

## Küresel BeiDou Sistemi (BDS-3) için hassas nokta konumlama performansının değerlendirilmesi

Berkay Bahadır<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Çankaya, Ankara, Türkiye.

**Öz:** Bu çalışmanın temel amacı küresel BeiDou sisteminin (BDS-3) Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning, PPP) açısından konum belirleme performansının değerlendirilmesidir. BDS-3'ün PPP performansı hem GPS hem de bölgesel BeiDou sistemi (BDS-2) ile kıyaslanarak karşılaştırılmıştır. İlave olarak bu üç sistemin çoklu GNSS kombinasyonları aracılığıyla BDS-3'ün PPP konum belirleme performansına olan katkısı da analiz edilmiştir. Bu amaçla toplamda yedi farklı PPP işleme senaryosu oluşturulmuş ve 21-30 Kasım 2021 tarihleri arasında 15 Uluslararası GNSS Servisi (International GNSS Service, IGS) istasyonunda toplanan veriler bu senaryolar altında işlenmiştir. Sonuçlar GPS, BDS-2 ve BDS-3 PPP çözümlerinden sırasıyla 0.0152, 0.0605 ve 0.0203 m konum doğruluğu elde edilebileceğini göstermiştir. Ayrıca bu çözümlerden elde edilen ortalama yakınsama süreleri de sırasıyla 60.94, 261.71 ve 63.06 dakika olarak hesaplanmıştır. BDS-2 PPP çözümünün sonuçları GPS sonuçlarının bir hayli gerisinde kalırken BDS-3 PPP'den GPS PPP ile karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmiştir. Diğer taraftan elde edilen sonuçlar bu sistemlerin ikili ve üçlü kombinasyonlarının kullanılması durumunda konum belirleme performansının önemli oranda iyileştirilebileceğini ortaya koymuştur. GPS, BDS-2 ve BDS-3 sistemlerinin ortak kullanıldığı PPP çözümünden elde edilen konum doğruluğu ve yakınsama süresi 0.0136 m ve 26.45 dakikadır. Bu çalışmada PPP performansını analiz edebilmek için ayrıca troposferik gecikme kestirimleri de değerlendirilmiştir. Sonuçlar BDS-3 PPP çözümünün troposferik gecikme kestirimi açısından GPS PPP çözümüne yakın sonuçlar üretebileceğini ve en iyi troposfer kestirim performansının yine üç sistemin ortak kullanıldığı çoklu GNSS çözümünden elde edilebileceğini göstermiştir.

**Anahtar Sözcükler:** GNSS, BDS-3, Hassas nokta konumlama, PPP, Troposfer

### Evaluation of the precise point positioning performance for Global BeiDou System (BDS-3)

**Abstract:** The main objective of this study is to evaluate the positioning performance of the global BeiDou system (BDS-3) in terms of Precise Point Positioning (PPP). The PPP performance of BDS-3 was compared with both GPS and the regional BeiDou system (BDS-2). In addition, the contribution of BDS-3 to the PPP performance was analyzed through multi-GNSS combinations of these three systems. For this purpose, seven processing scenarios in total were composed, and the observation dataset collected at 15 International GNSS Service (IGS) stations over the period of November 21 and 30, 2021 were processed under these scenarios. The results showed that positioning accuracies of 0.0152, 0.0605, and 0.0203 m could be acquired from the GPS, BDS-2, and BDS-3 PPP solutions, respectively. Also, average convergence times obtained from these solutions were respectively computed as 60.94, 261.71, and 63.06 minutes. While results of the BDS-2 PPP solution remained substantially behind the GPS results, comparable results with the GPS PPP were acquired from the BDS-3 PPP solution. Besides, the obtained results revealed that the positioning performance could be improved significantly when double and triple combinations of these navigation systems were employed. The positioning accuracy and convergence time obtained from the PPP solution where GPS, BDS-2, and BDS-3 systems were used in common were 0.0136 m and 26.45 minutes. In this study, tropospheric delay estimations were also evaluated to analyze the PPP performance comprehensively. The results demonstrated that the BDS-3 solution could provide close results to the GPS PPP solution in terms of tropospheric delay estimation and the best troposphere estimation performance could similarly be acquired from the multi-GNSS solution where three systems were employed in common.

**Keywords:** GNSS, BDS-3, Precise point positioning, PPP, Troposphere

\* Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Tel: +90 312 297 69 90

Geliş Tarihi/Received: 31.03.2022  
Kabul Tarihi/Accepted: 26.04.2022



## 1. Giriş

Rölatif konum belirleme teknikleri uzun yıllardır hassas GNSS uygulamalarında başarı ile kullanılmaktadır. Bu tekniklerde GNSS hata kaynaklarının önemli bir bölümü öncesinde hassas koordinatları bilinen referans istasyonlar aracılığıyla ortadan kaldırılmakta ve bu sayede ilgili teknikler kullanılarak yüksek konum doğruluğu elde edilmektedir. Tanımından da anlaşılacağı üzere rölatif konum belirleme teknikleri en az iki GNSS alıcısına ihtiyaç duymaktadır. Bu durum konum belirleme uygulamaları açısından uygulama maliyetini ve sistem karmaşasını artıran önemli bir faktördür. İlave olarak bu tekniklerden elde edilebilecek konum doğruluğu referans istasyondan olan mesafeye bağlı olarak önemli oranda değişiklikler gösterebilir (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle, 2007). Diğer taraftan Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning, PPP) adı verilen mutlak konum belirleme tekniği 1990'lı yılların sonuna doğru bu geleneksel yöntemlere bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır (Zumberge, Heflin, Jefferson, Watkins, & Webb, 1997). PPP yalnızca tek bir GNSS alıcısı kullanarak küresel ölçekte yüksek konum doğruluğu sağlayabilen bir konum belirleme tekniğidir. PPP tekniğinde uydu yörünge ve saat hatasını ortadan kaldırmak için küresel bir ağdan elde edilmiş hassas yörünge ve saat bilgileri kullanılmaktadır. Uluslararası GNSS servisi (International GNSS Service, IGS) küresel ağı kullanılarak üretilen hassas ürünler uzun senelerdir PPP uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. İlave olarak iyonosfer tabakasının GNSS sinyalleri üzerine olan etkisini gidermek adına PPP tekniği çift frekanslı kod ve faz gözlemlerinin iyonosferden bağımsız doğrusal kombinasyonlarını standart ölçü modeli olarak kullanılmaktadır (Kouba & Héroux, 2001).

Referans istasyon ihtiyacını ortadan kaldırmasına ek olarak uygulama ve maliyet açısından getirdiği kolaylıklar PPP tekniğinin son yıllarda GNSS kullanıcıları arasında yüksek ilgi görmesine neden olmuştur. Bu ilgiye paralel olarak deprem kaynaklı yer değişimlerinin belirlenmesi (Kouba, 2003; Xu vd., 2019), dinamik yer değiştirmelerin izlenmesi (Paziewski, Sieradzki, & Baryla, 2018; Yigit & Gurlek, 2017), atmosferin modellenmesi (Lu vd., 2016; Zhang, Teunissen, Yuan, Zhang, & Li, 2018), açık deniz navigasyonu (Alkan & Öcalan, 2013) gibi birçok GNSS uygulamasında PPP tekniği yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yüksek konum doğruluğu sağlayabiliyor olmasına rağmen PPP tekniğinin en büyük dezavantajı tam sayı niteliğini kaybeden faz belirsizliklerinin yakınsaması için başlangıçta ihtiyaç duyulan görece uzun gözlem süresidir. Bu dezavantajı ortadan kaldırabilmek adına son yıllarda çok sayıda belirsizlik çözümü (Ambiguity Resolution, AR) metodu ortaya atılmıştır (Collins, Bisnath, Lahaye, & Héroux, 2010; Ge, Gendt, Rothacher, Shi, & Liu, 2008; Geng, Meng, Dodson, Ge, & Teferle, 2010; Laurichesse, Mercier, Berthias, Broca, & Cerri, 2009). Bu yöntemler aracılığıyla tam sayı belirsizliklerini çözebilmek ve bu sayede PPP tekniğinde ihtiyaç duyulan yakınsama süresini kayda değer oranda kısaltmak mümkündür. Ancak PPP-AR yöntemlerinin uygulanabilmesi için standart hassas ürünler arasında yer almayan ilave faz düzeltmelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Diğer yandan GLONASS (Russian Global Navigation Satellite System) uydu takımının tamamlanmasına ek olarak Galileo (European Global Navigation Satellite System) ve BDS (Chinese BeiDou Navigation Satellite System) gibi yeni küresel navigasyon sistemlerinin ortaya çıkması PPP uygulamaları açısından önemli fırsatları beraberinde getirmiştir. Birden fazla navigasyon sisteminin ortak GNSS çözümüne dahil edilmesi, diğer bir deyişle çoklu GNSS yöntemleri sağladığı ilave uydu ve sinyal kaynağı sayesinde PPP çözümlerinin konum belirleme performansını kayda değer oranda iyileştirmektedir (Bahadır & Nohutcu, 2018; Cai, Gao, Pan, & Zhu, 2015; Li vd., 2015; Pan, Zhang, Liu, Li, & Li, 2017). Buna ek olarak Galileo ve BDS uydu sayısının kayda değer oranda artmasıyla birlikte bu sistemlerin konum belirleme uygulamaları açısından bireysel performansları da son yıllarda birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Bahadır, 2022; Ge, Ding, Qin, Zhou, & Yang, 2020; Ge vd., 2021; Hadas, Kazmierski, & Sosnica, 2019; Zhu vd., 2021).

