

Gerçek Zamanlı Troposferik Gecikme Kestirimi için Çoklu-GNSS Hassas Nokta Konumlama Tekniğinin Kullanımı

(Employment of Multi-GNSS Precise Point Positioning for Real-Time Tropospheric Delay Estimation)

Berkay BAHADUR 

Hacettepe Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 06800, Çankaya, Ankara
berkaybahadur@hacettepe.edu.tr

Geliş Tarihi (Received): 19.10.2021

Kabul Tarihi (Accepted): 12.01.2022

ÖZ

Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning, PPP) troposferik gecikme kestirimi çalışmalarında yaygın olarak kullanılan GNSS (Global Navigation Satellite Systems) tekniklerinden bir tanesidir. IGS (International GNSS Service) gerçek zamanlı ürünlerin kullanıma açılmasıyla PPP tekniğinin gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılması mümkün hale gelmiştir. Son yıllarda ortaya çıkan yeni navigasyon sistemleri gerçek zamanlı PPP çözümlerinin performansını iyileştirmek için önemli fırsatları da beraberinde getirmektedir. Özellikle Galileo ve BeiDou (BDS) sistemlerinin uydu takımları son yıllarda önemli oranda genişlemiş ve aynı zamanda uydu yörünge ve saat ürünlerinde de önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Bu gelişmeler ışığında yeni ortaya çıkan sistemlerin gerçek zamanlı troposferik gecikme kestirimi çalışmalarında kullanılması GNSS kullanıcıları arasında oldukça ilgi gören bir konudur. Bu çalışmanın temel amacı GPS, GLONASS, Galileo ve BDS olmak üzere dört küresel uydu sisteminin PPP ile gerçek zamanlı toplam zenit gecikme (zenith total delay, ZTD) kestiriminde en güncel performansının değerlendirilmesidir. Bu amaçla 2021 kış ve yaz dönemlerinden birer ay olmak üzere iki farklı test periyodu için toplamda 20 IGS istasyonunun dahil edildiği bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamada dört küresel sistemin tekli PPP çözümlerine ek olarak hepsinin ortak olarak kullanıldığı çoklu-GNSS çözümüne de yer verilmiştir. PPP çözümlerinden elde edilen troposfer kestirimleri IGS tarafından yayınlanan troposfer gecikmeleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar GPS ve Galileo çözümlerinin PPP ile gerçek zamanlı ZTD kestirimi açısından birbirleriyle kıyaslanabilir performanslara sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca GLONASS ve BDS çözümlerinin gerçek zamanlı ZTD kestirimi performansı bu iki sistemin önemli ölçüde gerisinde kalmıştır. Son olarak çoklu-GNSS PPP çözümü tekli çözümlerle kıyaslandığında ZTD kestirimi performansını kayda değer oranda artırmaktadır. Çoklu-GNSS çözümü, GPS çözümü ile kıyaslandığında yaz ve kış dönemlerinde ZTD kestirimi için sırasıyla %14,1 ve %12,5 oranında daha yüksek doğruluk sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Çoklu-GNSS, PPP, Gerçek Zamanlı, Troposfer, Toplam Zenit Gecikme

ABSTRACT

Precise Point Positioning (PPP) is one of the GNSS techniques commonly used in the applications of

tropospheric delay estimation. The use of PPP in real-time applications has been possible with the initialization of IGS (International GNSS Service) products. In recent years, the emergence of new satellite systems has brought along considerable opportunities to improve the performance of real-time PPP solutions. Especially, the constellations of Galileo and BeiDou (BDS) have recently extended, and, at the same time, significant advances have been made in their satellite orbit and clock products. In the light of this progress, the employment of newly-emerged systems in the applications of real-time tropospheric delay estimation is a topic which is taken considerable interest within the GNSS users. The main objective of this study is to evaluate the latest performance of four constellations, namely GPS, GLONASS, Galileo, and BDS, in real-time zenith total delay (ZTD) estimation. For this purpose, an experimental test, including 20 IGS stations for two test periods as 2021 winter and summer, has been conducted. In addition to single PPP solutions for four global systems, this experiment also contains the multi-GNSS solution where all systems are used together. The troposphere estimations acquired from the PPP solutions have been compared with the tropospheric delays provided by IGS. Results have shown that GPS and Galileo have comparable performances in terms of real-time ZTD estimation with PPP. Besides, the real-time ZTD estimation performance of GLONASS and BDS solutions has been left behind these two systems substantially. Finally, the multi-GNSS solution considerably enhances the performance of ZTD estimation when compared with the single system solutions. The multi-GNSS solution has provided better accuracies by the ratios of 14.1% and 12.5% for ZTD estimation in winter and summer periods in comparison to the GPS solution.

Keywords: Multi-GNSS, PPP, Real-Time, Troposphere, Total Zenith Delay

1. GİRİŞ

Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri'nde (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) kullanılan elektromanyetik sinyaller atmosferden önemli ölçüde etkilenir. Atmosferin farklı katmanları farklı kırıcılık indislerine sahip olduğu için GNSS sinyallerinin atmosfer içindeki yayılımı boşlukta olması gerekenden farklı bir yol izler. Dolayısıyla bu durum, GNSS sinyallerinin uydudan çıkıp alıcıya varıncaya dek geçirdiği

sürenin de farklılaşmasına neden olmaktadır. Genel olarak GNSS sinyalleri üzerindeki atmosfer etkisi troposfer ve iyonosfer olmak üzere iki gruba ayrılır. Atmosferdeki iyonize olmuş parçacıkları içeren iyonosfer katmanının GNSS sinyalleri üzerine olan etkisi kullanılan sinyalin frekansına bağlı olduğundan çift frekanslı sinyal kombinasyonları kullanılarak giderilebilir. Ancak bu durum atmosferdeki su buharı miktarının büyük bir çoğunluğunu içeren troposfer katmanının GNSS sinyalleri üzerindeki etkisi için geçerli değildir. GNSS sinyallerindeki troposferik gecikme, kullanılan sinyalin frekansına bağlı olmadığı için sinyal kombinasyonları kullanılarak giderilemez ve bu nedenle deneysel modeller kullanılarak düzeltilmesi gerekmektedir (Teunissen ve Montenbruck, 2017). Hassas GNSS uygulamalarında yüksek konum doğruluğuna ulaşabilmek için düzeltilmesi gereken bir hata kaynağı olarak görülen troposfer etkisi aynı zamanda doğrudan navigasyon sinyalleri kullanılarak türetilen bir büyüklüktür. Dolayısıyla GNSS sinyalleri, sinyal yolu boyunca atmosferdeki su buharı miktarı hakkında bilgi sunan troposferik gecikmenin elde edilmesinde kullanılabilir. GNSS ile türetilen bu gecikmeler farklı meteorolojik parametreler ile entegre edilerek yağışa dönüşebilir su buharı (precipitable water vapor, PWV) değerinin elde edilmesinde kullanılmaktadır (Bevis ve diğerleri, 1994; Lee, Kouba, Schutz, Kim, ve Lee, 2013). Bu yolla GNSS sinyalleri atmosferdeki su buharı içeriğinin tespitinde yüksek konumsal ve zamansal çözünürlükte her türlü hava koşulunda kullanılabilecek önemli bir veri kaynağı olarak düşünülebilir. Özellikle GNSS sinyalleri aracılığıyla elde edilen toplam zenit gecikme (zenith total delay, ZTD) sayısal hava tahmin (numerical weather prediction, NWP) modellerine entegre edilerek modelin hava tahmin performansını iyileştirilmek için kullanılmaktadır (De Haan, 2013; Wilgan, Rohm ve Bosy, 2015).

