

Gerçek zamanlı PPP Çözümünde GPS ve Galileo Gözlem Ağırlıklarının Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma

(A Study on Determination of GPS and Galileo Observation Weights in Real-time PPP Solution)

Muhammet Fatih BOZKIR¹, Berkay BAHADUR²

¹Harita Genel Müdürlüğü, Harita Yüksek Teknik Okulu, Cebeci, Ankara

²Hacettepe Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 06800, Çankaya, Ankara

¹fatih.bozkir@harita.gov.tr, ²berkaybahadur@hacettepe.edu.tr

Geliş Tarihi (Received): 05.06.2023

Kabul Tarihi (Accepted): 24.11.2023

ÖZ

Gerçek zamanlı PPP (Precise Point Positioning) yöntemi son yıllarda birçok GNSS (Global Navigation Satellite System) uygulamasında başarıyla kullanılmaktadır. Yine de PPP tekniğinin faz belirsizliklerinin yakınsaması için ihtiyaç duyduğu uzun başlangıç süresi tekniğin en büyük dezavantajı olarak görülmektedir. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak adına özellikle yeni ortaya çıkan navigasyon sistemleri gerçek zamanlı PPP performansının iyileştirilmesi için önemli fırsatları da beraberinde getirmiştir. Bu sistemlerin ortak olarak kullanıldığı çoklu-GNSS çözümleri müstakil çözümlere göre önemli ölçüde iyileştirilmiş konum belirleme performansları sunmaktadır. Çoklu-GNSS çözümlerinde kullanılan fonksiyonel modeller literatürde iyi bir şekilde tanımlanmış olmasına rağmen gözlem ağırlıklarını da içeren stokastik modeller halen üzerine araştırılması gereken konuların başında gelmektedir. Bu bağlamda bu çalışmanın en temel amacı gerçek zamanlı PPP için GPS ve Galileo uydularının ortak kullanıldığı çoklu-GNSS çözümünde optimum gözlem ağırlıklarının belirlenmesidir. Bu amaçla öncelikle GPS ve Galileo için müstakil gerçek zamanlı PPP çözümleri gerçekleştirilmiş ve Galileo çözümünün GPS çözümüne kıyaslanabilir bir performans sağladığı izlenmiştir. Bu iki sistemin ortak kullanıldığı çoklu-GNSS çözümü içinse optimum ağırlıklandırma yaklaşımını araştırmak adına deneysel bir test gerçekleştirilmiştir. Deneysel testte gerçek zamanlı PPP çözümü için değişen varyans oranları kullanılarak GPS ve Galileo gözlemlerine farklı ağırlıklar atanmış ve bu sayede uygun ağırlık yaklaşımı belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuçlar gerçek zamanlı PPP için çoklu-GNSS çözümünde GPS ve Galileo gözlemlerine eşit ağırlık tanımlanması durumunda gerek konum doğruluğu gerekse yakınsama süresi açısından en iyi performansın elde edildiğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: GNSS, Hassas Nokta Konumlama, PPP, Gerçek zamanlı, IGS-RTS, Galileo

ABSTRACT

In recent years, the real-time PPP (Precise Point Positioning) method has effectively been used in several GNSS (Global Navigation Satellite System) applications. Still, the long initial period that is required for converging the phase ambiguities of PPP is considered the main drawback of the technique. In

terms of overcoming this drawback, especially, the newly-emerged satellite systems bring along considerable opportunities for improving real-time PPP performance. The multi-GNSS solutions employed by these navigation systems offer significantly improved positioning performance compared with single-system solutions. Although the functional models that are utilized in the multi-GNSS solutions are well characterized in the literature, the stochastic models including observation weights are still one of the current research topics. In this context, the principal objective of this study is to determine the optimal observation weights in the multi-GNSS solution where GPS and Galileo satellites are commonly used for real-time PPP process. For this purpose, single-system solutions for GPS and Galileo have been conducted, and it has been observed that Galileo can provide comparable performance with GPS solutions. An experimental test has been performed to investigate the optimal weighting approach for the multi-GNSS solution that includes both systems. In the experimental test, different weights have been assigned to GPS and Galileo observations using varying variance ratios for the real-time PPP solution. In this way, it is aimed to determine the proper weighting approach. The results indicate that the best performance, in terms of both positioning accuracy and convergence time, is acquired when assigning equal weights for GPS and Galileo observations in the real-time PPP solution.

Keywords: GNSS, Precise Point Positioning, PPP, Real-time, IGS-RTS, Galileo

1. GİRİŞ

Uzun yıllardır jeodezik uygulamalardaki hassas konum belirleme ihtiyacını karşılamak amacıyla bağlı GNSS (Global Navigation Satellite Systems) konum belirleme teknikleri kullanılmaktadır. Bu tekniklerde referans istasyonu veya ağına ilave bir alıcı kullanılarak GNSS hata kaynakları (troposfer, çoklu yol etkileri, saat senkronizasyonu vb.) giderilir ve bu sayede yüksek konum doğruluğuna ulaşılır. Ancak bu tekniklerde en az iki alıcıya olan ihtiyaç maliyet artışına ve aynı zamanda uygulama zorluğuna neden olmaktadır. Ayrıca bu tekniklerde konum doğruluğu referans istasyonu ile alıcı arasındaki mesafeyle doğrudan ilişkilidir ve mesafe arttıkça

uydudan çıkan sinyalin atmosferde izlediği yol ve çevresel faktörler farklılaştığı için konum doğruluğu düşer (Rizos, Janssen, Roberts ve Grinter, 2012). Bağıl konum belirleme tekniklerinin bu dezavantajlarının üstesinden gelebilmek adına Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning, PPP) alternatif olarak ortaya çıkmış bir mutlak konumlama tekniğidir. Tekniğin tarihsel gelişimine bakıldığında aslında 1970'li yıllarda Anderle (1976) tarafından ortaya konulmuş olmasına karşın, günümüzdeki anlamıyla ilk kez Zumberge, Heflin, Jefferson, Watkins, ve Webb (1997) tarafından uygulanmıştır. Çift frekanslı alıcılar ile toplanan kod ve faz gözlemleri ile yapılan bu çalışmada PPP yöntemi ile yüksek doğruluk değerleri elde edilebileceği görülmüştür. GNSS dünyasında o tarihten bu yana aktif olarak kullanılan PPP, günümüzde atmosferin izlenmesi ve modellenmesi, Yer kaynaklı tehlikelerin belirlenmesi, yapı sağlığının izlenmesi, havai nirengi uygulamaları gibi birçok GNSS uygulamasında kullanılmaktadır (Yuan, Fu, Sun ve Toth 2009; Wright, Houlie, Hildyard ve Iwabuchi, 2012; Tu, Zhang, Ge ve Huang, 2013; Li ve diğerleri, 2013; Lu ve diğerleri, 2015; Yiğit ve Gürlek, 2017).