Bölgesel BeiDou navigasyon sistemi (BDS-2) 2012 yılından bu yana kullanımda olup 2022 yılı başı itibarıyla 5 adet GEO (Geostationary Earth Orbit), 7 adet IGSO (Inclined GeoSynchronous Orbit) ve 3 adet MEO (Medium Earth Orbit) olmak üzere toplamda 15 adet uydudan oluşmaktadır (URL-1). Bu sistem temel anlamda Asya Pasifik bölgesi için konum-zaman

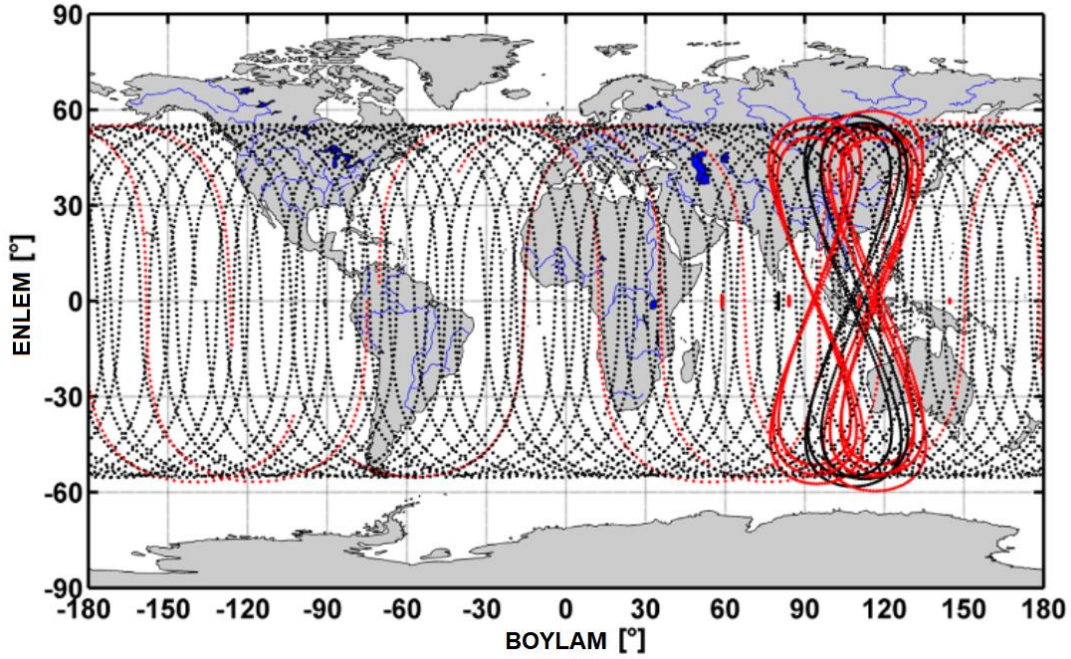
belirleme ve navigasyon hizmeti sunmak amacıyla geliştirilmiştir. BDS-2'nin GNSS uygulamaları açısından performansı şimdiye dek birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. [Odolinski, Teunissen ve Odijk \(2014\)](#) GPS ve BDS-2 sistemlerinin ortak kullanılması durumunda kod tabanlı GNSS konum belirleme performansının önemli oranda iyileştirilebileceğini ortaya koymuştur. [Chen vd. \(2016\)](#) GPS, BDS-2 ve GPS/BDS-2 PPP çözümlerinin konum belirleme performanslarını IGS MGEX (multi-GNSS experiment) istasyonları aracılığıyla incelemiştir. Yine [Liu, Jiang, Li, Chen ve Zhao \(2019\)](#) GPS ve BDS-2'nin performanslarını PPP ve PPP-AR çözümleri açısından incelemiş ve BDS-2 PPP çözümünün kuzey, doğu ve yukarı yönlerde sırasıyla 2.0, 1.5 ve 5.9 cm karesel ortalama hata (KOH) değerlerine sahip olduğunu göstermiştir. Küresel BeiDou navigasyon sistemi (BDS-3) ise 2020 yılı itibarıyla uydu takımını tamamlamış ve tamamen kullanılabilir duruma erişmiştir. BDS-3 sistemi 24 adet MEO, 3 adet IGSO ve 3 adet GEO olmak üzere toplamda 30 uydu ile küresel ölçekte hizmet sağlamaktadır ([URL-1](#)). Son zamanlarda BDS-3'ün konum belirleme performansını araştırmaya yönelik bazı öncül çalışmalar gerçekleştirilmiştir ([Chen vd., 2021](#); [Li vd., 2020](#); [Lv, Geng, Zhao, Xie, & Zhou, 2020](#); [Zhang vd., 2019](#)). Son yıllarda BDS-3'ün uydu sayısındaki hızlı artışa ek olarak uydu yörünge ve saat düzeltmelerindeki iyileşmeler de göz önünde bulundurulduğunda BDS-3'ün bireysel ve diğer sistemlerle entegre kullanılması durumunda PPP çözümleri açısından performansı oldukça ilgi çekici bir konu olmaya devam etmektedir. Bu nedenle bu çalışmanın temel amacı BDS-3'ün PPP çözümleri açısından konum belirleme performansının hem konum doğruluğu hem de yakınsama süresi açısından değerlendirilmesidir. Bu amaçla BDS-3'ün bireysel performansına ek olarak BDS-2 ve GPS sistemleri ile entegrasyonu PPP çözümleri açısından analiz edilmiştir. Ayrıca bu çalışma BDS-3'ün PPP çözümüyle troposferik gecikme kestirim performansı BDS-2 ve GPS çözümleriyle karşılaştırılarak değerlendirilmesini de kapsamaktadır.

## 2. Küresel BeiDou Sistemi (BDS-3)

BDS-2 ile Asya Pasifik bölgesi için hizmet sağlayabilen BeiDou sistemi BDS-3 uydularıyla birlikte küresel ölçekte kapsama alanına ulaşmıştır. 2020 yılı itibarıyla uydu takımının tamamlanmasıyla birlikte BDS-3 tam kapasiteyle hizmet vermeye başlamıştır. BDS-3 2022 yılı başı itibarıyla toplam 30 adet uydula küresel olarak konum-zaman belirleme ve navigasyon amaçlı kullanılabilir sinyalleri GNSS kullanıcılarına sağlamaktadır. Tablo 1 BDS-2 ve BDS-3 uydu takımlarına ait mevcut kullanılabilir uydu sayılarını PRN numaralarına ve uydu tiplerine göre sunmaktadır. Tablo 1'den görüleceği üzere BDS-2 bölgesel bir sistem olarak tasarlandığı için uydu takımının önemli bir bölümü GEO ve IGSO uydularından meydana gelmektedir. BDS-3 uydu takımında ise MEO uyduları ağırlıkta olup bu sayede küresel ölçekte hizmet sağlayabilmektedir. Ek olarak BDS-3'ün kullanılabilir uydu sayısı BDS-2'nin iki katıdır. Bu da BDS-3'ün BDS-2'ye kıyasla daha yüksek zamansal ve konumsal çözünürlüğe sahip olduğunu göstermektedir. Şekil 1'de 15 Kasım 2020 tarihi için BDS-2 ve BDS-3 uydularına ait yörüngeler gösterilmektedir ([Lv vd., 2022](#)). Şekil 1'de görülen kırmızı çizgiler BDS-2 uydularına siyah çizgiler ise BDS-3 uydularına ait yörüngeleri temsil etmektedir. Şekilden de görüleceği üzere BDS-2 uyduları Asya Pasifik bölgesine yoğunlaşırken BDS-3 uyduları ise küresel ölçekte hizmet sunabilecek seviyededir.

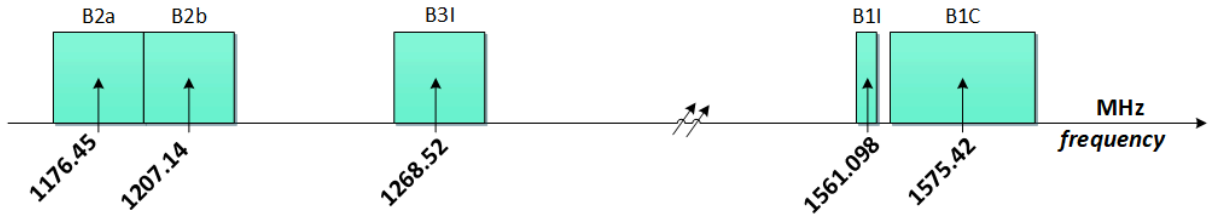
**Tablo 1:** 2022 başı itibarıyla BDS-2 ve BDS-3 için kullanılabilir uydu sayıları ve tipleri.

Uydu tipi	BDS-2	BDS-3
GEO	PRN01, PRN02, PRN03, PRN04, PRN05	PRN59, PRN60, PRN61
IGSO	PRN06, PRN07, PRN08, PRN09, PRN10, PRN13, PRN16	PRN38, PRN39, PRN40
MEO	PRN11, PRN12, PRN14	PRN19, PRN20, PRN21, PRN22, PRN23, PRN24, PRN25, PRN26, PRN27, PRN28, PRN29, PRN30, PRN32, PRN33, PRN34, PRN35, PRN36, PRN37, PRN41, PRN42, PRN43, PRN44, PRN45, PRN46
Toplam uydu sayısı	15	30



Şekil 1: 15 Kasım 2020 tarihi için BDS-2 (kırmızı) ve BDS-3 (siyah) uydularına ait yörüngeler (Lv vd. (2022)'den alınarak düzenlenmiştir).