Son yıllarda geleneksel GNSS konum belirleme tekniklerine bir alternatif olarak ortaya çıkan Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning, PPP) troposferik gecikme tahmini için de kullanılmaktadır. Bu tekniğin en büyük avantajı küresel bir ağdan elde edilen uydu yörünge ve saat bilgilerini kullanarak referans istasyon ihtiyacını ortadan kaldırmasıdır (Zumberge, Heflin, Jefferson, Watkins, ve Webb, 1997). Uzun yıllardır Uluslararası GNSS Servisi (International GNSS Service, IGS) tarafından sağlanan hassas ürünler PPP çözümlerinin gerçekleştirilmesinde kullanılmaktadır (Kouba ve Héroux, 2001). Ancak IGS tarafından sağlanan hassas ürünler yaklaşık iki haftalık bir gecikme ile yayımlandığından bu

ürünlerin gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılması mümkün değildir. GNSS uygulamalarında gerçek zamanlı çözümlerin artan popülerliğine paralel olarak IGS 2013 yılında kendi gerçek zamanlı servisini başlatmıştır (Hadas and Bosy, 2015). Bu servis aracılığıyla sağlanan uydu yörünge ve saat bilgileri sayesinde gerçek zamanlı PPP çözümü mümkün hale gelmiştir. Bu tarihten itibaren PPP çözümü ile gerçek zamanlı troposferik gecikme kestirimi üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, GPS uydularının dahil edildiği gerçek zamanlı PPP çözümü ile ZTD tahmininde 5 ila 20 mm arasında bir doğruluk elde edilebileceğini ortaya koymuştur (Dousa ve Vlacovic, 2014; Hadas, Teferle, Kazmierski, Hordyniec ve Bosy, 2017; Zhao, Yao, Yao ve Li, 2018). Gerçek zamanlı PPP çözümlerinden elde edilecek doğruluk doğrudan uydu yörünge ve saat düzeltmelerinin doğruluğu ile ilişkilidir. Bu günlerde, IGS gerçek zamanlı ürünlerin doğruluğunun hassas ürünlere kıyasla önemli ölçüde daha düşük olduğu söylenebilir (<https://igs.org/products/>). Bu durum gerçek zamanlı PPP uygulamalarının güncel en büyük problemlerinden bir tanesidir. Ancak son zamanlarda ortaya çıkan yeni navigasyon sistemlerinin bir arada kullanılması, bir diğer deyişle çoklu-GNSS, PPP ile gerçek zamanlı ZTD kestiriminin doğruluğunu iyileştirmek adına önemli fırsatları beraberinde getirmektedir. Özellikle, sırasıyla Avrupa Uzay Ajansı ve Çin tarafından geliştirilen Galileo ve BeiDou (BDS) küresel navigasyon sistemleri son yıllarda kullanılabilir uydu sayılarını önemli miktarda arttırmıştır. Bu sistemlerin yakın gelecekte tam kapasiteyle hizmete geçmeleri beklenmektedir. Son zamanlarda yapılan birçok çalışma çoklu-GNSS entegrasyonlarının kullanılmasıyla gerçek zamanlı ZTD kestiriminin performansının kayda değer oranda iyileştirilebileceğini ortaya koymuştur (Li ve diğerleri, 2015a; Lu ve diğerleri, 2017; Pan ve Guo, 2018). Ayrıca bu sistemler artan uydu sayıları ile birlikte diğer sistemlerden bağımsız olarak kendi başlarına da ZTD kestirimi uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır (Hadas ve Hobiger, 2020; Ge ve diğerleri, 2021).

Galileo ve BDS gibi yeni navigasyon sistemlerine ait kullanılabilir uydu sayıları her geçen gün artmaktadır. Diğer taraftan, yer istasyonlarının sayısının artması ve kullanılan modellerdeki iyileşmeler sayesinde uydu yörünge ve saat bilgilerinde de önemli gelişmeler kaydedilmektedir. Artan uydu sayıları ve iyileştirilen ürünlerle beraber bu sistemler GNSS bazlı uygulamalar açısından var olan sistemlere önemli birer alternatif haline dönüşmüştür. Bu nedenle yeni ortaya çıkan sistemlerin GNSS

uygulamalarındaki en güncel performansları takip edilmesi gereken önemli bir konudur. Bu gelişmeler ışığında gerek bu sistemlerin kendi bağımsız çözümleri gerekse diğer navigasyon sistemleri ile kombinasyonları ile oluşturulan çoklu-GNSS çözümlerinin PPP ile gerçek zamanlı ZTD kestiriminde kullanılması GNSS topluluğunda giderek ilgi gören önemli bir konu haline gelmiştir. Dolayısıyla bu çalışmanın en temel amacı GPS, GLONASS, Galileo ve BDS olmak üzere dört küresel uydu sisteminin PPP ile gerçek zamanlı ZTD kestirimi açısından güncel performanslarının değerlendirilmesidir. Ayrıca, bu çalışma kapsamında bu dört sistemin ortak olarak kullanıldığı çoklu-GNSS PPP çözümü gerçek zamanlı ZTD kestirimi için kullanılarak performans değerlendirmesine dahil edilmiştir.

2. PPP İLE TROPOFERİK GECİKME KESTİRİMİ

PPP tekniğinde çift frekanslı kod ve faz gözlemlerinin iyonosferden bağımsız (İB) doğrusal kombinasyonları ölçü modeli olarak kullanılmaktadır. Bunun yanında PPP tekniğinde uydu yörünge ve saat hataları hassas veya gerçek zamanlı IGS ürünleri kullanılarak ortadan kaldırılmaktadır. IGS ürünleri kullanılırken dikkat edilmesi gereken en önemli konu bu ürünlerde sunulan saat düzeltmelerinin belirli bir sinyal ya da sinyal kombinasyonu baz alınarak üretiliyor olmasıdır. Örneğin, GPS ve GLONASS uyduları için saat düzeltmeleri, L1 ve L2 sinyalleri üzerindeki kod gözlemlerinin İB kombinasyonları kullanılarak elde edilmektedir (Teunissen ve Montenbruck, 2017). Benzer şekilde Galileo uyduları için E1 ve E5a, BDS uyduları için de B1 ve B2 sinyallerinden elde edilen kod gözlemlerinin İB kombinasyonları saat düzeltmelerinin üretilmesinde referans olarak kullanılmaktadır (Steigenberger ve diğerleri, 2015). Dolayısıyla IGS tarafından sağlanan saat düzeltmeleri ilgili uyduya ait saat hatasına ek olarak İB kombinasyona ait uydu kod donanım hatasını da içermektedir. IGS ürünleri kullanıldığında İB kombinasyona ait uydu kod donanım hataları orijinal uydu saat hatasına yüklenerek düzeltilebilir. Öte yandan alıcıya ait kod donanım hataları aralarındaki yüksek korelasyon nedeniyle alıcı saat hatasıyla birlikte kestirilir (Kouba ve Héroux, 2001). IGS ürünleri arasında faz donanım hatalarını içeren ayrı ürünler olmadığı için uydu ve alıcıya ait faz donanım hataları belirsizlik parametresine yüklenerek tek bir bilinmeyen olarak değerlendirilir. Tüm bunların ışığında Çift-frekanslı ($i = 1,2$) kod (P) ve faz (L) gözlemleri için İB kombinasyonları aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

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

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

ve

$$c\overline{dt}_r^s = cdt_r^s + b_{IB,r}^s, c\overline{dT}^{s,k} = cdT^{s,k} + b_{IB}^{s,k} \quad (3)$$

$$\overline{N}_{IB}^{s,k} = N_{IB}^{s,k} + (B_{IB,r}^s - b_{IB,r}^s) + (B_{IB}^{s,k} - b_{IB}^{s,k}) \quad (4)$$

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

(1) ve (2) eşitlikleri standart PPP tekniğinin ölçü modelini oluşturur. Burada uydu saat hataları IGS ürünleri kullanılarak düzeltilir. Böylelikle bu modelin bilinmeyen parametreleri üç adet konum bileşeni, bir alıcı saat hatası, bir troposferik gecikme ve gözlenen her uydu için bir belirsizlik parametresinden oluşmaktadır. Eşitliklerden de görüleceği üzere sistemlerin zaman ölçekleri farklı olduğu için alıcı saat hatası uydu sistemine özel olarak tanımlanmıştır. Birden fazla navigasyon sisteminin dahil edildiği ortak çözümlerde bir referans zaman ölçeği seçilerek diğer sistemler için ilave bir sistemler arası fark parametresinin tanımlanması gerekmektedir (Cai ve Gao, 2013). Çoklu-GNSS uygulamalarında genellikle GPS zaman ölçeği referans seçilir ve eklenen diğer sistemlere alıcı saatinin GPS zaman ölçeğinden olan farkını yansıtan sistemler arası fark parametresi tanımlanır (Li ve diğerleri, 2015b; Abd Rabbou, El-Shazly ve Ahmed, 2018).