PPP, küresel bir ağdan (International GNSS Service (IGS), vb.) alınan hassas uydu yörünge ve saat ürünlerini temel alan ve yalnızca bir GNSS alıcısı kullanarak santimetre veya milimetre seviyesinde konum bulma imkânı sağlayan bir konum belirleme yöntemidir. Referans istasyonuna ihtiyaç duymadan yüksek doğruluk değerlerine ulaşılabilmesi bu tekniğin en büyük avantajıdır. Bu sayede maliyet etkinliği ve uygulama kolaylığı da sağlanmaktadır. Ancak bu yöntemde santimetre/desimetre mertebesinde konum doğruluğuna ulaşabilmek için GNSS gözlemlerine etki eden bazı ilave etkilerin (taşıyıcı dalga faz dönüklüğü, anten faz merkezi kayıklığı, gel-git ve okyanus ve kara yüklemesi vb.) modellenmeleri ve/veya düzeltilmeleri gerekmektedir (Alkan, Erol ve Mutlu, 2022). Ayrıca PPP tekniğinde yüksek konum doğruluğuna ulaşabilmek adına faz belirsizliklerinin yakınsaması için bir başlangıç süresine ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürde yakınsama süresi olarak adlandırılan bu başlangıç periyodu PPP tekniğinin en büyük dezavantajı olarak görülmektedir. Genel bir ifade ile PPP tekniğinde 5 cm ve/veya daha iyi yatay konum doğruluğuna ulaşabilmek için en az bir saatlik yakınsama süresine ihtiyaç vardır (Bahadır ve Nohutcu, 2018). Bu süre görünür uydu sayısına ve uydu geometrisine bağlı olarak değişmektedir. Bu dezavantaj tekniğin gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılmasına engel olmaktadır.

Bu noktada PPP tekniği için görünür uydu sayısının artması ve uydu geometrisinin iyileşmesi sonucunda daha düşük bir yakınsama süresi ve daha yüksek bir konum doğruluğu elde etmek beklenebilir. Daha fazla uydu ve navigasyon sinyali, PPP için DOP (dilution of precision) değerini azaltarak konum belirleme performansını olumlu yönde etkileyecektir (Montenbruck ve diğerleri, 2017). Temelde 24 uydu olarak planlanan GPS uzay bölümü bugünlerde 31 aktif uydu ile hizmet vermektedir. PPP tekniğinde kullanılan uydu sayısının artırılması ve daha iyi bir uydu geometrisi elde etmek için diğer navigasyon sistemlerine ihtiyaç vardır. Rusya'nın geliştirdiği küresel navigasyon sistemi GLONASS'ın tam kapasiteyle devreye girmesi ve Galileo, BeiDou gibi küresel navigasyon sistemlerinin operasyonel hale gelmesi görünür uydu sayısını arttırmış ve daha fazla sinyal kullanarak çoklu-GNSS çözümü yapmayı mümkün hale getirmiştir. Bu konuda yapılan ilk çalışmalar çoklu-GNSS çözümlerinin PPP performansını özellikle yakınsama süresi bakımından önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymuştur (Cai ve Gao, 2013; Yiğit ve Gürlek, 2014; Li ve Zhang, 2014, Togedor, Øvstedal, ve Vigen, 2014). Çoklu-GNSS uydularının PPP çözümlerinde uygulanması adına en büyük pay IGS tarafından 2011 yılında başlatılan MGEX (Multi-GNSS Experiment) projesine verilebilir. MGEX projesi kapsamında küresel ölçekte bir GNSS ağı aracılığıyla yeni ortaya çıkan uydu sistemlerinin gözlemleri toplanarak bunlara ait uydu yörünge ve saat bilgilerini içeren ürünler kullanıcılara sunulmaya başlanmıştır (Montenbruck ve diğerleri, 2017).

Galileo, Avrupa Birliği Uzay Ajansı tarafından geliştirilen konumlandırma ve zamanlama bilgilerini sağlayan Avrupa'nın küresel uydu navigasyon sistemidir. Bu sistem ile sadece askeri ve hükümet yetkililerine değil, aynı zamanda sivil kullanıcılara da ücretli olarak doğruluğu yüksek, ücretsiz olarak da doğruluğu daha düşük konum bilgisi sağlamayı amaçlamaktadır (Spacecraft and Satellites, 2023). Her uydu dünya üzerindeki bir turunu 14 saatte tamamlayacak ve farklı amaçlarda kullanılacak E1, E5a, E5b ve E6 olmak üzere dört farklı frekansta navigasyon sinyalleri göndermektedir (Jin, Cardellach ve Xie, 2014). Galileo, koordinat sistemi olarak Uluslararası Yersel Referans Sistemi (ITRF) ile uyumlu Galileo Yersel Referans Sistemi'ni (GTRF) kullanmaktadır. 2021 yılı itibarıyla Galileo'nun 24 uyduyu içeren aktif ağı, küresel ölçekte yeterli görünür uydu sayısını sağlayarak PPP çözümleri için önemli fırsatlar sunmaktadır. Ayrıca, Galileo sistemi diğer GNSS sistemleri (GPS, GLONASS, BeiDou) ile kullanılarak çoklu-GNSS çözümlerini

desteklemektedir. Bu, farklı GNSS sistemlerinin sinyallerini birleştirerek daha yüksek konumlandırma hassasiyeti ve daha düşük yakınsama süresi açısından önemli kazanımlar sağlamaktadır. GPS uydularına ek olarak Galileo uydularının dâhil edildiği PPP çözümleri standart PPP çözümüne göre PPP performansını gerek konum doğruluğu gerekse yakınsama süresi açısından kayda değer oranda iyileştirmektedir (Hadas, Kazmierski ve Sośnica, 2019, Bahadur ve Nohutcu, 2019).