Diğer taraftan GNSS uygulamaları açısından en önemli noktalardan biri de ilgili sistemler tarafından sağlanan navigasyon sinyalleri ve servisleridir. BDS-2'de B1 (1561.098 MHz), B2 (1207.140 MHz) ve B3 (1268.520 MHz) merkez frekanslarında yayınlanan B1I, B2I ve B3I olmak üzere üç farklı kullanıma açık sinyal mevcuttur. Bu sinyallerin hepsi QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) yöntemi ile modüle edilmiştir. Diğer taraftan B1I ve B3I sinyallerinin yanı sıra BDS-3, B1C (1575.420 MHz), B2a (1176.450 MHz) ve B2b (1207.140 MHz) olmak üzere üç farklı sinyale sahiptir. B1C sinyali BOC (Binary Offset Carrier) ve QMBOC (Quadrature Multiplexed Binary Offset Carrier) yöntemleri ile modüle edilirken B2a ve B2b sinyalleri BPSK (Binary Phase Shift Keying) yöntemi ile modüle edilmiştir. BDS-2'ye ait B2I ile BDS-3'e ait B2b sinyalleri aynı frekans değerine sahip olmalarına karşın farklı modülasyon teknikleri kullanılarak üretildiği için farklı sinyaller olarak değerlendirilip buna göre isimlendirilmiştir (Chen vd., 2021). B1I ve B3I ise her iki sistemde de ortak olarak kullanılan navigasyon sinyalleridir. Şekil 2, BDS-2 ve BDS-3'e ait navigasyon sinyallerini ve kullanılan frekansları göstermektedir (URL-1).



Şekil 2: BDS-2 ve BDS-3'te kullanılan sinyaller ve frekansları (URL-1).

### 3. PPP Modeli

Standart PPP yaklaşımında ölçü modeli olarak kullanılan çift frekanslı kod ( $P$ ) ve faz ( $L$ ) gözlemlerinin iyonosferden bağımsız ( $\hat{I}B$ ) doğrusal kombinasyonları aşağıdaki eşitliklerle ifade edilebilir.

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

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

burada  $r$  alıcıyı,  $s$  GNSS indeksini (G: GPS, C2: BDS-2, C3: BDS-3),  $j$  uydu numarasını ve  $c$  ışık hızını göstermektedir. Ayrıca,  $\rho_r^{s,j}$  uydu alıcı arasındaki geometrik mesafeyi,  $\widehat{dt}_r^s$  ve  $\widehat{dT}^{s,j}$  sırasıyla düzenlenmiş alıcı ve uydu saat hatasını,  $T_r^{s,j}$  toplam troposferik gecikmeyi,  $\lambda_{IB}^s$  ve  $\widehat{N}_{IB}^{s,j}$  ise sırasıyla İB doğrusal kombinasyon için dalga boyunu ve düzenlenmiş faz belirsizlik parametresini ve  $\varepsilon$  çoklu yol (multipath) etkisini de içerecek şekilde ölçüye ait gürültü değerini ifade etmektedir. Alıcı ve uydu saat hatalarının yanında faz belirsizlik parametresi için düzenlenmiş ifadeler aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$\widehat{dt}_r^s = dt_r^s + b_{IB,r}^s \quad (3)$$

$$c\widehat{dT}^{s,j} = dT^{s,j} + b_{IB}^{s,j} \quad (4)$$

$$\widehat{N}_{IB}^{s,j} = N_{IB}^{s,j} + (B_{IB,r}^s - B_{IB}^{s,j}) - (b_{IB,r}^s - b_{IB}^{s,j}) \quad (5)$$

burada  $dt_r^s$  ve  $dT^{s,j}$  orijinal alıcı ve uydu saat hatasını,  $b_{IB,r}^s$  ve  $b_{IB}^{s,j}$  İB doğrusal kombinasyon için sırasıyla alıcı ve uydu kod donanım hatalarını,  $B_{IB,r}^s$  ve  $B_{IB}^{s,j}$  sırasıyla İB doğrusal kombinasyon için alıcı ve uydu faz donanım hatalarını ve  $N_{IB}^{s,j}$  ise orijinal tam sayı faz belirsizlik parametresini göstermektedir.

Geleneksel olarak PPP yaklaşımında uydu yörünge ve saat hatasını gidermek için IGS tarafından üretilen hassas ürünler kullanılmaktadır. Bu ürünler belirli bir sinyal ya da sinyal kombinasyonu temel alınarak üretilmektedir. Örneğin, GPS uyduları için hassas uydu ürünleri L1 ve L2 sinyalleri üzerindeki kod gözlemleri kullanılarak üretilen İB doğrusal kombinasyona göre üretilmektedir. Benzer şekilde BDS-2 ve BDS-3 uyduları için hassas ürünler her iki sistemde de ortak olarak kullanılan B1I ve B3I sinyalleri üzerindeki kod gözlemlerinin İB doğrusal kombinasyonları temel alınarak üretilmektedir (Teunissen & Montenbruck, 2017). Dolayısıyla IGS tarafından sağlanan saat düzeltmelerinde ilgili uyduya ait orijinal saat hatasına ek olarak İB kombinasyonuna ait uydu kod donanım hatası da yer almaktadır. Bu nedenle ilgili sinyaller kullanılarak oluşturulan gözlemler için IGS ürünleri yardımıyla düzenlenmiş uydu saat hataları giderilebilmektedir. Alıcı saat hatası ve ilgili kod donanım hatası ise birbirlerinden ayrı olarak tahmin edilemedikleri için birlikte düzenlenmiş alıcı saat hatası olarak kestirilmektedir (Cai & Gao, 2013). Son olarak geriye kalan faz donanım hataları ise belirsizlik parametresine yüklenerek düzenlenmiş faz belirsizlik parametresi olarak kestirilmektedir (Kouba & Héroux, 2001).

Eşitlik 1 ve 2'den görüleceği üzere PPP modeli her navigasyon sistemi için farklı bir alıcı saat hatasına sahiptir. Bunun temel nedeni navigasyon sistemlerinin birbirinden farklı zaman ölçeklerine sahip olmasıdır. Bu modele göre birden fazla navigasyon sisteminin entegre edildiği çoklu GNSS çözümlerinde farklı alıcı saat hataları ortaya çıkmaktadır. GNSS uygulamalarında genel olarak her navigasyon sistemi için ilave bir alıcı saat hatası tanımlamak yerine seçilen bir referans zaman ölçeğine göre sistemler arası zaman farkı parametresi (inter-system bias, ISB) tanımlanmaktadır. Hassas uydu ürünlerinin GPS zaman ölçeğinde üretildiği ve ayrıca GNSS alıcılarının çoğunun GPS zaman ölçeğini referans aldığı düşünüldüğünde ISB parametreleri genellikle GPS zaman ölçeğini referans olarak tanımlanmaktadır (Abd Rabbou, El-Shazly, & Ahmed, 2018; Cai & Gao, 2013; Li vd., 2015). Öte yandan literatürde mevcut çalışmalarda BDS-2 ve BDS-3 arasında zaman ölçeği farkı bulunduğu ortaya konmuştur ve bu nedenle ilgili sistemler için farklı ISB parametreleri tanımlanması gerekmektedir (Chen vd., 2021; Zhao, Chen, Gao, Jiang, & Liu, 2020).

PPP modeli için en önemli hata kaynaklarından bir tanesi de GNSS sinyalleri üzerindeki troposferik gecikmedir. GNSS tekniklerinde bir standart olarak troposferik gecikme ıslak ve kuru bileşenlerine ayrılarak ele alınmaktadır. GNSS sinyalleri

için troposferin kuru bileşeni deneysel modeller aracılığıyla düzeltilebilirken ıslak bileşeni atmosferdeki su buharı miktarındaki hızlı değişimler nedeniyle modellemek oldukça zordur. Bu nedenle troposferin ıslak bileşeni genellikle ilave bir bilinmeyen olarak dengeleme aşamasında kestirilmektedir (Davis, Herring, Shapiro, Rogers, & Elgered, 1985). Toplam troposferik gecikme zenit doğrultusu boyunca bir iz düşüm fonksiyonu kullanarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$T_r^{s,j} = M_K(E)T_D + M_I(E)T_I \quad (6)$$

burada  $T_D$  ve  $T_I$  zenit doğrultusu boyunca kuru ve ıslak troposferik gecikmeyi,  $M_K$  ve  $M_I$  uydu yükseklik açısına ( $E$ ) bağlı olarak iz düşüm fonksiyonundan elde edilen ıslak ve kuru bileşenlere ait katsayıları temsil etmektedir. Bu çalışmada troposferik gecikmenin kuru bileşenini düzeltmek için Saastamoinen (1972) modeli VMF3 (Landskron & Böhm, 2018) iz düşüm fonksiyonu ile kullanılmıştır. Troposferin ıslak bileşeni ise yine aynı iz düşüm fonksiyonu kullanılarak epok bazlı kestirilmiştir.