PPP tekniğinde diğer uydu jeodezisi tekniklerine benzer şekilde troposfer etkisi kuru ve ıslak olmak üzere iki farklı bileşene ayrılarak ele alınmaktadır. Troposferin kuru bileşeni istasyon

konumu ve atmosferik parametrelere bağlı olarak deneysel modeller aracılığıyla elde edilebilirken ıslak bileşeni modellemek oldukça zordur. Bunun temel sebebi atmosferdeki su buharı miktarında hava olayları nedeniyle meydana gelen hızlı değişimlerdir. Dolayısıyla GNSS sinyalleri üzerindeki troposfer etkisinin kuru bileşeni zenit açısı doğrultusunda modellenip ilgili sinyal doğrultusuna indirgenerek düzeltilebilirken ıslak bileşen ise ilave bir bilinmeyen parametre olarak tahmin sürecinde kestirilmektedir. Bu sayede GNSS sinyalleri kullanılarak troposfer ile ilgili önemli bilgilerin çıkarılması mümkün olmaktadır. Troposferik gecikme, bir iz düşüm fonksiyonu aracılığıyla zenit doğrultusu boyunca aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilir (Davis, Herring, Shapiro, Rogers ve Elgered, 1985).

$$T_r^{s,k} = M_K(E)ZTD_K + M_I(E)ZTD_I \quad (5)$$

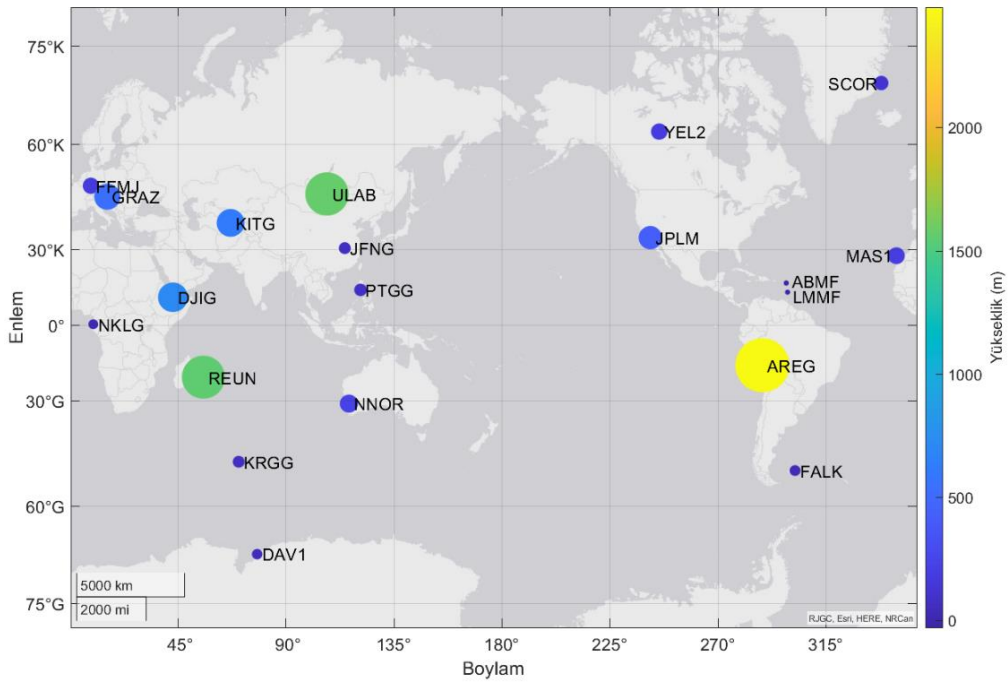
burada ZTD_K ve ZTD_I sırasıyla kuru ve ıslak troposferik gecikmeyi, M_K ve M_I ise uydunun yükselim açısına (E) bağlı olarak tanımlanmış iz düşüm fonksiyonunun kuru ve ıslak bileşenlerini ifade etmektedir. Bu çalışmada troposferin kuru bileşenini elde etmek için Saastamoinen (1972) modeli VMF3 (Vienna Mapping Function 3) ve GPT3 (Global Pressure and Temperature 3) modelleriyle birlikte kullanılmıştır (Landskron ve Böhm, 2018). Daha önce belirtildiği üzere troposferin kuru bileşeni ise yine VMF3 kullanılarak zenit doğrultusunda ilave bir bilinmeyen olarak kestirilmiştir.

3. UYGULAMA

Bu bölümde çalışma kapsamında gerçekleştirilen uygulamalar ve elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde sunulacaktır. Sonuçlardan önce uygulamada kullanılan veri seti ve PPP çözümü için uygulanan işlem stratejileri kapsamlı bir şekilde açıklanmıştır.

a. Veri Seti

Çalışma kapsamında 2021 yılının kış ve yaz ayları içerisinde iki test dönemi belirlenmiştir. İlk dönem 2021 yılının ocak ayına ait 31 ardışık günü içerirken ikinci test dönemi aynı yılın temmuz ayına ait 31 ardışık günden oluşmaktadır. Bu iki periyot çalışmanın geri kalanında 2021 ocak ve temmuz dönemleri olarak adlandırılacaktır. Uygulamalarda kullanılmak üzere 20 adet IGS MGEX (Multi-GNSS Experiment) istasyonu belirlenmiştir. Bu istasyonların hepsi GPS, GLONASS, Galileo ve BDS uydularına ait gözlemleri toplayabilen çoklu-GNSS alıcılara sahiptir. Ayrıca ilgili istasyonlar coğrafi konumları dikkate alınarak tüm dünyaya olabildiğince eşit dağılacak ve farklı yüksekliklere sahip olacak şekilde belirlenmiştir. Seçilen istasyonların isimleri, coğrafi konumları ve yükseklikleri Şekil 1'de sunulmuştur. İstasyonların elipsoidal yükseklikleri -27,10 ile 2489,40 m arasında değişmektedir. En düşük yükseklik LMMF istasyonuna aitken en büyük yükseklik AREG istasyonuna aittir.



Şekil 1. Kullanılan IGS istasyonlarının coğrafi konumları ve yükseklikleri.

Diğer taraftan PPP gibi mutlak konum belirleme teknikleri için görünür uydu sayısı ve geometrisi çözüm performansına etki eden en önemli faktörlerin başında gelmektedir. Bu nedenle dört küresel sistemin uydu takımlarının son durumunu inceleyebilmek için seçilen istasyonlarda GPS, GLONASS, Galileo ve BDS uydu görünürlükleri araştırılmıştır. Şekil 2’de seçilen IGS istasyonlarında iki farklı test dönemi için epok başına düşen ortalama görünür uydu sayıları dört küresel sistem için verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere seçilen dönemler birbirine oldukça yakın tarihler olduğu için iki test dönemi arasında uydu görünürlüğü açısından önemli bir fark bulunmamaktadır. GPS, GLONASS ve Galileo uydu takımları açısından istasyonlar arasında ortalama uydu sayıları istasyon konumuna göre ufak değişiklikler gösterse dahi birbirlerine oldukça yakındır. Ancak BDS uydu takımı için ortalama uydu sayıları istasyona göre önemli ölçüde değişmektedir. Asya-Pasifik bölgesi yakınında yer alan PTGG, NNOR ve JFNG gibi istasyonlarda ortalama BDS görünür uydu sayısı 12’nin üzerine çıkmıştır. Bunun en önemli nedeni yalnızca bu bölgede kullanılabilir olan BDS GEO (Geostationary Earth Orbit) uydularının varlığıdır. Dolayısıyla Asya-Pasifik bölgesi yakınında yer alan istasyonlarda BDS, uydu görünürlüğü açısından GPS uydu takımını geride bırakmıştır. Yine de BDS GEO uydularının uydu yörünge ve saat bilgilerinin diğer uydulara göre oldukça düşük doğruluğa sahip olduğu hatırlatılmalıdır. Öte yandan Galileo ve BDS uydu takımlarının istasyonların tamamında kendi başlarına PPP çözümü gerçekleştirebilecek görünür uydu sayısına ulaştığı şekilden gözlemlenebilir. Son olarak neredeyse tüm istasyonlar için en düşük uydu görünürlüğüne GLONASS uydu takımının sahip olduğu söylenmelidir.