Daha önceden belirtildiği üzere IGS analiz merkezleri tarafından yayınlanan hassas uydu yörünge ve saat ürünleri kullanılarak tek alıcı ile PPP tekniğinden milimetre seviyesinde konum doğruluğu elde edilebilir. Ancak bu doğruluğu erişilebilmek amacıyla kullanılan hassas ürünlerin elde edilebilmesi için 14-18 günlük bir bekleme süresi gerekmektedir. Bu bekleme süresi PPP yönteminin gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılmasına engel olmaktadır. Diğer yandan mühendislik ölçmeleri, haritacılık, deniz uygulamaları, insansız hava aracı uygulamaları, heyelan ölçmeleri, deprem erken uyarı sistemleri, sismoloji, buzul ve kıyı erozyonlarının izlenmesi, otonom ölçme sistemleri gibi bilimsel ve pratik pek çok uygulama alanında gerçek-zamanlı (real-time) olarak cm-dm doğrulukta üretilecek konum bilgisi kritik öneme sahiptir (Alkan ve diğerleri, 2022). Bu sebeple IGS, PPP yöntemi kullanarak gerçek zamanlı olarak doğruluğu yüksek konum bilgisine ulaşabilmek amacıyla, kendi gerçek zamanlı servisini (IGS Real Time Service ,IGS RTS) başlatmıştır. Bu proje kapsamında 2013 yılından itibaren gerçek zamanlı uydu yörünge ve saat bilgileri anlık sayılabilecek bir hızda yayınlanarak kullanıcıların hizmetine sunulmaktadır. Gerçek zamanlı PPP tekniğinde, CORS (Continuously Operating Reference Stations) veya bağıl konumlama yöntemlerinden farklı olarak sadece tek bir alıcıya ait GNSS gözlemleri kullanılarak konum bilgisi üretilir. Hata kaynaklarının tamamı ya tahmin edilerek veya modeller aracılığıyla giderilmeye çalışılır. Yapılan çalışmalar bu yöntemle cm hassasiyetinde konum doğruluğuna erişilebildiğini göstermiştir (Alkan ve diğerleri, 2022).

Bu bağlamda bu çalışmanın en temel amacı yeni ortaya çıkan navigasyon sistemlerinden olan Galileo'nun gerçek zamanlı PPP performansının GPS ile kıyaslayarak araştırılmasıdır. Ayrıca bu iki sistemin birlikte kullanılmaları durumunda gerçek zamanlı PPP performansının ne ölçüde etkilendiği yine bu çalışmanın araştırma konuları arasında yer almaktadır. Diğer taraftan çoklu GNSS PPP çözümüyle doğru ve güvenilir çözüme ulaşabilmek

için tahmin süreçlerinde fonksiyonel ve stokastik modellerin uygun bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. PPP için fonksiyonel model güncel literatürde iyi bir şekilde ortaya konmuş olmasına karşın, tahmin süreçlerinde kullanılan stokastik modeller üzerine düşülmesi gereken önemli bir husustur. Bu çalışmada çoklu GNSS PPP çözümü için GPS ve Galileo uydularının ağırlıklandırılmasında deneysel bir araştırma gerçekleştirilecek ve bu sayede iki sistem arasında optimum ağırlıklandırma yaklaşımı belirlenmeye çalışılacaktır.

2. HASSAS NOKTA KONUMLAMA İÇİN FONKSİYONEL VE STOKASTİK MODELLER

PPP tekniğinde kullanılan temel ölçüler çift frekanslı kod ve faz gözlemlerinin iyonosferden bağımsız (İB) doğrusal kombinasyonlarıdır. İlgili gözlem eşitlikleri aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$P_{IB}^{s,k} = \rho_r^{s,k} + cdt_r^s - cdT^{s,k} + T_r^{s,k} + b_{IB,r}^s - b_{IB}^{s,k} + \varepsilon(P_{IB}^{s,k}) \quad (1)$$

$$L_{IB}^{s,k} = \rho_r^{s,k} + cdt_r^s - cdT^{s,k} + T_r^{s,k} + \lambda_{IB}^s N_{IB}^{s,k} + B_{IB,r}^s - B_{IB}^{s,k} + \varepsilon(L_{IB}^{s,k}) \quad (2)$$

burada r , s ve k sırasıyla alıcıyı, navigasyon sistemini (GPS, Galileo, vb.) ve uydu numarasını göstermektedir. Ek olarak $\rho_r^{s,k}$ uydu ile alıcı arasındaki geometrik mesafeyi, c ışık hızını, dt_r^s alıcı saat hatasını, $dT^{s,k}$ uydu saat hatasını, $T_r^{s,k}$ toplam troposferik gecikmeyi, λ_{IB}^s İB kombinasyonuna ait dalga boyunu, $N_{IB}^{s,k}$ İB kombinasyonu için belirsizlik parametresini, $b_{IB,r}^s$ ve $b_{IB}^{s,k}$ sırasıyla İB kombinasyonu için alıcı ve uydu kod donanım kaynaklı hataları, $B_{IB,r}^s$ ve $B_{IB}^{s,k}$ İB kombinasyonu için alıcı ve uydu faz donanım kaynaklı hataları, ε ise ilgili gözlem için çoklu-yol etkisini de içeren gürültüyü ifade etmektedir.

PPP ölçü modelinde alıcı kod donanım kaynaklı hata ($b_{IB,r}^s$) alıcı saat hatasıyla beraber kestirilirken uydu kod donanım kaynaklı hata ($b_{IB}^{s,k}$) ise uydu saat hatasıyla birlikte düzeltilir (Kouba ve Héroux, 2001). Faz gözlemi içerisinde geriye kalan donanım kaynaklı hatalar ise faz belirsizliği parametresi içinde tek bir bilinmeyen olarak kestirilmektedir. Diğer taraftan PPP tekniğinde toplam troposferik gecikme kuru ve ıslak bileşenlere ayrılarak ele alınır. İstasyonun konumu ve meteorolojik parametrelere bağlı olarak troposferin kuru bileşeni deneysel modeller aracılığıyla elde edilebilirken ıslak bileşen atmosferdeki su buharı miktarındaki hızlı

değişimler nedeniyle genellikle ilave bir bilinmeyen olarak kestirilir (Davis, Herring, Shapiro, Rogers ve Elgered, 1985). Son olarak eşitliklerden de görüleceği üzere alıcı saat hatası farklı zaman ölçeklerinin kullanılmasından dolayı her uydu sistemine özel olarak tanımlanmıştır. Birden fazla navigasyon sisteminin ortak kullanılması durumunda GPS zaman ölçeği referans seçilerek diğer sistemler için sistemler arası fark parametresi tanımlanması gerekmektedir (Cai ve Gao, 2013). Sonuçta ilgili modelin bilinmeyenler vektörü üç adet konum bileşeni, bir adet alıcı saat hatası, bir adet troposferik gecikme, gözlenen her uydu için belirsizlik parametresi ve ilave her sistem için bir sistemler arası fark parametresinden oluşmaktadır.