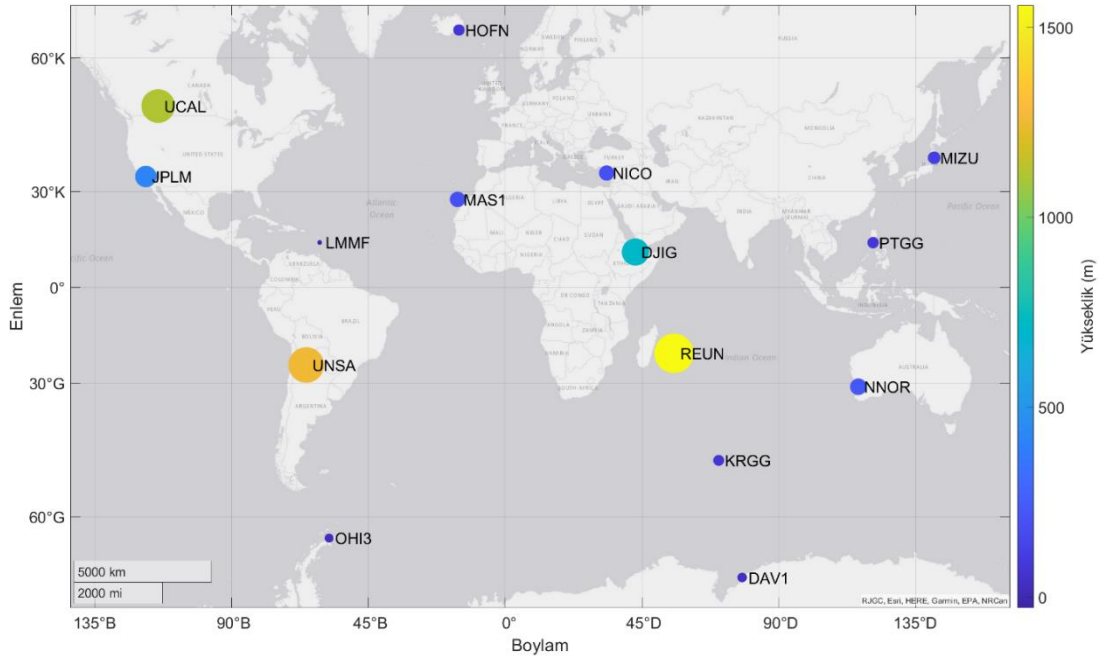
Sonuç olarak, PPP modeli için bilinmeyen parametreler üç adet konum bileşeni, bir adet alıcı saat hatası, bir adet troposferik ıslak gecikme, ilave her sistem için bir ISB parametresi ve görülen her uydu için bir belirsizlik parametresi şeklindedir. Uydu yörünge ve saat hatasına ek olarak uydu ve alıcı faz merkezi kayıklıkları güncel IGS anten modeli (igs14.atx) kullanılarak giderilmelidir. Ayrıca rölativistik etkiler, faz dönüklüğü, katı yer gelgiti ve okyanus yüklemesi gibi PPP'ye özel hata kaynaklarının da uygun modeller aracılığıyla giderilmesi gerekmektedir (Kouba, 2015).

#### 4. Uygulama ve Analizler

Bu bölümde BDS-3'ün PPP performansına olan katkısını değerlendirmek için gerçekleştirilen uygulama çalışması ve buradan elde edilen sonuçlar kapsamlı bir şekilde sunulacaktır. Öncelikle PPP konum belirleme performansı konum doğruluğu ve yakınsama süresi açısından değerlendirilecektir. Ardından PPP çözümlerinden elde edilen troposferik gecikme kestirimleri de değerlendirilecektir. Tüm bunlardan önce ise uygulamada kullanılan veri seti sunulacaktır.

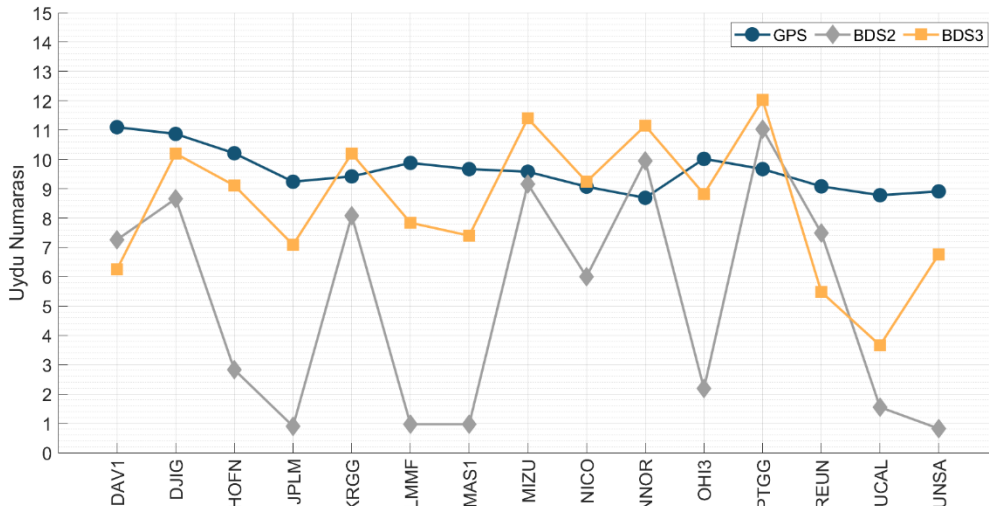
##### 4.1 Veri Seti

Çalışma kapsamında IGS MGEX ağına ait 15 istasyondan 21-30 Kasım 2021 (yılın 325-334 günleri) tarihleri arasındaki toplam 10 gün boyunca sağlanan günlük gözlem verileri kullanılmıştır. Bu istasyonların hepsi GPS, GLONASS, Galileo, BDS-2 ve BDS-3 uydularına ait gözlemleri toplayabilen çoklu GNSS antenlere sahiptir. Seçilen 15 istasyondan 7 tanesi konum olarak Asya Pasifik bölgesinde yer alırken geri kalan istasyonlar tüm dünyaya mümkün olduğunca eşit dağılacak şekilde belirlenmiştir. Seçilen IGS istasyonları, coğrafi konumları ve elipsoidal yükseklikleri Şekil 3'te sunulmuştur. Ayrıca bu çalışma kapsamında PPP çözümlerini gerçekleştirmek için çoklu GNSS PPP çözümü gerçekleştirme yeteneğine sahip açık kaynak kodlu bir GNSS analiz yazılımı olan PPPH kullanılmıştır (Bahadır & Nohutcu, 2018). GPS uyduları için çift frekanslı İB doğrusal kombinasyonlar L1 ve L2 navigasyon sinyalleri kullanılarak oluşturulmuştur. BDS-2 ve BDS-3 uyduları için her iki sistemde ortak olan B1I ve B3I sinyalleri çift frekanslı İB gözlemlerinin oluşturulmasında kullanılmıştır. PPP çözümlerinde GFZ (German Research Center for Geosciences) tarafından üretilen hassas uydu yörünge ve saat bilgileri kullanılmıştır. Bu ürünler BDS-2 ve BDS-3'e ait tüm uydular için uydu yörünge ve saat bilgilerini içermektedir. GFZ ürünleri için uydu yörünge bilgilerinin veri aralığı 300 saniye iken uydu saat bilgilerinin veri aralığı ise 30 saniyedir. Ayrıca uydu ve alıcı anten faz merkezi düzeltmeleri IGS'nin en güncel anten modeli (igs14\_2178.atx) kullanılarak giderilmiştir.



Şekil 3: Uygulamada kullanılan IGS istasyonları, coğrafi konumları ve elipsoidal yükseklikleri.

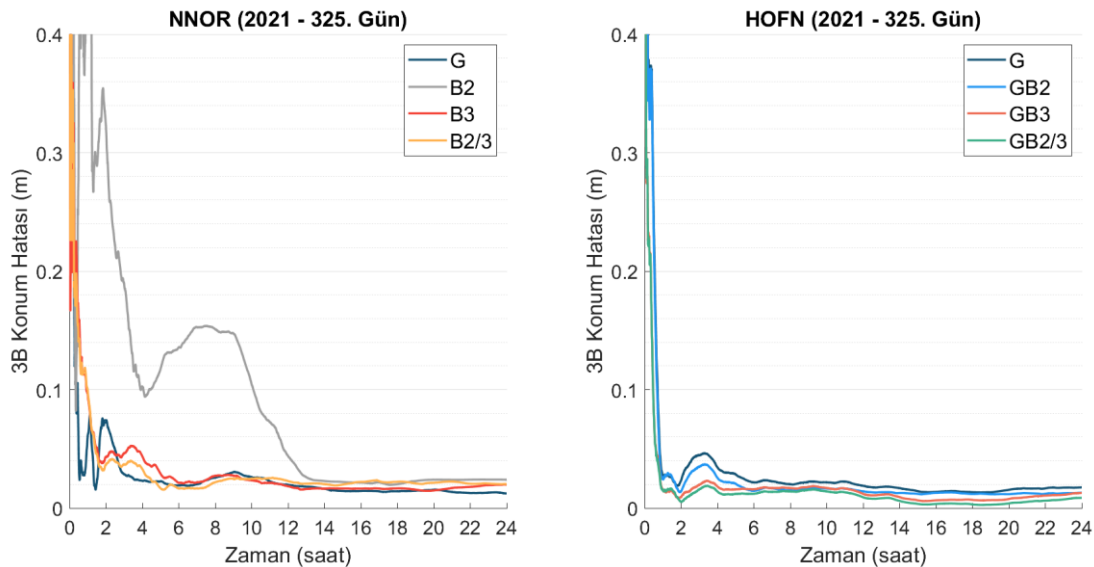
Diğer taraftan PPP gibi mutlak konum belirleme teknikleri için oldukça önem arz eden konulardan bir tanesi de uydu görünürlüğüdür. Bu nedenle PPP çözümlerini gerçekleştirmeden önce GPS, BDS-2 ve BDS-3 uydu takımları için istasyon bazında uydu görünürlükleri incelenmiştir. Şekil 4'te bu üç sisteme ait 10 günlük süre boyunca epok başına düşen ortalama görünür uydu sayısı her bir istasyon için ayrı ayrı sunulmaktadır. Şekilden GPS için görünür uydu sayıları açısından istasyon bazında önemli değişiklikler olmadığı gözlenmektedir. Tüm istasyonlar göz önünde alındığında GPS için görünür uydu sayısı ortalama 9.65 olarak hesaplanmıştır. Yine şekilden BDS-2 için görünür uydu sayısının istasyonlar bazında kayda değer ölçüde değişebileceği gözlenmektedir. BDS-2'nin bölgesel bir sistem olduğu düşünüldüğünde Asya Pasifik bölgesinde yer alan istasyonlarda görünür uydu sayısının oldukça yüksek olması şaşırtıcı bir sonuç değildir. Öte yandan Kuzey Amerika gibi BDS-2 açısından uydu görünürlüğünün oldukça düşük olduğu bölgelerde ortalama uydu sayısı 1 uydunun altına kadar düşmektedir. Tüm istasyonlar göz önüne alındığında BDS-2 için hesaplanan ortalama görünür uydu sayısı 5.32'dir. Son olarak BDS-3 için küresel ölçekte uydu görünürlüğü BDS-2'ye kıyasla oldukça yüksek seviyededir. REUN ve UCAL istasyonları haricinde tüm istasyonlar için görünür uydu sayısı ortalaması 6'nın üzerindedir. Bu sonuçlar BDS-3'ün küresel anlamda kendi başına PPP çözümü gerçekleştirmek için yeterli uydu kaynağına sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 4: GPS, BDS-2 ve BDS-3 uydu takımları için istasyon bazında epok başına düşen ortalama görünür uydu sayıları.