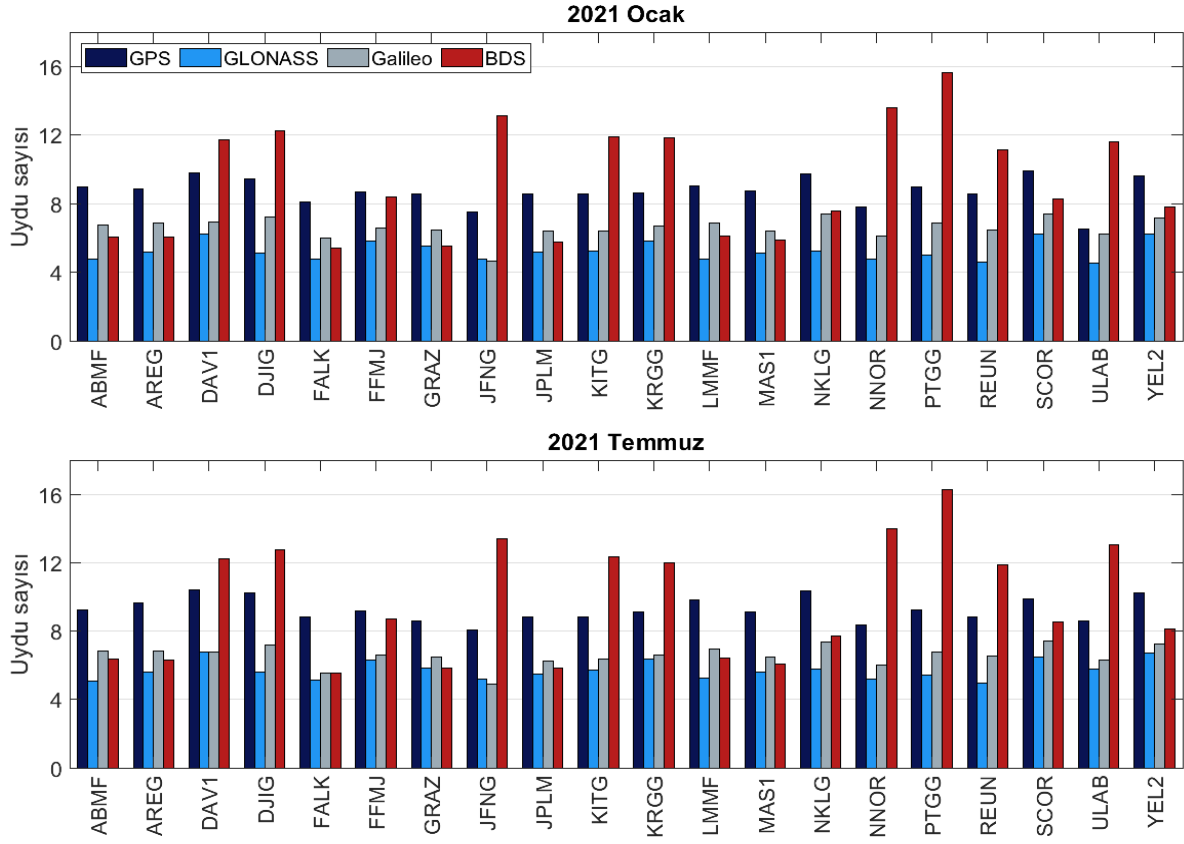
b. PPP İşlem Stratejisi

Bu çalışmada IGS gerçek zamanlı servisi aracılığıyla yayınlanan ve CNES (Centre National d’Etudes Spatiales) analiz merkezi tarafından üretilen uydu yörünge ve saat düzeltmeleri kullanılmıştır (SSRA00CNE0). Gerçek zamanlı IGS ürünleri ve istasyonlara ait gözlemler BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie) tarafından sağlanan NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) istemci programı BNC ile anlık olarak elde edilmiştir (BKG, 2021). IGS gerçek zamanlı ürünleri, navigasyon mesajı yardımıyla elde edilen uydu yörünge ve saat hatalarına düzeltme olarak sunulmaktadır. Dolayısıyla ilgili bağlantı aracılığıyla sistemlere ait navigasyon mesajları da elde edilmiştir. Gerçek

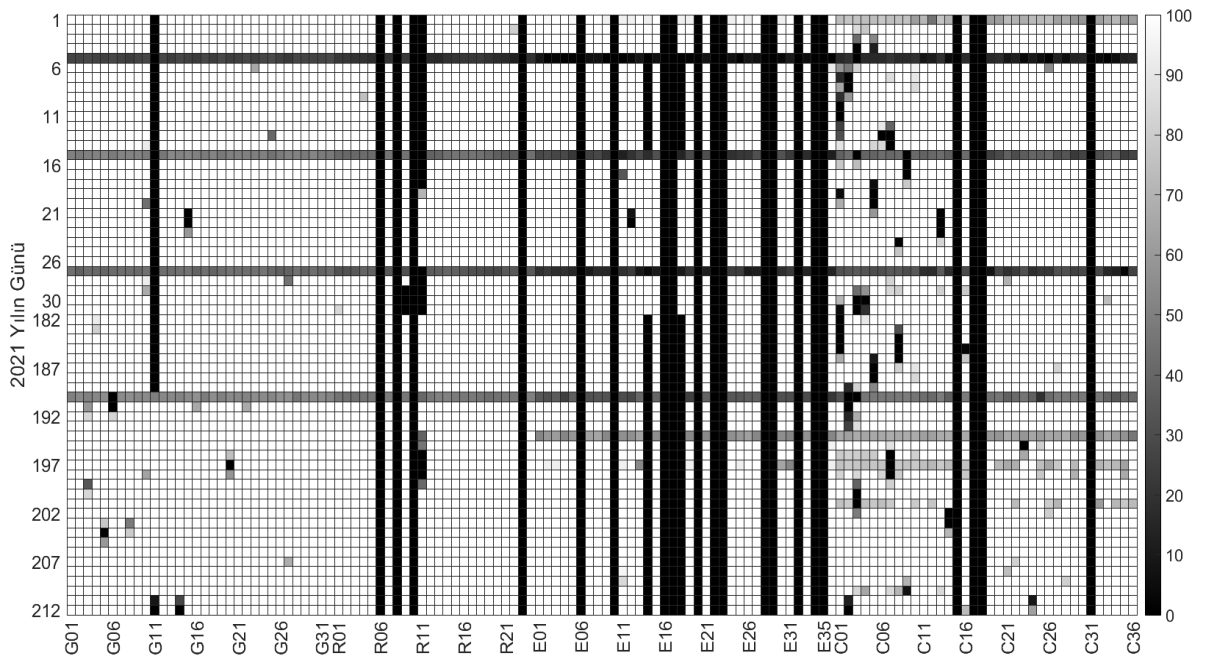
zamanlı uydu yörünge ve saat düzeltmelerinin mevcudiyeti uydu sistemine ve işlem zamanına göre farklılıklar gösterebilmektedir. Bu nedenle uygulama için seçilen test dönemleri için GPS, GLONASS, Galileo ve BDS uydularına ait gerçek zamanlı ürünlerin mevcudiyeti Şekil 3’te sunulmuştur. İlgili şekilde IGS gerçek zamanlı ürünlerinde uydu yörünge ve saat düzeltmesi sunulan tüm uydular yer almaktadır. Şekilden görüleceği üzere belirli günlerde (5., 15., 27. ve 190.) ürün mevcudiyeti oldukça düşüktür. Bunun temel nedeni servis sağlayıcısından kaynaklanan geçici sistem arızalarıdır. Dolayısıyla bu günlerin önemli bir bölümünde gerçek zamanlı uydu yörünge ve saat düzeltmelerine erişmek mümkün değildir. Ayrıca test dönemleri boyunca bazı uydular için gerçek zamanlı ürünler bulunmamaktadır. Bunların birçoğu zaten halihazırda kullanılabilir durumda olmayan uydulardır. Tüm test dönemi incelendiğinde GPS uydularının en yüksek ve BDS uydularının ise en düşük ürün mevcudiyet yüzdelere sahip olduğu görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında PPP çözümleri, PPPH yazılımının gerçek zamanlı çözümlere olanak sağlayan gelişmiş bir versiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Bahadır ve Nohutcu, 2018). GPS ve GLONASS uyduları için L1 ve L2, Galileo uyduları için E1 ve E5a, BDS uyduları için de B1 ve B2 sinyalleri üzerindeki kod ve faz gözlemleri kullanılarak oluşturulan çift frekanslı İB doğrusal kombinasyonlar kullanılmıştır. Yükselim açısı 5 derecenin altındaki uydular çözüme dahil edilmemiştir. Daha önce belirtildiği üzere CNES tarafından sağlanan gerçek zamanlı ürünler uydu yörünge ve saat düzeltmesini elde etmek için kullanılmıştır. Bu versiyonda GPT/VMF modellerinin çeşitli versiyonları kullanılabilmesine rağmen troposferin kuru bileşenini düzeltmek için en güncel model olan GPT3/VMF3, Saastamoinen modeliyle birlikte kullanılmıştır. Troposferin ıslak bileşeni ise $10^{-8} m^2s^{-1}$ ’lik bir spektral yoğunluk değeri kullanılarak epok bazlı kestirilmiştir. Alıcı anten faz merkezi ve değişimi güncel IGS anten modeli (igs14.atx) kullanılarak düzeltilmiştir. Yine rölativistik etkiler, faz dönüklüğü, katı Yer gelgiti ve okyanus yüklemesi uygun modeller kullanılarak düzeltilmiştir (Kouba, 2015). Kod ve faz gözlemleri için seçilen standart sapma değerleri sırasıyla 0,3 ve 0.003 m’dir. Uygulanan FDMA (Frequency Division Multiple Access) metodu frekanslar-arası sapmalar içerdiği için GLONASS uydularına ait kod gözlemlerinin standart sapma değerleri 0,6 m olarak seçilmiştir (Wanninger, 2012; Cai ve Gao, 2013; Guo, Li, Zhang ve Wang, 2017). Son olarak uydu yörünge ve saat bilgilerinin önemli ölçüde düşük doğruluğa sahip olması nedeniyle BDS