PPP tekniğinin geleneksel uygulamasında uydu yörünge ve saat hataları IGS tarafından üretilen hassas ürünler kullanılarak giderilir. Ancak oldukça yüksek doğruluğa sahip bu ürünler 14-18 günlük bir gecikme ile kullanıcılara sunulmaktadır. Bu durum PPP tekniğinin gerçek zamanlı konum belirleme uygulamalarında kullanılmasını engelleyen en önemli faktördür. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için IGS, 2013 yılında kendi ağından elde ettiği ürünleri anlık yayınlatabildiği gerçek zamanlı servisini (IGS-RTS) başlatmıştır (Hadas ve Bosy, 2015). Bu servis sayesinde analiz merkezleri kendi gerçek zamanlı ürünlerini kullanıcılarla paylaşmaya başlamış ve bu sayede PPP çözümünü gerçek zamanlı olarak gerçekleştirmek mümkün hale gelmiştir. Günümüzde gerçek zamanlı PPP çeşitli GNSS uygulamalarında başarıyla kullanılmaktadır (Lu ve diğerleri, 2017; Wang, ve diğerleri, 2019a; Ge ve diğerleri, 2021). Günümüzde IGS-RTS aracılığıyla elde edilen uydu yörünge ve saat düzeltmelerinin IGS hassas ürünlerden elde edilenlere göre daha düşük doğruluğa sahip olduğu söylenmelidir. Fakat yeni çıkan navigasyon sistemlerinin katkısı ve IGS gerçek zamanlı servisinde sağlanan ürünlerin kalitesinin günden güne iyileşiyor olması gerçek zamanlı PPP çözümü açısından önemli bir potansiyel oluşturmaktadır.

PPP tekniğinde uygulanan stokastik yaklaşımlara göz atılacak olursa öncelikle ölçülere ait varyans-kovaryans matrisinin oluşturulması gereklidir. PPP gibi mutlak konum belirleme tekniklerinde ölçülerin birbiriyle ilişkisi olmadığı kabul edilir. Dolayısıyla ölçülere ait varyans-kovaryans matrisi sadece köşegen elemanları içerecek şekilde oluşturulur. PPP için ölçülere ait varyans-kovaryans matrisi Eşitlik 3'te verilmiştir. Burada $\sigma_{P_{IB}}^2$ ve $\sigma_{L_{IB}}^2$ sırasıyla kod ve faz ölçülerinin iyonosferden bağımsız doğrusal

kombinasyonlarına ait varyans değerlerini göstermektedir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{P_{IB}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{L_{IB}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots \end{bmatrix} \quad (3)$$

İyonosferden bağımsız doğrusal kombinasyonlara ait ölçü varyansları hata dağılıma kuralı göz önüne alınarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$\sigma_{P_{IB}}^2 = (f_1^2/f_1^2 - f_2^2) \sigma_{P_1}^2 + (f_2^2/f_1^2 - f_2^2) \sigma_{P_2}^2 \quad (4)$$

$$\sigma_{L_{IB}}^2 = (f_1^2/f_1^2 - f_2^2) \sigma_{L_1}^2 + (f_2^2/f_1^2 - f_2^2) \sigma_{L_2}^2 \quad (5)$$

burada $\sigma_{P_1}^2$ ve $\sigma_{P_2}^2$ birinci ve ikinci frekans üzerindeki kod gözlemlerinin varyans değerlerini, $\sigma_{L_1}^2$ ve $\sigma_{L_2}^2$ ise birinci ve ikinci frekans üzerindeki faz gözlemlerinin varyans değerlerini temsil etmektedir. Kod ve faz gözlemleri için bu değerler geleneksel olarak 0,3 ve 0,003 m olarak kullanılabilir (Teunissen ve Montenbruck, 2017).

Öte yandan GNSS gözlemlerinin gürültü seviyesi uyduların yükseklik açısına bağlı olarak kayda değer oranda değişmektedir. Bu nedenle GNSS işlemlerinde genel bir kabul olarak yükseklik açısına bağlı ağırlıklandırma modelleri kullanılmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada aşağıdaki fonksiyon kullanılarak ölçülerin ağırlıkları belirlenmiştir.

$$\sigma_{P_{IB}}^2 = \sigma_{P_{IB}}^2 + \sigma_{P_{IB}}^2 \cos^2 E \quad (6)$$

burada E ilgili uyduya ait yükseklik açısını göstermektedir.

Farklı navigasyon sistemlerine ait ölçü gürültülerinin sistemler arasındaki farklar nedeniyle değişiklik gösterdiği mevcut literatür ışığında bilinmektedir. Farklı navigasyon sistemlerinden elde edilen aynı gözlem tipine ait ölçülerde dahi bu farklılıklar göz önüne alınmalıdır. Bu amaçla mevcut literatürde çoklu-GNSS çözümlerinde başlangıç varyans oranları yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde seçilen varyans oranları sayesinde farklı navigasyon sistemlerine ait gözlemlerin ağırlıkları yeniden belirlenmiş olur. Yine literatür incelendiğinde farklı küresel sistemlere ait gözlemlere eşit ağırlıkların tanımlandığı çalışmaların var olduğu görülebilir (Ning, Han ve Zhang, 2018; Zhou ve diğerleri, 2018; Zheng ve diğerleri, 2020). Öte taraftan son zamanlarda yapılan bazı çalışmalarda ise GPS uydularına ait gözlemlerin ağırlıkları sabit tutularak diğer sistemlere ait gözlemlere daha yüksek varyans katsayısı atandığı görülmektedir (Pan ve

diğerleri, 2017; Bahadur ve Nohutcu, 2018; Wang ve diğerleri, 2019b). GPS ve Galileo uyduları için yüksek varyans atama yaklaşımı aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir.

$$\begin{cases} \sigma_{P_{IF}}^2 : \sigma_{P_{IF}}^2 = 1:2 \\ \sigma_{L_{IF}}^2 : \sigma_{L_{IF}}^2 = 1:2 \end{cases} \quad (7)$$

Bu örnekte de görüldüğü üzere mevcut çalışmalarda varyans oranı olarak iki kullanılmaktadır. Bu durumda GPS gözlemlerine göre Galileo gözlemlerinin ağırlıkları 2 oranında azaltılmış olur. Mevcut literatürde bu katsayının ne olmasına dair bir çalışma ve dolayısıyla ortak bir görüş bulunmamaktadır. İlgili durum bu çalışmanın yapılmasına temel oluşturan başlıca etmendir.