## 4.2 Konum Belirleme Performansı

BDS-3'ün PPP çözümleri açısından konum belirleme performansını karşılaştırmalı olarak değerlendirebilmek için GPS (G), BDS-2 (B2) ve BDS-3 (B3) olmak üzere üç temel işlem senaryosu oluşturulmuştur. Ayrıca BDS-3'ün diğer sistemlerle ortak olarak kullanıldığı durumlarda katkısını değerlendirebilmek adına BDS-2/BDS-3 (B2/3), GPS/BDS-2 (GB2), GPS/BDS-3 (GB3) ve GPS/BDS-2/BDS-3 (GB2/3) olmak üzere dört ilave işlem senaryosu daha oluşturulmuştur. İlgili gözlem seti bu yedi farklı senaryo altında ayrı ayrı işlenmiştir. BDS-2 bölgesel bir uydu sistemi olduğu ve Asya Pasifik bölgesi dışında PPP çözümünü gerçekleştirmek için yeterli uydu kaynağına sahip olmaması nedeniyle B2 PPP çözümü sadece Asya Pasifik bölgesinde yer alan istasyonlar için gerçekleştirilmiştir. PPP çözümlerinin konum belirleme performansını inceleyebilmek adına ilgili çözümden elde edilen koordinatlarla IGS haftalık çözümlerinden elde edilen hassas istasyon koordinatları karşılaştırılmış ve lokal koordinat sisteminde (kuzey, doğu, yukarı) epok bazlı konum hataları hesaplanmıştır. Buna ek olarak üç boyutlu (3B) konum hataları da her bir çözüm için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Şekil 5 21 Kasım 2021 (yılın 325. günü) tarihi için NNOR istasyonunda G, B2, B3 ve B2/3 PPP çözümlerinden hesaplanan 3B konum hatasının gün içindeki değişimini göstermektedir. Ayrıca ilgili şekilde aynı tarihte HOFN istasyonu için G, GB2, GB3 ve GB2/3 PPP çözümlerinden elde edilen 3B konum hatasının gün içindeki değişimi de sunulmaktadır. B2 PPP çözümünü analiz edebilmek için Asya Pasifik bölgesinden bir istasyon belirlenirken çoklu kombinasyonların etkisini gözlemleyebilmek için ayrıca bir istasyon belirlenmiştir. Şekilden görüleceği üzere B2 PPP performansı özellikle ilk 13 saatlik dönemde G ve B3 çözümlerine göre oldukça kötüdür. B3 PPP çözümü ise B2 çözümüne kıyasla oldukça yüksek bir konum belirleme performansı sergilemiştir ve G PPP çözümü ile karşılaştırılabilir konum doğruluğu değerlerine sahiptir. Öte yandan BDS-2 ve BDS-3'ün ortak kullanıldığı B2/3 çözümü B2 ve B3 çözümlerine kıyasla daha yüksek konum belirleme performansı sağlamaktadır. Şekilde HOFN istasyonu için sunulan sonuçlar incelendiğinde G PPP çözümüne kıyasla diğer sistemlerin entegre edildiği GB2, GB3 ve GB2/3 çözümlerinin daha yüksek konum belirleme performansına sahip olduğu görülebilir. Yine şekilden konum belirleme açısından en yüksek performansın GB2/3 çözümünden elde edildiği izlenmektedir.



Şekil 5: 2021 yılının 325. günü için NNOR istasyonuna ait G, B2, B3 ve B2/3, HOFN istasyonuna ait G, GB2, GB3 ve GB2/3 PPP çözümlerinden elde edilen günlük 3B konum hataları.

Öte taraftan PPP çözümlerinin istasyon bazlı konum belirleme performanslarını inceleyebilmek adına Tablo 2'de yedi farklı PPP senaryosundan elde edilen 3B konum hataları kullanılarak hesaplanan KOH değerleri sunulmaktadır. Burada KOH değerleri ilgili istasyona ait tüm günlük çözümler dikkate alınarak hesaplanmıştır. Diğer bir deyişle 10 günlük periyotta gün sonunda elde edilen koordinat değerleri KOH hesabında kullanılmıştır. Daha önce de belirtildiği üzere B2 PPP çözümü



yalnızca Asya Pasifik bölgesinde yer alan istasyonlar için gerçekleştirilmiştir. Tabloda ilk göze çarpan durum konum belirleme performanslarının istasyonlara göre kayda değer oranda değişebildiğidir. Yalnızca tek sistemin dahil edildiği çözümlerde (G, B2 ve B3) 12 istasyonda G PPP çözümünün, 3 istasyonda ise B3 PPP çözümünün en düşük KOH değerini sunduğu Tablo 2’de görülmektedir. B2 çözümünün ise G ve B3 çözümlerine kıyasla çok daha yüksek KOH değerlerine sahip olduğu yine Tablo 2’den görülebilir. Bu durumun en büyük nedeni BDS-2 uydusu takımının büyük bir bölümünü oluşturan GEO ve IGSO uydularının yörünge ve saat bilgilerinin MEO uydularına göre daha düşük olmasıdır. BDS-2 ve BDS-3’ün ortak kullanıldığı B2/3 PPP çözümünün B3 çözümü ile kıyaslandığında çoğu istasyonda konum belirleme performansını iyileştirdiği Tablo 2’den görülmektedir. Ancak bazı istasyonlarda B2/3 çözümünün B3 çözümünden daha kötü sonuçlar verdiği yine Tablo 2’den izlenmektedir. Bunun nedeni yine BDS-2 uydularına ait uydusu yörünge ve saat bilgilerinin düşük hassasiyetidir. GPS ile BDS-2 ve BDS-3’ün entegre edildiği GB2, GB3 ve GB2/3 çözümlerinin G PPP çözümleri ile kıyaslandığında istasyonların çoğunda konum belirleme performansını iyileştirdiği ve GB2/3 çözümünün bu çoklu GNSS çözümleri arasında en iyi konum belirleme doğruluğuna sahip olduğu Tablo 2’den görülmektedir.

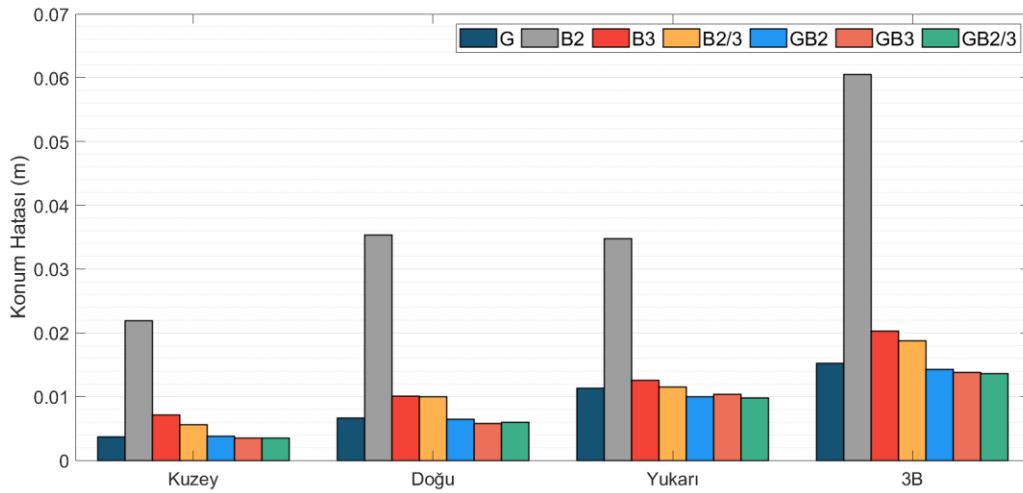
**Tablo 2:** Yedi farklı PPP senaryosundan elde edilen 3B konum hataları için istasyon bazlı hesaplanan KOH değerleri (m).