GEO uydularına ait kod ve faz gözlemleri için standart sapmalar kullanılan değerlerin 10 katı olacak şekilde belirlenmiştir (Kazmierski, Hadas ve Sośnica, 2018; Wang ve diğerleri, 2019).



Şekil 2. GPS, GLONASS, Galileo ve BDS için seçilen istasyonlarda epok başına düşen ortalama görünür uydu sayıları.



Şekil 3. Test dönemleri boyunca IGS gerçek zamanlı ürünlerinin günlük mevcudiyet yüzdeleri.

c. ZTD Kestirim Sonuçları

Bu bölümde PPP ile gerçek zamanlı kestirilen troposfer sonuçları değerlendirilecektir. Bu amaçla 2021 ocak ve temmuz dönemlerine ait gözlem verileri önceki bölümde açıklanan işlem stratejileri uyarınca PPPH yazılımı kullanılarak işlenmiştir. Burada GPS (G), GLONASS (R), Galileo (E) ve BDS (C) çözümlerine ek olarak dört sistemin ortak kullanıldığı çoklu-GNSS (M) çözümü ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. PPP çözümlerinden elde edilen epok bazlı troposferik ıslak bileşen ile kuru bileşen toplanarak toplam zenit gecikmesi, yani ZTD değerleri PPP çözümünün gerçekleştiği her epok için elde edilmiştir. PPP çözümlerini karşılaştırmak adına IGS tarafından yayınlanan hassas ZTD ürünleri referans olarak kullanılmıştır. Örnek olarak, JPLM ve NNOR istasyonları için yılın 1. ve 182. günlerine ait PPP çözümlerinden elde edilen ZTD kestirimleri IGS ürünlerinden elde edilen ZTD değerleri ile Şekil 4'te sunulmuştur. Şekilden anlaşılabileceği üzere PPP çözümlerinden elde edilen ZTD değerleri belirsizlik çözümü için gerekli olan yakınsama süresi nedeniyle başlangıçta IGS ürünlerinden önemli ölçüde sapmaktadır. Yakınsama süresinin ardından PPP çözümlerinden elde edilen ZTD değerlerinin IGS ürünlerine önemli ölçüde uyum gösterdiği söylenebilir. Diğer taraftan PPP çözümlerinden elde edilen ZTD değerlerinin istasyona ve zamana bağlı olarak kayda değer değişiklikler gösterebileceği yine şekilden gözlemlenmektedir. Farklı sistemlerin tekli PPP çözümleri arasında ZTD kestirimi açısından bazı performans farklılıklarının olduğu da şeklin ortaya koymuş olduğu bir diğer husustur.

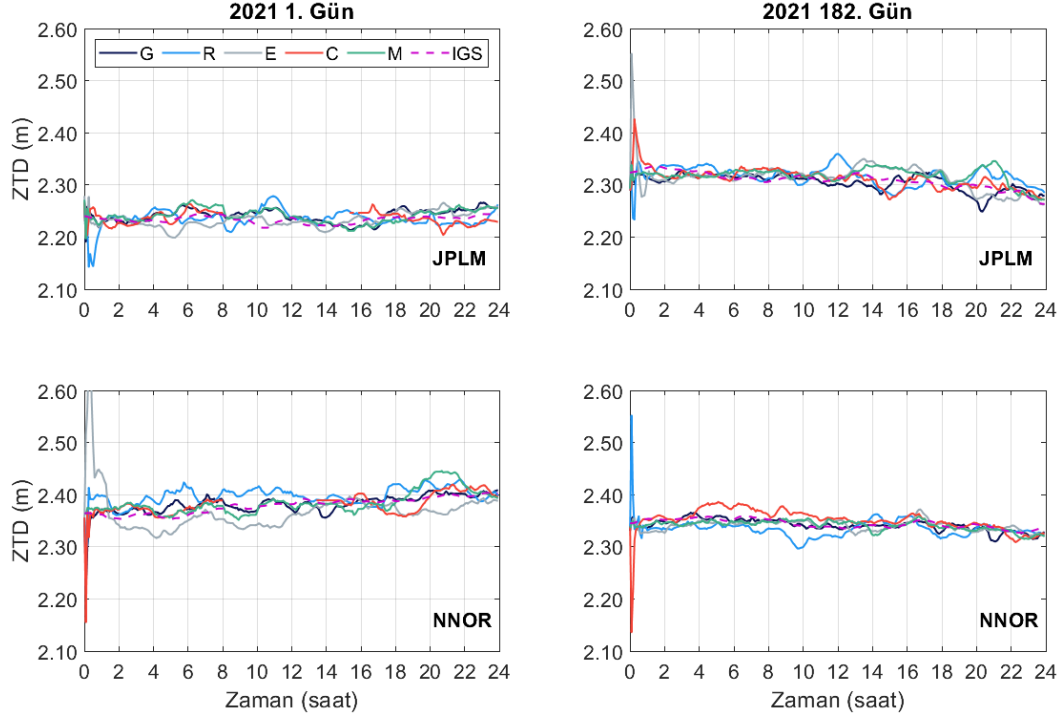
Diğer yandan PPP çözümlerinin ZTD kestirim performanslarını değerlendirebilmek için ilgili çözüm ile IGS hassas ürünlerinden elde edilen ZTD değerleri arasındaki farklar (dZTD) hesaplanmıştır. IGS ZTD ürünlerinin veri aralığı 300 saniye olduğu için dZTD değerleri yalnızca ilgili epoklarda PPP çözümlerinden elde edilen değerler kullanılarak hesaplanmıştır. Yine JPLM ve NNOR istasyonları için tüm test dönemi boyunca farklı PPP çözümleri için hesaplanan dZTD değerleri Şekil 5'te sunulmuştur. Gerçek zamanlı ürünlerde, gözlem dosyalarında ve IGS ZTD ürünlerindeki bazı eksiklikler nedeniyle dZTD değeri elde edilemediği bazı durumlar nedeniyle şekilde bazı boşluklar mevcuttur. Bu çalışmada kestirim performansını değerlendirebilmek için RMS (Root Mean Square) hataları hesaplanmıştır. Bu hatanın Karesel Ortalama Hata (KOH) ile aynı anlamda kullanıldığı ancak uluslararası kullanıma uyum sağlamak amacıyla bu çalışmada RMS olarak nitelendirileceği belirtilmelidir. Ayrıca

yakınsama süresi nedeniyle ilgili çözümlerin her biri için ilk yarım saatte elde edilen değerler RMS hesabına dahil edilmemiştir. JPLM istasyonunda GPS, GLONASS, Galileo ve BDS çözümlerinden elde edilen dZTD değerleri için hesaplanan RMS hataları sırasıyla 1,94, 2,04, 1,48 ve 1,84 cm'dir. Burada Galileo çözümünün diğer çözümlere kıyasla daha iyi bir performans sergilediği görülmektedir. Diğer taraftan aynı istasyon için çoklu-GNSS çözümünden elde edilen dZTD değerlerinin RMS hatası 1,37 cm olarak hesaplanmıştır. Çoklu-GNSS çözümüyle birlikte ZTD kestirim performansının önemli ölçüde iyileştiği söylenebilir. Öte yandan NNOR istasyonunda GPS, GLONASS, Galileo ve BDS çözümleri için RMS hataları 1,16, 1,91, 1,23 ve 1,95 cm olarak hesaplanmıştır. Bu istasyonda GPS çözümünün diğer tekli çözümlere kıyasla daha iyi bir kestirim performansı sergilediği açıktır. NNOR istasyonunda çoklu-GNSS çözümü için hesaplanan RMS hatası ise 1,14 cm'dir. Bu istasyon için de çoklu-GNSS çözümünden tekli çözümlere kıyasla daha düşük bir hata değeri elde edilmiştir.