3. UYGULAMA VE ANALİZLER

a. Veri Seti

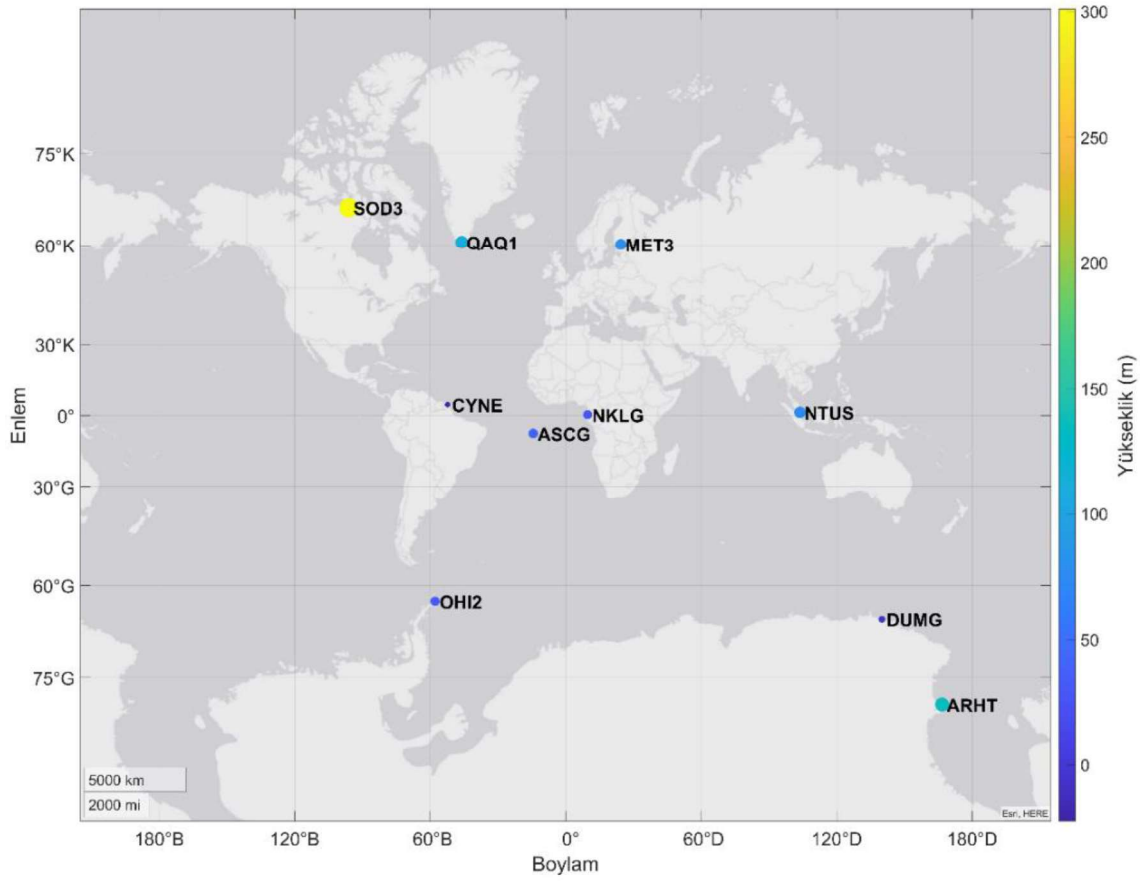
Çalışma kapsamında IGS MGEX ağına ait 10 istasyondan 5-11 Mart 2023 tarihleri arasındaki bir haftalık dönem için toplanan günlük gözlem verileri kullanılmıştır. Çalışmanın amacına uygun olarak bu istasyonların hepsi GPS ve Galileo uydularına ait gözlemleri toplayabilen GNSS alıcılarına sahiptir. İstasyonların seçiminde ilgili istasyonların coğrafi olarak dağılımı göz önünde bulundurulmuştur. İlgili istasyonların coğrafi konumları ve yükseklikleri Şekil 1'de sunulmaktadır. Öte yandan PPP gibi tek alıcıya bağlı mutlak konum belirleme teknikleri açısından konum belirleme doğruluğunu etkileyen en önemli faktörlerin başında görünür uydu sayısı ve geometrisi gelmektedir. Bu nedenle bir haftalık dönem için her istasyona ait uydu görünürlükleri analiz edilmiştir. Her bir istasyon için epok başına düşen ortalama kullanılabilir GPS ve Galileo uyduları Şekil 2'de sunulmuştur. Burada kullanılabilir uydu kavramı ilgili istasyonda görünür olup aynı zamanda gerçek zamanlı uydu yörünge ve saat bilgisi bulunan anlamına gelmektedir. Şekil 2 analiz edildiğinde kullanılabilir uydu sayılarının istasyona bağlı olarak değişkenlik gösterebildiği görülmektedir. GPS uyduları için epok başına düşen ortalama kullanılabilir uydu sayısı istasyonlar özelinde 8,43 ile 10,52 arasında değişmektedir. Galileo uyduları içinse ortalama kullanılabilir uydu sayısı 3,31 ile 7,16 arasında değişmektedir. Burada Galileo için ortalama kullanılabilir uydu sayısı DUMG istasyonu hariç tüm istasyonlarda altının üzerindedir. Bu istasyon için gözlem dosyaları incelendiğinde epok başına

düşen Galileo uydu sayısının en fazla 4 olduğu izlenmiştir. Buradaki Galileo uydu sayısındaki düşüklüğün istasyon özelinde bir durum olduğu düşünülmektedir. Şekil 2'den elde edilen ilk sonuç tüm istasyonlarda kullanılabilir GPS uydularının Galileo'dan fazla olduğudur. Bir diğeri ise istasyonların neredeyse tamamında Galileo uydu sayısının gerçek zamanlı PPP çözümü gerçekleştirmek için yeterli seviyede olduğu sonucudur.