İstasyon	PPP Senaryosu						
	G	B2	B3	B23	GB2	GB3	GB23
DAV1	0.0237	0.0522	0.0299	0.0305	0.0232	0.0306	0.0283
DJIG	0.0079	0.0645	0.0175	0.0129	0.0125	0.0111	0.0110
HOFN	0.0169		0.0151	0.0139	0.0177	0.0136	0.0126
JPLM	0.0100		0.0262	0.0240	0.0102	0.0085	0.0090
KRGG	0.0091	0.0648	0.0157	0.0184	0.0103	0.0096	0.0107
LMMF	0.0264		0.0209	0.0232	0.0164	0.0172	0.0169
MAS1	0.0168		0.0178	0.0181	0.0149	0.0132	0.0127
MIZU	0.0145	0.0773	0.0273	0.0325	0.0213	0.0204	0.0227
NICO	0.0108		0.0198	0.0128	0.0107	0.0128	0.0100
NNOR	0.0076	0.0477	0.0155	0.0147	0.0114	0.0122	0.0139
OHI3	0.0139		0.0151	0.0143	0.0125	0.0090	0.0087
PTGG	0.0377	0.0634	0.0246	0.0254	0.0237	0.0191	0.0191
REUN	0.0094	0.0575	0.0228	0.0285	0.0136	0.0102	0.0123
UCAL	0.0114		0.0280	0.0175	0.0107	0.0090	0.0084
UNSA	0.0115		0.0244	0.0246	0.0113	0.0146	0.0132

Şekil 6 yedi farklı PPP senaryosu için tüm istasyonlar göz önüne alınarak hesaplanan kuzey, doğu ve yukarı yönlerde KOH değerlerini sunmaktadır. İlgili şekilde ayrıca 3B konum hataları için hesaplanan KOH değerleri de yedi farklı senaryo için verilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere tüm bileşenler için en yüksek KOH değerleri B2 çözümünden elde edilmiştir. G PPP çözümü için hesaplanan kuzey, doğu, yukarı ve 3B bileşenlere ait KOH değerleri sırasıyla 0.0037, 0.0066, 0.0113 ve 0.0152 m’dir. Bu değerler B3 PPP için sırasıyla 0.0071, 0.0101, 0.0125 ve 0.0203 m olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlardan B3 çözümünün G çözümüyle karşılaştırılabilir sonuçlar ürettiği sonucuna varılabilir. Ayrıca B2/3 PPP çözümü için elde edilen KOH değerleri kuzey, doğu, yukarı ve 3B bileşenler için 0.0056, 0.0100, 0.0115 ve 0.0187 m’dir. Buradan BDS-2 ve BDS-3 sistemlerinin ortak olarak kullanılması durumunda çok daha iyi konum belirleme performansı elde edileceği görülmektedir. Son olarak GB2, GB3 ve GB2/3 PPP çözümleri için 3B KOH değerleri sırasıyla 0.0143, 0.0138 ve 0.0136 m olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, G PPP çözümü ile karşılaştırıldığında GB2, GB3 ve GB2/3 PPP çözümlerinin 3B konum belirleme doğruluğunu sırasıyla %5.9, %9.3 ve %10.6 oranında iyileştirdiği anlamına gelmektedir.

PPP konum belirleme performansı açısından en önemli göstergelerden bir tanesi yakınsama süresidir. Bu çalışmada PPP konum belirleme performansını değerlendirebilmek için konum doğruluğuna ek olarak yakınsama süresi de

değerlendirilmiştir. Bu çalışma için yakınsama süresi 3B konum doğruluğunun 10 cm seviyesinin altına indiği ve takip eden 10 dakika boyunca ilgili eşik değerini üstüne çıkmadığı an olarak tanımlanmıştır. Buna göre yedi farklı senaryoda gerçekleştirilen PPP çözümleri için istasyon bazlı hesaplanan ortalama yakınsama süreleri Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'te görüleceği üzere yakınsama süreleri istasyona bağlı olarak önemli ölçüde değişebilmektedir. Konum doğruluğu analizlerine benzer şekilde en yüksek yakınsama süresi değerleri B2 PPP çözümünden elde edilmiştir. Çoklu GNSS entegrasyonlarıyla birlikte tüm istasyonlar için yakınsama süresinin kayda değer oranda kısaldığı yine Tablo 3'te görülmektedir. Tek sistemin dahil edildiği G, B2 ve B3 PPP çözümleri için tüm istasyonlar göz önüne alınarak hesaplanan ortalama yakınsama süreleri 60.94, 261.71 ve 63.06 dakikadır. Bu sonuçlara göre B3 PPP çözümünün G PPP çözümü ile kıyaslanabilir yakınsama performansına sahip olduğu söylenebilir. Ayrıca B2/3 PPP çözümünün tüm istasyonlar için ortalama yakınsama süresi de 60.63 dakika olarak hesaplanmıştır. Diğer taraftan GB2, GB3 ve GB2/3 çoklu GNSS PPP çözümleri için tüm istasyonlar dikkate alınarak hesaplanan ortalama yakınsama süresi değerleri 47.69, 28.49 ve 26.45 dakikadır. Bu sonuçlara göre G PPP çözümü ile kıyaslanınca GB2, GB3 ve GB2/3 PPP çözümleri yakınsama süresini sırasıyla %21.7, %53.2 ve %56.6 oranında kısaltmıştır.



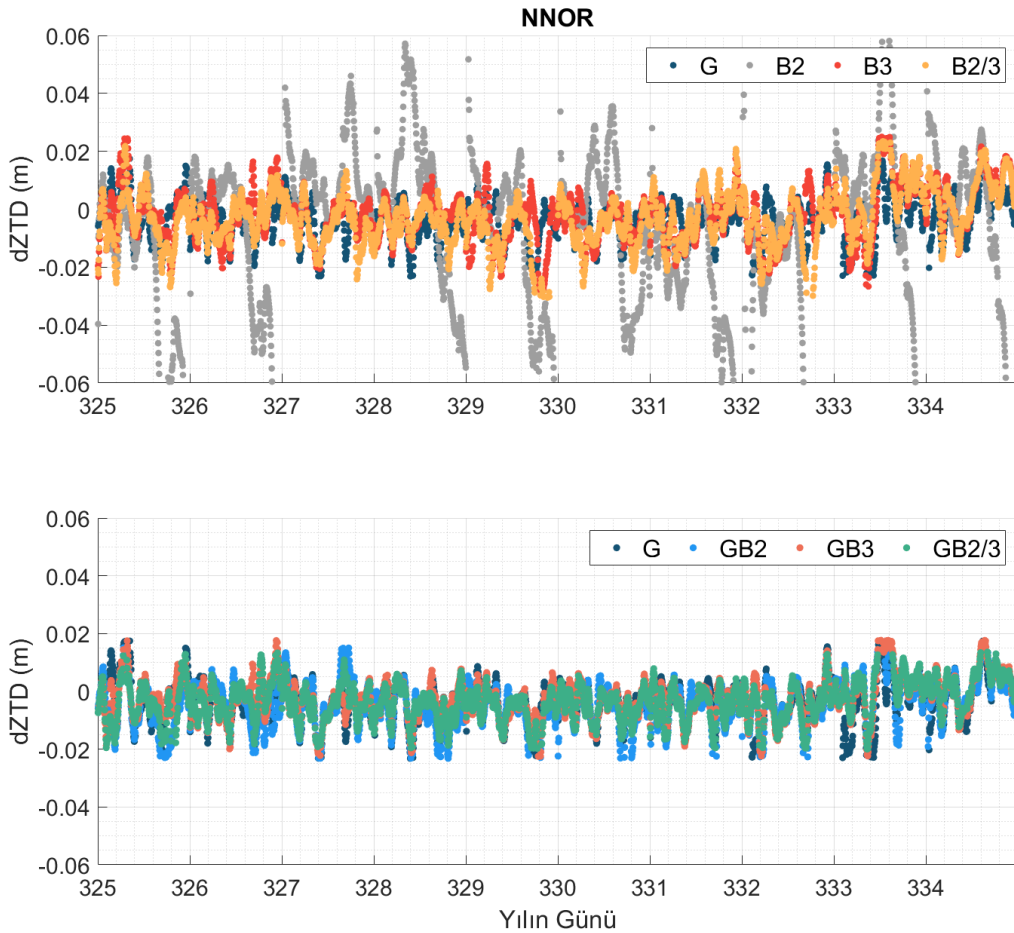
Şekil 6: Tüm istasyonlara ait PPP çözümleri göz önüne alınarak hesaplanan yedi farklı senaryoda 3B, kuzey, doğu ve yukarı bileşenleri için KOH değerleri.

Tablo 3: Yedi farklı PPP senaryosu için hesaplanan istasyon bazlı ortalama yakınsama süreleri (dakika).

İstasyon	PPP Senaryosu						
	G	B2	B3	B23	GB2	GB3	GB23
DAV1	22.17	255.50	23.17	49.00	21.28	19.38	19.86
DJIG	112.50	138.33	46.75	43.25	88.78	47.75	27.40
HOFN	87.10		46.39	45.17	68.00	28.75	29.05
JPLM	53.25		52.69	56.00	53.10	19.95	20.05
KRGG	52.10	613.75	26.55	28.28	51.05	17.85	16.60
LMMF	140.45		196.33	210.83	64.29	32.78	31.28
MAS1	155.10		96.95	107.15	126.06	80.67	77.94
MIZU	20.65	502.25	39.00	19.50	16.05	15.15	14.55
NICO	33.15		55.55	45.75	38.10	27.35	29.10
NNOR	84.05	295.75	43.10	43.11	36.35	21.05	21.45
OHI3	16.90		25.95	27.10	15.05	14.70	12.50
PTGG	46.15	103.00	56.75	45.33	37.10	36.56	29.38
REUN	41.50	137.43	76.25	56.07	67.50	30.55	30.95
UCAL	22.90		114.50	73.63	24.75	21.50	22.05
UNSA	18.30		66.56	65.50	18.90	18.05	17.94

### 4.3 Troposferik Gecikme Kestirim Performansı

PPP çözümünde üç konum bileşeni ve bir alıcı saat hatasına ek olarak kestirilen bir diğer temel parametre de troposferin ıslak bileşenidir. Troposferin ıslak bileşeni PPP çözümü boyunca epok bazlı kestirilmektedir. İlgili epokta troposferin kuru bileşeni için elde edilen düzeltme değeri ve iz düşüm fonksiyonları kullanılarak zenit doğrultusunda toplam troposferik gecikme (zenith total delay, ZTD) hesap edilebilir. Bu sayede elde edilen ZTD değerleri PPP çözümünün performansı açısından değerlendirmeye katılacak önemli ölçütlerden bir tanesi olarak görülmektedir. Bu çalışma kapsamında epok bazlı elde edilen ZTD değerleri IGS tarafından yayınlanan hassas troposfer ürünlerinden elde edilen ZTD değerleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucu elde edilen farklar dZTD değeri olarak nitelendirilecektir. Her ne kadar PPP çözümlerinden 30 saniye aralıklı ZTD değerleri elde edilebiliyor olsa da referans olarak seçilen IGS ürünlerinin veri aralığı 300 saniye olduğu için karşılaştırma ilgili epoklarda gerçekleştirilmiştir. Şekil 7 test dönemindeki toplam 10 gün boyunca NNOR istasyonu için elde edilen epok bazlı dZTD değerlerini göstermektedir. Burada yakınsama süresinin etkisini azaltmak her günün ilk yarım saatinin dZTD hesabından çıkarıldığı vurgulanmalıdır. Şekilden görüleceği üzere konum belirleme performansına benzer şekilde en yüksek dZTD değerleri B2 PPP çözümünden elde edilmiştir. Ayrıca B3 ve B2/3 PPP çözümlerinin G PPP çözümüne yakın kestirim değerlerine sahip olduğu şekilden izlenmektedir. GB2, GB3 ve GB2/3 gibi çoklu GNSS çözümlerinin kullanılması durumunda ZTD kestirim performansının iyileştiği yine şekilden görülebilecek bir diğer husustur.