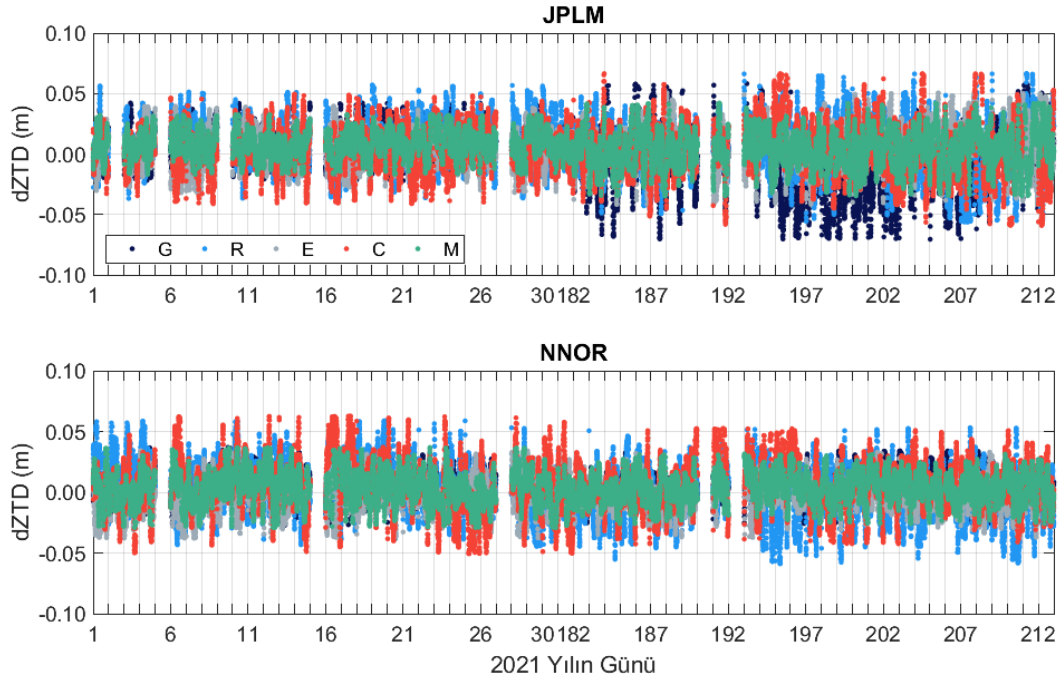
Yukarıdaki analizlerden PPP ile ZTD kestirim performansının istasyonlara ve döneme bağlı olarak değişebildiği anlaşılmıştır. Bu nedenle istasyonlar bazında farklı PPP çözümlerinden elde edilen dZTD değerlerine ait RMS hataları mevsimler göz önüne alınarak (2021 kış ve yaz) Tablo 1'de sunulmuştur. Burada ocak ve temmuz ayları kuzey ve güney yarım kürede (KYK ve GYK) farklı mevsimlere karşılık geldiğinden ilgili yarım küreye düşen istasyonlar farklı gruplarda sunulmuştur. Ayrıca 2021 kış dönemi için kuzey yarım küredeki istasyonlar için ocak ayına, güney yarım küredeki istasyonlar için temmuz ayına ait sonuçlar kullanılmıştır. Benzer şekilde 2021 yaz döneminde de kuzey ve güney yarım küre için sırasıyla temmuz ve ocak aylarına ait sonuçlar kullanılmıştır. Tablo incelendiğinde kış ve yaz dönemlerinde PPP çözümlerinden elde edilen dZTD değerlerine ait RMS hatalarının aynı istasyon için önemli ölçüde değişebileceği gözlemlenmektedir. Yine istasyonlar arasında da RMS hataları arasında önemli farklılıklar gözlemlenebilir. Buradaki farklılıklar istasyon konumu, istasyon yüksekliği, atmosfer koşulları ve uydu görünürlüğü gibi birçok farklı nedenden kaynaklanmaktadır. Tüm istasyon sonuçlarına bakıldığında kış döneminde tekli çözümler arasında hesaplanan en düşük RMS hataları 12 istasyonda GPS çözümünden, 7 istasyonda Galileo çözümünden ve bir istasyonda da BDS çözümünden elde edilmiştir. Benzer şekilde yaz döneminde en düşük RMS hataları 12 istasyonda GPS çözümünden, 7 istasyonda Galileo

çözümünden ve 1 istasyonda GLONASS çözümünden elde edilmiştir. Bu sonuçlar GPS ve Galileo çözümlerinin diğer tekli çözümlere göre daha iyi ZTD kestirim performansı sergilediğini göstermektedir. Ayrıca her iki test döneminde tüm

istasyonlar için en düşük RMS hataları çoklu-GNSS çözümünden elde edilmiştir. Bu da çoklu-GNSS çözümü kullanıldığında ZTD kestirim performansının önemli ölçüde iyileştirilebileceğini ortaya koymuştur.



Şekil 4. JPLM ve NNOR istasyonları için iki farklı güne ait PPP çözümlerinden elde edilen ZTD kestirimleri.



Şekil 5. JPLM ve NNOR istasyonlarında test dönemi boyunca farklı PPP çözümlerinden elde edilen dZTD değerleri.

Tablo 1. Farklı PPP çözümlerinden elde edilen dZTD değerlerine ait istasyon bazlı RMS hataları (cm).

	İstasyon	2021 Kış					2021 Yaz				
		G	R	E	C	M	G	R	E	C	M
KYK	ABMF	1.86	2.11	1.84	1.85	1.36	1.72	2.18	1.63	2.05	1.42
	DJIG	1.51	2.23	1.76	2.32	1.46	1.25	1.99	1.46	2.31	1.22
	FFMJ	0.69	1.34	1.07	1.35	0.67	1.08	2.06	1.40	1.54	1.07
	GRAZ	0.69	1.28	1.00	1.77	0.66	0.98	1.85	1.29	2.40	0.97
	JFNG	2.19	1.58	1.55	2.20	1.46	2.27	3.39	1.85	3.08	2.12
	JPLM	1.47	1.91	1.30	1.62	1.24	2.41	2.16	1.67	2.06	1.50
	KITG	1.15	1.92	1.27	1.79	1.13	2.01	1.90	1.62	2.52	1.60
	LMMF	2.15	2.30	2.35	1.84	1.66	1.98	2.53	1.89	2.19	1.52
	MAS1	1.37	2.26	1.48	2.00	1.28	1.31	2.19	1.46	2.01	1.25
	PTGG	1.71	2.07	2.07	2.64	1.71	1.73	2.60	1.89	2.85	1.68
	SCOR	1.30	2.10	1.29	1.71	1.16	1.14	1.71	1.17	1.57	1.08
	ULAB	2.36	1.92	1.17	1.90	1.09	1.50	1.85	1.49	1.97	1.36
	YEL2	0.87	1.17	1.25	1.26	0.83	1.12	1.77	1.16	1.68	0.99
GYK	AREG	1.47	1.58	1.71	1.84	1.41	1.47	1.69	1.87	1.85	1.45
	DAV1	1.07	1.31	1.10	1.57	1.04	0.96	1.64	1.33	1.76	0.91
	FALK	1.62	2.02	1.46	2.02	1.48	2.32	2.44	1.81	2.59	1.80
	KRGG	1.31	2.06	1.65	1.94	1.25	1.38	1.98	1.68	2.09	1.34
	NKLG	1.75	1.75	1.50	2.11	1.54	2.50	2.11	2.31	2.81	1.98
	NNOR	1.15	1.92	1.17	1.77	1.13	1.18	1.89	1.30	2.12	1.17
	REUN	1.14	2.17	1.26	1.59	1.10	1.79	2.31	2.15	2.17	1.55