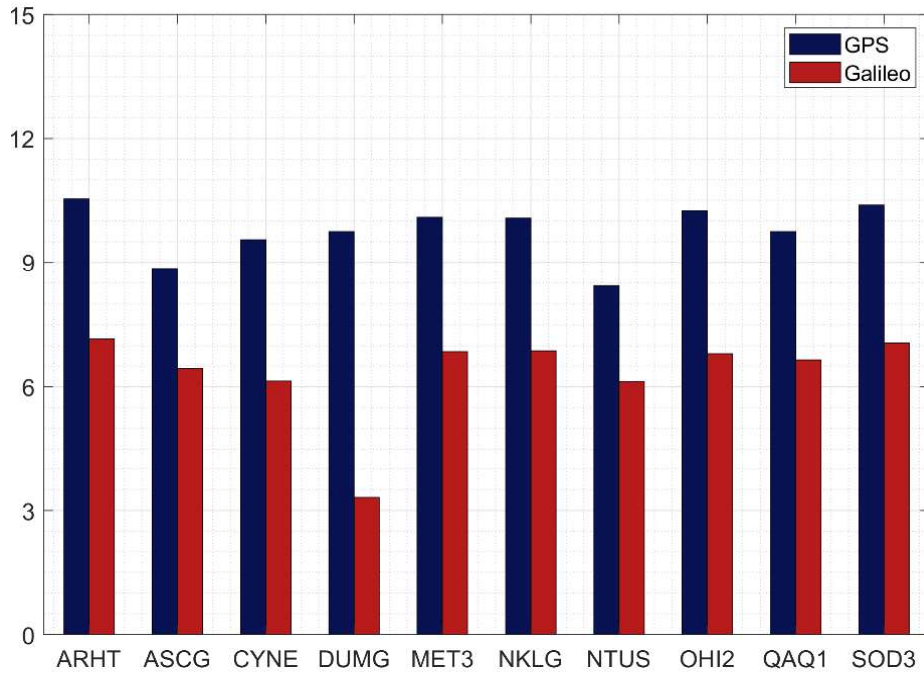
b. PPP Çözüm Stratejisi

Bu çalışmada PPP çözümleri PPPH yazılımının gerçek zamanlı uygulamalar için özel olarak geliştirilmiş PPPH-RT versiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Bahadur ve Nohutcu, 2018). Gerçek zamanlı uydu yörünge ve saat düzeltmesini elde etmek için CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) analiz merkezi tarafından üretilip IGS-RTS aracılığıyla yayınlanan ürünler kullanılmıştır. Bu ürünler IGS-RTS ağı aracılığıyla gerçek zamanlı elde edilebileceği gibi analiz merkezinin internet sitesinde günlük olarak sp3 formatında da sunulmaktadır (http://www.ppp-wizard.net/products/REAL_TIME/). PPP çözümleri için kullanılan diğeri işlem stratejileri Tablo 1'de detaylı olarak sunulmuştur.

Çalışma kapsamında GPS ve Galileo uydu takımlarının gerçek zamanlı PPP performanslarını analiz edebilmek için öncelikle bu iki sistemin tek başına ayrı ayrı kullanıldığı iki çözüm gerçekleştirilmiştir. Burada hem GPS hem de Galileo uydularından elde edilen kod ve faz gözlemlerine ait standart sapma değerleri genel kabule uygun olarak sırasıyla 0,3 m ve 0,003 m şeklinde seçilmiştir. Daha sonra iki sistemin gözlemleri arasında optimum ağırlıklandırma yaklaşımının araştırılması için deneysel bir test gerçekleştirilmiştir. Bunun için GPS ve Galileo gözlemlerinin ağırlıkları seçilen varyans oranları aracılığıyla değiştirilerek çözümler tekrarlanmıştır. Örneğin varyans oranlarının GPS için 1 Galileo için 2 seçilmesiyle GPS gözlemlerinin ağırlıkları sabit tutulurken Galileo gözlemlerinin ağırlığı yarıya düşürülmüştür. Burada uygulanan farklı katsayılar aracılığıyla konum belirleme performansı incelenmiş ve optimum değere en yakın katsayının bulunması hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen uygulamaya ait seçilen katsayılar, değerlendirme kriterleri ve elde edilen sonuçlar gibi detaylar bu bölümün devamında sunulmaktadır.



Şekil 1. Uygulamada kullanılan istasyonlarının coğrafi konumları ve yükseklikleri.



Şekil 2. GPS ve Galileo için istasyon bazında epok başına düşen kullanılabilir uydu sayısı.

Tablo 1. Gerçek zamanlı PPP çözümünde uygulanan stratejiler.

Yazılım sürümü	PPPH-RT
Çözüm stratejisi	Gerçek zamanlı PPP (float)
Gözlemler	Çift frekanslı kod ve faz gözlemlerinin iyonosferden bağımsız doğrusal kombinasyonu
Uydu sistemleri	GPS ve Galileo
Kullanılan sinyaller	GPS için L1 ve L2, Galileo için E1 ve E5a
Uydu yörünge ve saat düzeltmesi	IGS gerçek zamanlı servisi CNES uydu yörünge ve saat ürünleri
Troposferin kuru bileşeni	Saastamoinen (1972) model ve GPT3/VMF3 (Landskron ve Böhm, 2018) modelleri
Troposferin ıslak bileşeni	Bilinmeyen olarak kestirildi
Faz dönmesi	Düzeltilme uygulandı (Kouba, 2015)
Katı Yer gelgiti	Düzeltilme uygulandı (Kouba, 2015)
Alıcı anten faz merkezi	Güncel IGS anten modeli (igs20.atx) kullanılarak düzeltildi
Referans çerçevesi	ITRF20
Yükseklik açısı	8 derece
Dengeleme yöntemi	Genişletilmiş Kalman filtresi

c. GPS ve Galileo İçin Gerçek Zamanlı PPP Sonuçları

Bu bölümde GPS ve Galileo uydularının dahil edildiği gerçek zamanlı PPP çözümlerinden elde edilen sonuçlar değerlendirilecektir. Bunun için önceki bölümlerde tanıtılan veri seti sadece GPS ve sadece Galileo uyduları dahil edilmek üzere ayrı ayrı işlenmiştir. Gerçek zamanlı PPP sonuçları hem konum doğruluğu hem de yakınsama süresi açısından analiz edilmiştir. Konum doğruluğunu değerlendirebilmek için bir haftalık dönem boyunca 10 istasyona ait PPP çözümlerinden elde edilen konumlar IGS tarafından yayınlanan hassas istasyon koordinatları ile karşılaştırılmıştır.

IGS tarafından sağlanan istasyon koordinatları referans seçilerek ilgili çözümlere ait konum hataları lokal koordinat sisteminde (kuzey (K), doğu (D), yukarı (Y)) ve ayrıca üç boyutlu (3B) olarak her istasyon için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Daha sonra bir haftalık dönem boyunca her çözüm için elde edilen konum doğruluklarının karesel ortalama hataları (KOH) alınarak istasyona özel konum doğrulukları hesaplanmıştır. Tablo 2 istasyon bazında gerçek zamanlı PPP çözümlerinden elde edilen konum hatalarına ait KOH değerlerini göstermektedir.

Tabloda sunulan 3B KOH değerleri incelendiğinde istasyonların altı tanesinde GPS daha iyi konum doğruluğu sağlarken 4 tanesinde ise Galileo daha iyi konum doğruluğu sağlamıştır. Tüm istasyonlar için ortalama 3B KOH değerlerine

bakılacak olursa GPS çözümü için 0,024 m Galileo çözümü içinse 0,025 m olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar gerçek zamanlı PPP çözümü açısından Galileo'nun GPS yakın konum belirleme performansı sergilediğini ortaya koymuştur.

PPP konum belirleme performansını değerlendirmek için bir diğer önemli kriter ise yakınsama süresidir. Bu çalışmada yakınsama süresi 3B konum hatasının 10 santimetre eşik değerinin altına indiği ve devamındaki 10 dakika boyunca bu eşik değerinin üzerine çıkmadığı an olarak tanımlanmıştır. Konum doğruluğuna benzer şekilde bir haftalık dönem boyunca her çözüm için yakınsama süresi ayrı ayrı hesaplanmıştır. Tablo 3 GPS ve Galileo çözümleri için istasyon bazında ortalama yakınsama sürelerini göstermektedir. Tablodan izleneceği üzere bir istasyon dışındaki tüm istasyonlarda GPS çözümü Galileo çözümüne kıyasla daha kısa yakınsama sürelerine sahiptir. GPS çözümü ile Galileo çözümü arasında yakınsama süresi anlamındaki en yüksek fark DUMG istasyonundan elde edilmiştir. Bunun en temel nedeni ise ilgili istasyondaki düşük Galileo uydu görünürlüğüdür. Son olarak tüm istasyonlar göz önünde bulundurulduğunda GPS çözümünden elde edilen ortalama yakınsama süresi 47,6 dakikayken Galileo çözümünden elde edilen ortalama yakınsama süresi 72,7 dakika olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlardan gerçek zamanlı PPP için Galileo çözümünün yakınsama performansı anlamında GPS çözümünden bir hayli geride kaldığı söylenebilir.