Şekil 7: Test dönemi boyunca NNOR istasyonundan yedi farklı senaryoda elde edilen dZTD değerleri.

Tablo 4'te yedi farklı PPP senaryosundan elde edilen dZTD değerleri için hesap edilen KOH'lar sunulmaktadır. Burada KOH değerlerinin hesabında 10 günlük test periyodu boyunca elde edilen tüm epok bazlı ZTD değerleri kullanılmıştır. Buradan troposferik kestirim performansının konum belirleme performansına benzer şekilde istasyona bağlı olarak kayda değer şekilde değiştiği gözlenebilir. Buradaki farklılıkların temel olarak istasyon konumu, istasyon yüksekliği, atmosfer koşulları

ve uydu görünürlüğü gibi birçok farklı nedenden kaynaklandığı söylenebilir. İstasyonların büyük çoğunluğu için B3 PPP çözümünün G PPP çözümüne yakın sonuçlar ürettiği ve çoklu GNSS entegrasyonlarıyla G PPP çözümünün önemli ölçüde iyileştirildiği yine Tablo 4'ten izlenmektedir.

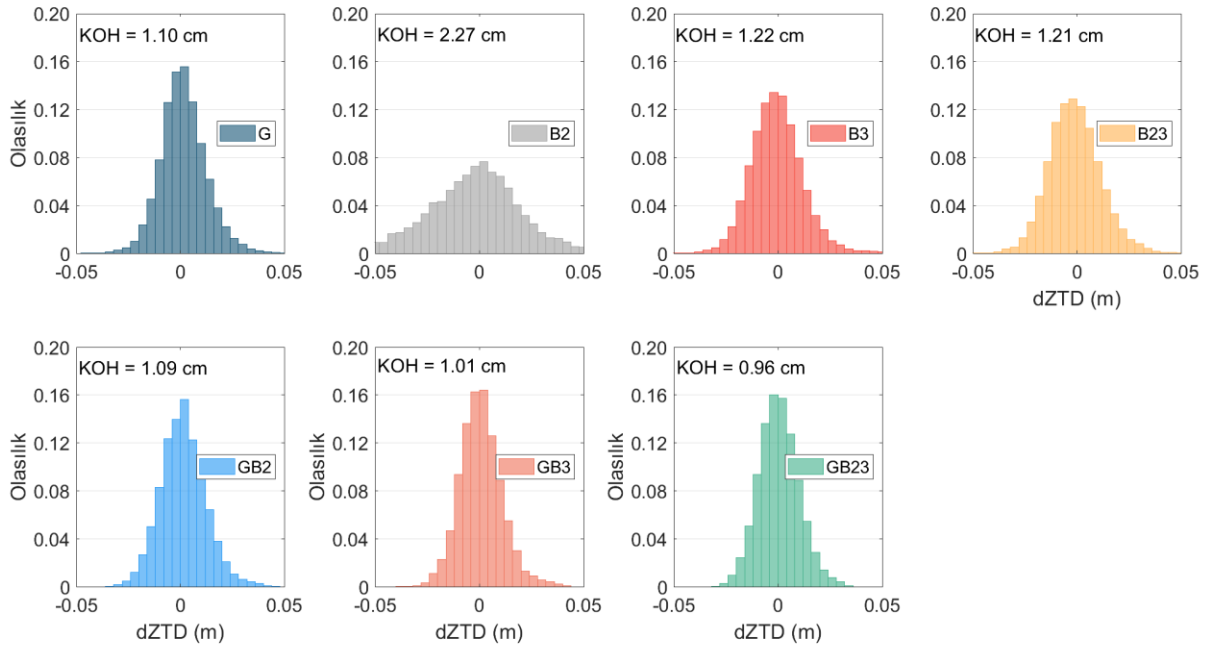
**Tablo 4:** Tüm istasyonlar dikkate alınarak yedi farklı senaryo için PPP çözümlerinden elde edilen dZTD'lere ait KOH değerleri (cm).

İstasyon	PPP Senaryosu						
	G	B2	B3	B23	GB2	GB3	GB23
DAV1	0.68	1.70	0.75	0.87	0.77	0.65	0.71
DJIG	1.82	1.25	2.00	1.28	1.54	1.76	1.37
HOFN	0.75		0.81	0.83	0.67	0.65	0.59
JPLM	1.07		1.05	1.03	1.07	0.95	0.94
KRGG	0.64	2.62	1.49	1.34	0.87	0.79	0.76
LMMF	1.68		1.72	1.69	1.62	1.24	1.26
MAS1	1.21		1.13	1.08	1.19	1.16	1.11
MIZU	0.85	2.17	0.99	1.14	0.84	0.78	0.76
NICO	0.79		0.79	1.43	0.77	0.56	0.64
NNOR	0.80	2.44	0.92	0.97	0.83	0.72	0.75
OHI3	1.01		1.17	1.20	0.99	1.05	1.07
PTGG	1.29	2.95	1.28	1.70	1.58	1.33	1.25
REUN	1.06	2.31	1.36	1.31	1.02	0.99	1.00
UCAL	1.01		0.93	0.92	0.97	0.91	0.89
UNSA	1.03		1.15	1.16	0.97	0.93	0.87

Son olarak Şekil 8 yedi farklı PPP senaryosu için elde edilen epok bazlı dZTD değerlerinin olasılık dağılımlarını göstermektedir. İlgili olasılık dağılımları tüm istasyonlara ait dZTD değerleri dikkate alınarak oluşturulmuştur. Şekilde orijinal frekans değerleri yerine bu frekansların toplam epok sayısına oranından hesaplanan olasılık değerleri sunulmuştur. Şekil 8'de ayrıca ilgili PPP çözümü için hesaplanan dZTD değerlerine ait KOH'lar da yer almaktadır. Tekli sistemlerin dahil edildiği G, B2 ve B3 PPP çözümlerinden sırasıyla 1.10, 2.27 ve 1.22 cm KOH değerleri elde edilmiştir. G PPP ve B3 PPP çözümlerinin troposferik kestirim açısından oldukça uyumlu sonuçlar sunduğu söylenebilir. Ayrıca B2/3 PPP çözümüne ait KOH değeri 1.21cm olarak hesaplanmıştır. Çoklu GNSS çözümlerine gelince GB2, GB3 ve GB2/3 PPP çözümlerinin KOH değerleri sırasıyla 1.09, 1.01 ve 0.96 cm'dir. Bu sonuçlar G PPP çözümü ile kıyaslanınca GB2, GB3 ve GB2/3 PPP çözümlerinin troposferik kestirim performansını sırasıyla %1.0, %7.9 ve %12.6 oranında iyileştirdiği anlamına gelmektedir.

## 5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada 2020 yılı itibarıyla tam olarak faaliyete geçen küresel BeiDou sisteminin (BDS-3) PPP açısından konum belirleme performansının değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Öte yandan bu çalışmada gerek bölgesel BeiDou (BDS-2) gerekse GPS ile kıyaslanarak ve ayrıca bu sistemlerle entegre çözümler aracılığıyla BDS-3'ün PPP konum belirleme performansına olan katkısı da araştırılmıştır. Bu amaçla 21-30 Kasım 2021 tarihleri arasındaki 10 günlük dönem boyunca 15 farklı IGS istasyonundan toplanan gözlem verileri yedi farklı PPP senaryosu altında işlenmiştir. Konum belirleme performansını değerlendirebilmek adına elde edilen PPP çözümleri konum doğruluğu ve yakınsama süresi açısından analiz edilmiştir. Ayrıca ilgili çözümlerden elde edilen troposferik kestirimler de PPP performansının değerlendirilmesi açısından kullanılmıştır.