KYK: Kuzey yarım küre, GYK: Güney yarım küre

Son olarak PPP çözümlerinden elde edilen dZTD değerlerine ait olasılık dağılımları Şekil 6'da sunulmuştur. Burada olasılık dağılımları kış ve yaz dönemleri için ayrı ayrı tüm istasyonlara ait çözümler göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. Tablo 1'de verilen sonuçlara benzer şekilde kış ve yaz dönemleri farklı yarım kürelerdeki mevsimler dikkate alınarak oluşturulmuştur. Şekilde orijinal frekans değerleri yerine bu frekansların toplam epok sayısına oranından hesaplanan olasılık değerleri sunulmuştur. Şekillerde ayrıca ilgili çözümlere ait ortalama ve RMS değerleri de olasılık dağılımlarıyla birlikte yer almaktadır. İlk sütun 2021 kış (K) dönemine ait çözümleri içerirken yaz (Y) dönemine ait dağılımlar ikinci sütunda sunulmuştur. Şekilden, tüm çözümler için yaz dönemine ait RMS değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca RMS değerleri incelendiğinde kış ve yaz dönemleri arasındaki farkların 4,7 mm'ye kadar varabildiği görülmektedir. GPS, Galileo ve çoklu-GNSS çözümleri için dönemsel farklar ise 2 mm'nin altındadır. Dolayısıyla bu çözümler için dönemler arasında sonuçların daha uyumlu olduğu söylenebilir. Tekli sistemler arasında gerek kış döneminde gerekse yaz döneminde GPS ve Galileo çözümlerinin birbirleriyle karşılaştırılabilir RMS değerlerine sahip olduğu ve ayrıca GLONASS ve BDS çözümlerinden önemli ölçüde daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Galileo'nun, GPS'ye kıyasla daha az uydu

sayısına sahip olmasına rağmen GPS'ye yakın bir performans sergilemesinin nedeni olarak Galileo gözlemlerinin daha düşük gürültü seviyesine sahip ve ayrıca çoklu yol (multipath) etkisine karşı daha dayanıklı olması gösterilebilir (Hadas, Kazmierski ve Sośnica, 2019; Xia ve diğerleri, 2019). Diğer taraftan çoklu-GNSS çözümü her iki test dönemi için tekli sistemlere kıyasla çok daha düşük RMS değerlerine sahiptir. Çoklu-GNSS çözümü GPS çözümüne kıyasla kış döneminde %14,1, yaz döneminde ise %12,5 olmak üzere ortalama %13,2 daha iyi performansa sahiptir. Bu sonuçlar bize dört sistemin ortak olarak kullanılması durumunda PPP ile gerçek zamanlı troposferik gecikme kestiriminde kayda değer oranda daha yüksek doğruluğa ulaşılabileceğini göstermektedir.

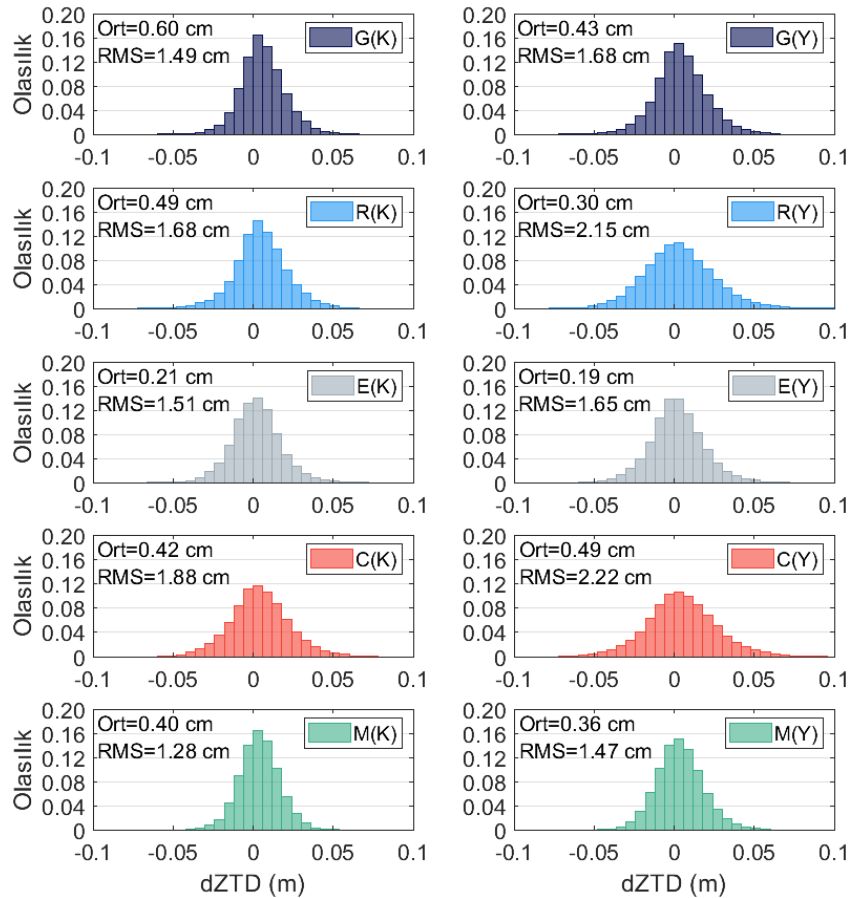
4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, GPS, GLONASS, Galileo ve BDS olmak üzere dört küresel uydu sisteminin PPP ile gerçek zamanlı ZTD kestirimi açısından en güncel performansları değerlendirilmiştir. Ayrıca dört küresel sistemin ortak olarak kullanıldığı çoklu-GNSS çözümünün gerçek zamanlı ZTD kestirimi performansı da bu çalışma kapsamında analiz edilmiştir. Uygulamada 2021 yılının ocak ve temmuz ayına ait iki farklı dönem için 20 IGS MGEX istasyonuna ait gözlemler gerçek zamanlı PPP çözümlerinde kullanılmıştır. PPP çözümlerinden elde edilen ZTD kestirimleri

IGS tarafından yayınlanan ZTD değerleri ile karşılaştırılarak performans değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Bunlara ek olarak dört küresel sistemin uydu takımlarındaki son durumu analiz edebilmek için seçilen istasyonlarda uydu görünürlüğü analizi de gerçekleştirilmiştir.

Sonuçlar, son yıllarda fırlatılan uydularla birlikte Galileo ve BDS sistemlerinin GNSS uygulamaları açısından bağımsız kullanımlarına müsaade edecek şekilde önemli bir uydu görünürlüğüne ulaştığını göstermektedir. Tüm istasyon sonuçları göz önüne alındığında GPS, GLONASS, Galileo ve BDS için kış döneminde elde edilen troposfer kestirimlerine ait RMS değerleri sırasıyla 1,49, 1,68, 1,51 ve 1,88 cm olarak hesaplanırken bu değerler yaz dönemi için 1,68, 2,15, 1,65 ve 2,22 cm'dir. Bu sonuçlar GPS ve Galileo'nun PPP ile gerçek zamanlı ZTD kestiriminde birbirine oldukça yakın bir performans sergilediğini göstermektedir. Ayrıca GLONASS ve BDS çözümlerinin performansı bu iki çözümün önemli ölçüde gerisinde kalmaktadır. Galileo çözümünün bu yüksek performansı sinyallerinin diğer sistemlere kıyasla daha düşük gürültü seviyesine sahip olmasıyla ilişkilendirilebilir. Diğer

tarafından bu dört sistemin ortak olarak kullanıldığı çoklu-GNSS çözümü kış ve yaz dönemlerindeki ZTD kestirimleri için sırasıyla 1,28 ve 1,47 cm RMS değerlerine sahiptir. Bu sonuçlar GPS çözümü ile kıyaslandığında çoklu-GNSS çözümünün gerçek zamanlı ZTD kestirimi performansını kış ve yaz dönemlerinde sırasıyla %14,1 ve %12,5 oranında iyileştirdiğini göstermektedir. Her iki dönem göz önünde bulundurulduğunda bu iyileştirme oranı ortalama %13,2 olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar çoklu-GNSS PPP çözümünün kullanılması durumunda çok daha yüksek doğrulukta gerçek zamanlı ZTD değerlerinin elde edilebileceğini ortaya koymuştur. Son yıllarda yeni ortaya çıkan sistemlerin uydu takımlarındaki ve uydu yörünge/saat ürünlerindeki gelişmeler göz önüne alındığında bu sistemlerin gerçek zamanlı troposfer kestirimi çalışmalarında kullanılması üzerine olan ilginin artarak devam edeceği söylenebilir. İlave olarak çoklu-GNSS entegrasyonlarında kullanılan fonksiyonel ve stokastik modellerin geliştirilmesi gerçek zamanlı troposfer kestirimi çalışmalarında daha yüksek performans elde etmek açısından oldukça önem taşıyan bir konu olmaya devam etmektedir.