Tablo 2. GPS ve Galileo çözümlerinden elde edilen konum hatalarına ait istasyon bazlı KOH değerleri (m).

İstasyon	GPS				Galileo			
	K	D	Y	3B	K	D	Y	3B
ARHT	0,017	0,004	0,011	0,020	0,013	0,005	0,011	0,018
ASCG	0,004	0,016	0,029	0,033	0,003	0,010	0,012	0,016
CYNE	0,005	0,025	0,010	0,027	0,005	0,029	0,029	0,041
DUMG	0,017	0,007	0,016	0,024	0,017	0,006	0,022	0,028
MET3	0,004	0,008	0,007	0,011	0,008	0,008	0,010	0,015
NKLG	0,015	0,027	0,009	0,032	0,011	0,011	0,010	0,019
NTUS	0,010	0,026	0,016	0,032	0,007	0,019	0,016	0,026
OHI2	0,004	0,010	0,011	0,016	0,008	0,012	0,010	0,018
QAQ1	0,010	0,004	0,016	0,019	0,014	0,003	0,023	0,027
SOD3	0,005	0,009	0,008	0,013	0,010	0,011	0,012	0,019

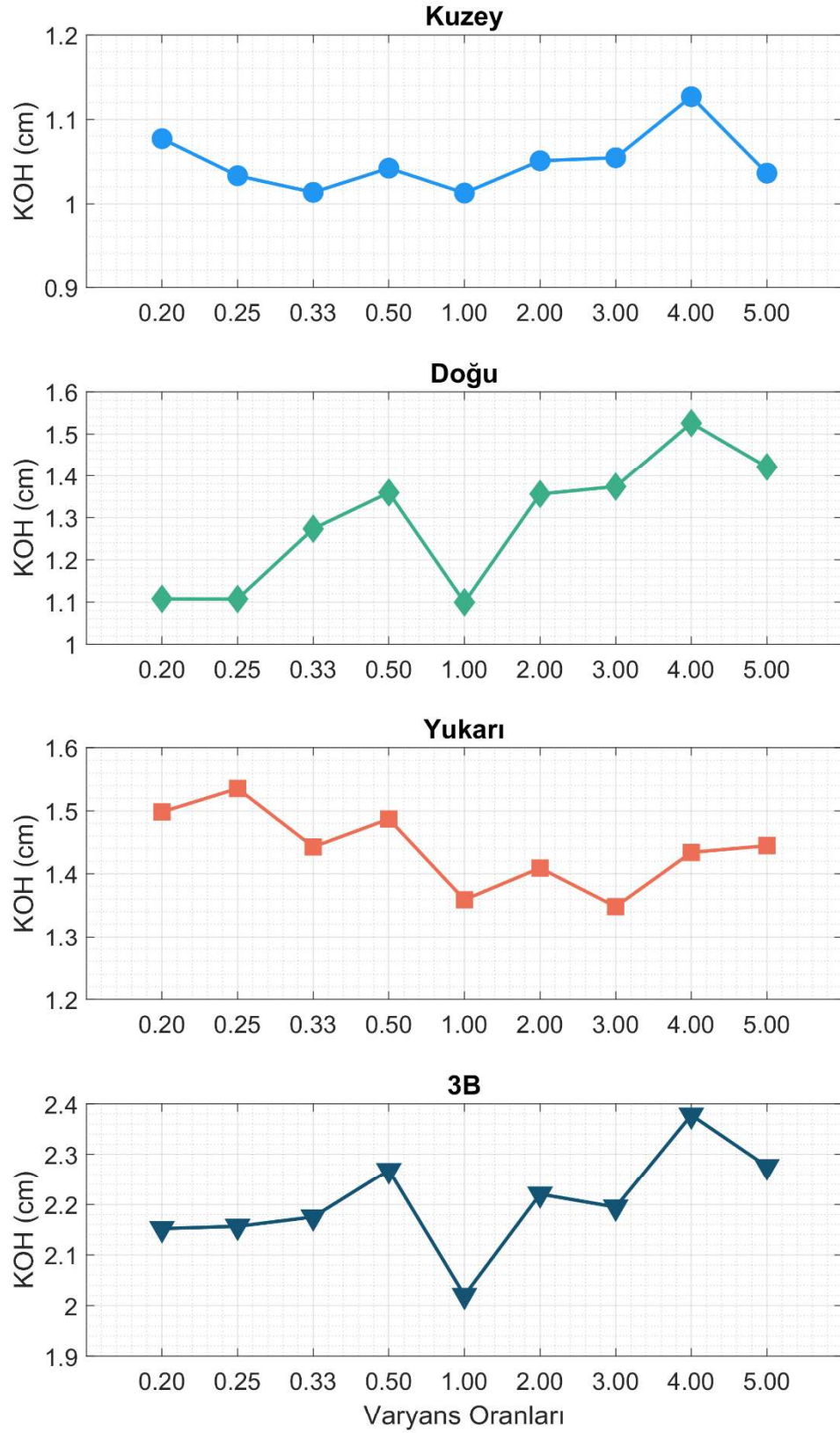
Tablo 3. GPS ve Galileo çözümleri için istasyon bazında ortalama yakınsama süreleri (dakika).