**Şekil 8:** Yedi farklı PPP senaryosundan elde edilen dZTD değerlerine ait olasılık dağılımları.

Sonuçlar tek sistemin dahil edildiği G, B2 ve B3 PPP çözümlerinin sırasıyla 0.0152, 0.0605 ve 0.0203 m 3B konum doğruluğuna sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu üç çözüm için elde edilen yakınsama süreleri ise 60.94, 261.71 ve 63.06 dakika olarak hesaplanmıştır. Ayrıca ilgili çözümlerin troposferik kestirim doğrulukları da sırasıyla 1.10, 2.27 ve 1.22 cm olarak hesaplanmıştır. Buradan BDS-2 uydularının kullanıldığı B2 çözümünün diğer çözümlere göre oldukça kötü sonuçlara sahip olduğu görülmektedir. Bunun temel nedeni BDS-2 uydu takımının büyük bir bölümünü oluşturan GEO ve IGSO uydularına ait yörünge ve saat bilgilerinin düşük hassasiyetleridir. Ayrıca GPS uydularını içeren G PPP çözümünün en iyi performansı sergilediği ama yine de BDS-3 uydularını içeren B3 PPP çözümünün onunla karşılaştırılabilir sonuçlara sahip olduğu görülmektedir. BDS-2 ve BDS-3 uydularının ortak olarak kullanılması durumunda elde edilecek ortalama konum doğruluğu ve yakınsama süresi sırasıyla 0.0187 m ve 60.63 dakikadır. Ayrıca ilgili çözümden elde edilen troposferik kestirim doğruluğu da 1.21 cm olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla bu sonuçlardan BDS-2 ve BDS-3 entegre kullanılması durumunda çok daha yüksek performansa sahip PPP çözümü elde edilebileceği anlaşılmaktadır. Çoklu GNSS çözümlerine gelince GB2, GB3 ve GB2/3 PPP çözümlerine ait 3B konum doğrulukları 0.0143, 0.0138 ve 0.0136 m olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlardan ilgili çoklu GNSS çözümlerinin G PPP çözümünün konum doğruluğunu sırasıyla %5.9, %9.3 ve %10.6 oranında iyileştirdiği görülmektedir. Ayrıca GB2, GB3 ve GB2/3 PPP çözümleri için ortalama yakınsama süreleri G PPP çözümünden sırasıyla %21.7, %53.2 ve %56.6 oranında daha kısa olan 47.69, 28.49 ve 26.45 dakika olarak hesaplanmıştır. Son olarak bu üç PPP çözümünün troposferik kestirim doğrulukları sırasıyla 1.09, 1.01 ve 0.96 cm olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar GB2, GB3 ve GB2/3 PPP çözümlerinin G PPP çözümünün troposferik kestirim performansını %1.0, %7.9 ve %12.6 oranında iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. BDS-3 uydu takımının tam olarak faaliyete geçtiği ve ayrıca uydu yörünge ve saat bilgilerinin her geçen gün iyileştiği düşünüldüğünde BDS-3'ün GNSS uygulamalarında sıklıkla kullanılacağı düşünülmektedir. Bu nedenle BDS-3'ün tek başına ve diğer sistemlerle entegre şekilde PPP çalışmalarında kullanılması ve performansı yakın gelecekte de önemli bir konu olmaya devam edecektir.

## Çıkar Çatışması Beyanı

Yazar, bu çalışmada bilinen ilgili herhangi bir finansal veya finansal olmayan çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

## Kaynaklar

- 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.
- Alkan, R. M., & Öcalan, T. (2013). Usability of the GPS precise point positioning technique in marine applications. *The Journal of Navigation*, 66(4), 579-588.
- Bahadır, B., & Nohutcu, M. (2018). PPPH: a MATLAB-based software for multi-GNSS precise point positioning analysis. *GPS solutions*, 22(4), 1-10.
- Bahadır, B. (2022). Real-time single-frequency precise positioning with Galileo satellites. *The Journal of Navigation*, 75(1), 124-140.
- Cai, C., & Gao, Y. (2013). Modeling and assessment of combined GPS/GLONASS precise point positioning. *GPS solutions*, 17(2), 223-236.
- Cai, C., Gao, Y., Pan, L., & Zhu, J. (2015). Precise point positioning with quad-constellations: GPS, BeiDou, GLONASS and Galileo. *Advances in space research*, 56(1), 133-143.
- Chen, J., Wang, J., Zhang, Y., Yang, S., Chen, Q., & Gong, X. (2016). Modeling and assessment of GPS/BDS combined precise point positioning. *Sensors*, 16(7), 1151.
- Chen, H., Liu, X., Jiang, W., Yuan, P., Ju, B., & Chen, Y. (2021). Preliminary analysis and evaluation of BDS-2/BDS-3 precise point positioning. *Advances in Space Research*, 68(10), 4113-4128.
- Collins, P., Bisnath, S., Lahaye, F., & Héroux, P. (2010). Undifferenced GPS ambiguity resolution using the decoupled clock model and ambiguity datum fixing. *Navigation: Journal of the Institute of Navigation*, 57(2), 123-135.
- 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.
- Ge, M., Gendt, G., Rothacher, M. A., Shi, C., & Liu, J. (2008). Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations. *Journal of geodesy*, 82(7), 389-399.
- Ge, Y., Ding, S., Qin, W., Zhou, F., & Yang, X. (2020). Carrier phase time transfer with Galileo observations. *Measurement*, 159, 107799.
- Ge, Y., Chen, S., Wu, T., Fan, C., Qin, W., Zhou, F., & Yang, X. (2021). An analysis of BDS-3 real-time PPP: time transfer, positioning, and tropospheric delay retrieval. *Measurement*, 172, 108871.
- Geng, J., Meng, X., Dodson, A. H., Ge, M., & Teferle, F. N. (2010). Rapid re-convergences to ambiguity-fixed solutions in precise point positioning. *Journal of geodesy*, 84(12), 705-714.
- Hadas, T., Kazmierski, K., & Sośnica, K. (2019). Performance of Galileo-only dual-frequency absolute positioning using the fully serviceable Galileo constellation. *GPS Solutions*, 23(4), 1-12.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Waskle, E. (2007). *GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer Science & Business Media.
- Kouba, J., & Héroux, P. (2001). Precise point positioning using IGS orbit and clock products. *GPS solutions*, 5(2), 12-28.
- Kouba, J. (2003). Measuring seismic waves induced by large earthquakes with GPS. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 47(4), 741-755.
- Kouba, J. (2015). A Guide to Using International GNSS Service (IGS) Products. Erişim Adresi: <https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/201271873-A-Guide-to-Using-the-IGS-Products>.
- Landskron, D., & Böhm, J. (2018). VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. *Journal of Geodesy*, 92(4), 349-360.
- Laurichesse, D., Mercier, F., Berthias, J. P., Broca, P., & Cerri, L. (2009). Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP and satellite precise orbit determination. *Navigation*, 56(2), 135-149.
- 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.
- Li, X., Li, X., Liu, G., Xie, W., Guo, F., Yuan, Y., Zhang, K., & Feng, G. (2020). The phase and code biases of Galileo and BDS-3 BOC signals: effect on ambiguity resolution and precise positioning. *Journal of Geodesy*, 94(1), 1-14.
- Liu, X., Jiang, W., Li, Z., Chen, H., & Zhao, W. (2019). Comparison of convergence time and positioning accuracy among BDS, GPS and BDS/GPS precise point positioning with ambiguity resolution. *Advances in Space Research*, 63(11), 3489-3504.
- Lu, C., Li, X., Ge, M., Heinkelmann, R., Nilsson, T., Soja, B., Dick, G., & Schuh, H. (2016). Estimation and evaluation of real-time

- precipitable water vapor from GLONASS and GPS. *GPS solutions*, 20(4), 703-713.
- Lv, Y., Geng, T., Zhao, Q., Xie, X., & Zhou, R. (2020). Initial assessment of BDS-3 preliminary system signal-in-space range error. *GPS Solutions*, 24(1), 1-13.
- Lv, J., Gao, Z., Kan, J., Lan, R., Li, Y., Lou, Y., Yang, H., & Peng, J. (2022). Modeling and assessment of multi-frequency GPS/BDS-2/BDS-3 kinematic precise point positioning based on vehicle-borne data. *Measurement*, 189, 110453.
- Odolinski, R., Teunissen, P. J. G., & Odijk, D. (2014). First combined COMPASS/BeiDou-2 and GPS positioning results in Australia. Part II: Single-and multiple-frequency single-baseline RTK positioning. *Journal of Spatial Science*, 59(1), 25-46.
- Pan, L., Zhang, X., Liu, J., Li, X., & Li, X. (2017). Performance evaluation of single-frequency precise point positioning with GPS, GLONASS, BeiDou and Galileo. *The journal of navigation*, 70(3), 465-482.
- Paziewski, J., Sieradzki, R., & Baryla, R. (2018). Multi-GNSS high-rate RTK, PPP and novel direct phase observation processing method: Application to precise dynamic displacement detection. *Measurement Science and technology*, 29(3), 035002.
- Saastamoinen, J. (1972). Contributions to the theory of atmospheric refraction. *Bulletin Géodésique (1946-1975)*, 105(1), 279-298.
- Teunissen, P. J., & Montenbruck, O. (Ed.). (2017). *Springer handbook of global navigation satellite systems*. New York, NY, USA: Springer International Publishing.
- Xu, P., Shu, Y., Liu, J., Nishimura, T., Shi, Y., & Freymueller, J. T. (2019). A large scale of apparent sudden movements in Japan detected by high-rate GPS after the 2011 Tohoku Mw9. 0 earthquake: Physical signals or unidentified artifacts?. *Earth, Planets and Space*, 71(1), 1-16.
- 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.
- Zhang, B., Teunissen, P. J., 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.
- Zhang, Z., Li, B., Nie, L., Wei, C., Jia, S., & Jiang, S. (2019). Initial assessment of BeiDou-3 global navigation satellite system: Signal quality, RTK and PPP. *GPS Solutions*, 23(4), 1-12.
- Zhao, W., Chen, H., Gao, Y., Jiang, W., & Liu, X. (2020). Evaluation of inter-system bias between BDS-2 and BDS-3 satellites and its impact on precise point positioning. *Remote Sensing*, 12(14), 2185.
- Zhu, Y., Zheng, K., Cui, X., Zhang, Q., Jia, X., Zhang, M., & Fan, S. (2021). Preliminary analysis of the quality and positioning performance of BDS-3 global interoperable signal B1C&B2a. *Advances in Space Research*, 67(8), 2483-2490.
- 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.
- URL-1: BDS Constellation Status, <http://www.csno-tarc.cn/en/system/constellation> (Erişim Tarihi: 30 Mart 2022).