Şekil 6. Farklı PPP çözümlerinden elde edilen dZTD değerlerine ait olasılık dağılımları.

ORCID

Berkay BAHADUR  <https://orcid.org/0000-0003-3169-8862>

KAYNAKLAR

- Abd Rabbou, M., El-Shazly, A. ve Ahmed, K. (2018). Comparative analysis of multi-constellation GNSS single-frequency precise point positioning. *Survey Review*, 50(361), 373-382. doi: 10.1080/00396265.2017.1296628
- Bahadur, B. ve Nohutcu, M. (2018). PPPH: a MATLAB-based software for multi-GNSS precise point positioning analysis. *GPS Solutions*, 22(4), 1-10. doi: 10.1007/s10291-018-0777-z
- Bevis, M., Businger, S., Chiswell, S., Herring, T.A., Anthes, R.A., Rocken, C. ve Ware, R.H. (1994). GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water. *Journal of Applied Meteorology*, 33(3), 379-386. doi: 10.1175/15200450(1994)033<0379:GMMZW D>2.0.CO;2
- BKG, (2021). BKG NTRIP Client (BNC). Erişim adresi: <https://igs.bkg.bund.de/ntrip/download>
- Cai, C. ve Gao, Y. (2013). Modeling and assessment of combined GPS/GLONASS precise point positioning. *GPS solutions*, 17(2), 223-236. doi: 10.1007/s10291-012-0273-9
- Davis, J.L., Herring, T.A., Shapiro, I.I., Rogers, A.E.E. ve Elgered, G. (1985). Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Science*, 20(6), 1593-1607. doi: 10.1029/RS020i006p01593
- De Haan, S. (2013). Assimilation of GNSS ZTD and radar radial velocity for the benefit of very-short-range regional weather forecasts. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139(677), 2097-2107. doi: 10.1002/qj.2087
- Dousa, J. ve Vaclavovic, P. (2014). Real-time zenith tropospheric delays in support of numerical weather prediction applications. *Advances in Space Research*, 53(9), 1347-1358. doi: 10.1016/j.asr.2014.02.021
- Ge, Y., Chen, S., Wu, T., Fan, C., Qin, W., Zhou, F. ve Yang, X. (2021). An analysis of BDS-3 real-time PPP: Time transfer, positioning, and tropospheric delay retrieval. *Measurement*, 172, 108871. doi: 10.1016/j.measurement.2020.108871
- Guo, F., Li, X., Zhang, X. ve Wang, J. (2017). The contribution of Multi-GNSS Experiment (MGEX) to precise point positioning. *Advances in Space Research*, 59(11), 2714-2725. doi: 10.1016/j.asr.2016.05.018
- Hadas, T. ve Bosy, J. (2015). IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time. *GPS Solutions*, 19(1), 93-105. doi: 10.1007/s10291-014-0369-5
- Hadas, T., Teferle, F.N., Kazmierski, K., Hordyniec, P. ve Bosy, J. (2017). Optimum stochastic modeling for GNSS tropospheric delay estimation in real-time. *GPS Solutions*, 21(3), 1069-1081. doi: 10.1007/s10291-016-0595-0
- Hadas, T., Kazmierski, K. ve Sośnica, K. (2019). Performance of Galileo-only dual-frequency absolute positioning using the fully serviceable Galileo constellation. *GPS Solutions*, 23(4), 1-12. doi: 10.1007/s10291-019-0900-9
- Hadas, T. ve Hobiger, T. (2020). Benefits of Using Galileo for Real-Time GNSS Meteorology. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 18(10), 1756-1760. doi: 10.1109/LGRS.2020.3007138
- Kazmierski, K., Hadas, T. ve Sośnica, K. (2018). Weighting of multi-GNSS observations in real-time precise point positioning. *Remote Sensing*, 10(1), 84. doi: 10.3390/rs10010084
- Kouba, J. ve Héroux, P. (2001). GPS precise point positioning using IGS orbit products. *GPS Solutions*, 5(2), 12-28. Doi: 10.1007/PL00012883
- 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. ve Böhm, J. (2018). VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions. *Journal of Geodesy*, 92(4), 349-360. doi: 10.1007/s00190-017-1066-2

- Lee, S.W., Kouba, J., Schutz, B., Kim, D.H. ve Lee, Y.J. (2013). Monitoring precipitable water vapor in real-time using global navigation satellite systems. *Journal of Geodesy*, 87(10), 923-934. doi: 10.1007/s00190-013-0655-y
- Li, X., Dick, G., Lu, C., Ge, M., Nilsson, T., Ning, T., Wickert, J. ve Schuh, H. (2015a). Multi-GNSS meteorology: real-time retrieving of atmospheric water vapor from BeiDou, Galileo, GLONASS, and GPS observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(12), 6385-6393. doi: 10.1109/TGRS.2015.2438395
- Li, X., Ge, M., Dai, X., Ren, X., Fritsche, M., Wickert, J. ve Schuh, H. (2015b). Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo. *Journal of Geodesy*, 89(6), 607-635. doi: 10.1007/s00190-015-0802-8
- Lu, C., Chen, X., Liu, G., Dick, G., Wickert, J., Jiang, X., Zheng, K. ve Schuh, H. (2017). Real-time tropospheric delays retrieved from multi-GNSS observations and IGS real-time product streams. *Remote Sensing*, 9(12), 1317. doi: 10.3390/rs9121317
- Pan, L. ve Guo, F. (2018). Real-time tropospheric delay retrieval with GPS, GLONASS, Galileo and BDS data. *Scientific Reports*, 8(1), 1-17. doi: 10.1038/s41598-018-35155-3
- Saastamoinen, J. (1972). Contributions to the theory of atmospheric refraction. *Bulletin Géodésique*, (1946-1975), 105(1), 279-298. doi: 10.1007/BF02521844
- Steigenberger, P., Hugentobler, U., Loyer, S., Perosanz, F., Prange, L., Dach, R., Uhlemann, M., Gendt, G. ve Montenbruck, O. (2015). Galileo orbit and clock quality of the IGS Multi-GNSS Experiment. *Advances in Space Research*, 55(1), 269-281. doi: 10.1016/j.asr.2014.06.030
- Teunissen, P.J.G. ve Montenbruck, O. (2017). Springer handbook of global navigation satellite systems, Springer.
- Wang, L., Li, Z., Ge, M., Neitzel, F., Wang, X. ve Yuan, H. (2019). Investigation of the performance of real-time BDS-only precise point positioning using the IGS real-time service. *GPS Solutions*, 23(3), 1-12. doi: 10.1007/s10291-019-0856-9
- Wanninger, L. (2012). Carrier-phase inter-frequency biases of GLONASS receivers. *Journal of Geodesy*, 86(2), 139-148. doi: 10.1007/s00190-011-0502-y
- Wilgan, K., Rohm, W. ve Bosy, J. (2015). Multi-observation meteorological and GNSS data comparison with Numerical Weather Prediction model. *Atmospheric Research*, 156, 29-42. doi: 10.1016/j.atmosres.2014.12.011
- Xia, F., Ye, S., Xia, P., Zhao, L., Jiang, N., Chen, D. ve Hu, G. (2019). Assessing the latest performance of Galileo-only PPP and the contribution of Galileo to Multi-GNSS PPP. *Advances in Space Research*, 63(9), 2784-2795. doi: 10.1016/j.asr.2018.06.008
- Zhao, Q., Yao, Y., Yao, W. ve Li, Z. (2018). Real-time precise point positioning-based zenith tropospheric delay for precipitation forecasting. *Scientific Reports*, 8(1), 1-12. doi: 10.1038/s41598-018-26299-3
- Zumberge, J.F., Heflin, M.B., Jefferson, D.C., Watkins, M.M. ve Webb, F.H. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B3), 5005-5017. Doi: 10.1029/96JB03860