. (2015). Single-frequency precise point positioning: an analytical approach. *Journal of Geodesy*, 89(8), 793–810. <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0816-2>.
- Takasu, T., & Yasuda, A. (2009). Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB. *International Symposium on GPS/GNSS*, 4–6.
- Vázquez-Ontiveros, J. R., Padilla-Velazco, J., Gaxiola-Camacho, J. R., & Vázquez-Becerra, G. E. (2023). Evaluation and Analysis of the Accuracy of Open-Source Software and Online Services for PPP Processing in Static Mode. *Remote Sensing*, 15(8), 1–20. <https://doi.org/10.3390/rs15082034>.
- Wu, J. T., Wu, S. C., Hajj, G. A., Bertiger, W. I., & Lichten, S. M. (1993). Effects of antenna orientation on GPS carrier phase. *Manuscripta Geodaetica*, 18(2), 91–98.
- Yunck, T. P. (1993). Coping with the Atmosphere and Ionosphere in Precise Satellite and Ground Positioning. *Geophysical Monograph*, 73(13), 1–16. <https://doi.org/10.1029/gm073p0001>.
- Zhang, B., Teunissen, P. J. G., Yuan, Y., Zhang, H., & Li, M. (2018). Joint estimation of vertical total electron content (VTEC) and satellite differential code biases (SDCBs) using low-cost receivers. *Journal of Geodesy*, 92(4), 401–413. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1071-5>.
- Zhang, Y., Chen, J., Gong, X., & Chen, Q. (2020). The update of BDS-2 TGD and its impact on positioning. *Advances in Space Research*, 65(11), 2645–2661. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.011>.
- Zhao, C., Zhang, B., & Zhang, X. (2021). SUPREME: an open-source single-frequency uncombined precise point positioning software. *GPS Solutions*, 25(3), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01131-0>.
- Zheng, K., Zhang, X., Li, X., Li, P., Sang, J., Ma, T., & Schuh, H. (2019). Capturing coseismic displacement in real time with mixed single- and dual-frequency receivers: application to the 2018 Mw7.9 Alaska earthquake. *GPS Solutions*, 23(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0794-y>.
- Zhou, F., Dong, D., Ge, M., Li, P., Wickert, J., & Schuh, H. (2018). Simultaneous estimation of GLONASS pseudorange inter-frequency biases in precise point positioning using undifferenced and uncombined observations. *GPS Solutions*, 22(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10291-017-0685-7>.
- Zhou, F., Dong, D., Li, W., Jiang, X., Wickert, J., & Schuh, H. (2018). GAMP: An open-source software of multi-GNSS precise point positioning using undifferenced and uncombined observations. *GPS Solutions*, 22(2), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0699-9>.
- Zhu, S., Yue, D., He, L., Chen, J., & Liu, Z. (2021). Comparative analysis of four different single-frequency PPP models on positioning performance and atmosphere delay retrieval. *Advances in Space Research*, 67(12), 3994–4010. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.02.026>.
- Zhu, S., Yue, D., He, L., Liu, Z., & Chen, J. (2020). A formal dynamic stochastic model for single-frequency precise point positioning constrained by global ionosphere map. *Measurement Science and Technology*, 32(3). <https://doi.org/10.1088/1361-6501/abc453>.
- 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>.