İstasyon	GPS	Galileo
ARHT	27,0	30,6
ASCG	44,1	70,7
CYNE	108,5	150,7
DUMG	46,1	147,0
MET3	24,1	20,8
NKLG	48,0	82,1
NTUS	96,7	70,2
OHI2	36,9	61,5
QAQ1	20,8	43,9
SOD3	21,6	25,8

ç. GPS/Galileo Ortak Çözümü İçin Gerçek Zamanlı PPP Sonuçları

Bu çalışmanın temel amaçlarından birisi GPS ile Galileo uydularının ortak kullanıldığı gerçek zamanlı PPP çözümü için optimum ağırlık yaklaşımının belirlenmesidir. Bu amaçla GPS ve Galileo gözlemlerine deneysel bir yaklaşımla farklı ağırlıklar verilerek ortak PPP çözümünden elde edilen konum belirleme performansının ölçülmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla farklı varyans oranları kullanılarak GPS ve Galileo gözlemlerine atanan ağırlıklar değiştirilerek gerçek zamanlı PPP çözümü tekrarlanmıştır. GPS gözlemleri referans alınarak Galileo gözlemlerine sırasıyla 0,2, 0,25, 0,33, 0,5, 1, 2, 3, 4, 5 olmak üzere 9 farklı varyans

oranı tanımlanmıştır. Bu oranlar mevcut literatürde kullanılan katsayılar temelinde deneysel olarak belirlenmiştir. Bu sayede GPS gözlemlerine göre Galileo gözlemlerinin ağırlıkları tanımlanan varyans oranlarına ters orantılı olarak değiştirilmiştir. Yani 0,2 varyans oranı kullanıldığında Galileo gözlemlerine GPS gözlemlerine göre 5 kat daha fazla ağırlık verilmiştir. Diğer taraftan 5 varyans oranı kullanıldığında Galileo gözlemlerine GPS gözlemlerine göre 5 kat daha düşük ağırlık atanmıştır. Dokuz farklı senaryo için GPS ve Galileo uydularının ortak kullanıldığı GPS/Galileo çözümü ayrı ayrı gerçekleştirilmiş ve bir önceki bölümde olduğu üzere konum doğruluğu ve yakınsama süresi performansı hesaplanmıştır. Şekil 3 GPS/Galileo çözümü için değişik varyans oranları kullanarak gerçekleştirilen çözümlerden elde edilen konum hatalarına ilişkin KOH değerlerini üç boyuta ek olarak kuzey, doğu ve yukarı yönlerde ayrı ayrı göstermektedir. Şekilden görüleceği üzere tüm hata bileşenleri için en iyi çözümü 1 varyans oranının seçildiği senaryo sunmaktadır. Özellikle 3B KOH değerleri incelendiğinde bu varyans oranından uzaklaştıkça elde edilen konum doğruluğunun ciddi oranda azaldığı görülmektedir. Varyans oranının 1 seçilmesi GPS ve Galileo uydularından alınan gözlemlere eşit ağırlıkların tanımlanması anlamına gelmektedir. Dolayısıyla her iki sistem için eşit ağırlık seçilmesi durumunda gerçek zamanlı PPP çözümünden en iyi konum belirleme performansının elde edildiği bu sonuçlardan görülmektedir.

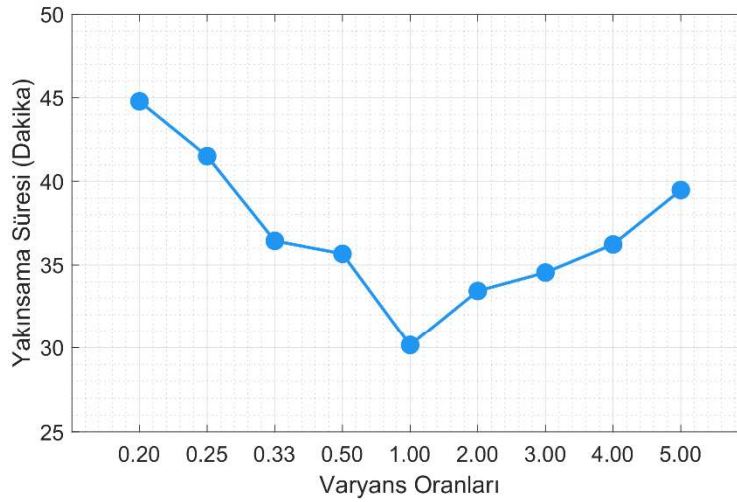


Şekil 3. Farklı varyans oranlarına göre gerçekleştirilen GPS/Galileo çözümünden elde edilen KOH değerleri (cm).

Diğer taraftan farklı varyans oranlarının seçildiği GPS/Galileo çözümlerinden elde edilen ortalama yakınsama süreleri de analiz edilmiştir. Şekil 4 0,20 ile 5,00 arasında seçilen varyans oranlarından elde edilen ortalama yakınsama sürelerini göstermektedir. Konum doğruluğuna benzer şekilde en iyi yakınsama performansı 1 varyans oranı seçilmesi durumunda elde edilmiştir. Bu senaryoda elde edilen ortalama yakınsama süresi 30,2 dakika olarak hesaplanmıştır. Diğer senaryolardan çok daha uzun yakınsama süreleri elde edilmiştir.

Bu sonuçlar gerçek zamanlı PPP için GPS/Galileo ortak çözümünden en iyi sonuçların eşit gözlem ağırlıkları kullanılması durumunda elde edileceğini ortaya koymuştur. Tablo 4 bu

senaryo için istasyon bazında elde edilmiş konum hatalarına ait KOH değerlerini ve ortalama yakınsama sürelerini sunmaktadır. Tablo 2 ile karşılaştırıldığında GPS/Galileo çözümünden GPS çözümüne göre MET3, QAQ1 ve SOD3 istasyonları dışında kalan tüm istasyonlarda daha iyi konum doğruluğu elde edildiği görülmektedir. Bu istasyonlarda GPS/Galileo çözümünden yine GPS çözümüne oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Tüm istasyonlar için elde edilen 3B KOH değerlerine bakılacak olursa GPS, Galileo ve GPS/Galileo çözümlerinin değerleri sırasıyla 0,024, 0,025 ve 0,020 metredir. Buradan gerçek zamanlı PPP çözümü için her iki sistemin ortak kullanılması durumunda çok daha iyi konum doğruluğu elde edilebileceği sonucuna varılabilir.



Şekil 4. Farklı varyans oranlarına göre gerçekleştirilen GPS/Galileo çözümünden elde edilen ortalama yakınsama süreleri (dakika).

Tablo 4. GPS/Galileo çözümünden eşit ağırlık kullanılması durumunda istasyon bazında elde edilen KOH değerleri (m) ve yakınsama süreleri (dakika).

İstasyon	GPS/Galileo (m)				
	K	D	Y	3B	YS (dk)
ARHT	0,015	0,004	0,010	0,018	21,57
ASCG	0,004	0,013	0,025	0,029	27,00
CYNE	0,004	0,018	0,014	0,023	55,92
DUMG	0,016	0,006	0,014	0,022	46,00
MET3	0,006	0,008	0,008	0,013	15,25
NKLG	0,012	0,012	0,007	0,018	33,50
NTUS	0,009	0,015	0,017	0,024	49,36
OHI2	0,005	0,010	0,005	0,012	15,60
QAQ1	0,012	0,003	0,017	0,021	12,25
SOD3	0,006	0,009	0,009	0,014	12,33

Ayrıca yakınsama süreleri incelendiğinde GPS/Galileo çözümünün tüm istasyonlarda GPS çözümünden çok daha kısa yakınsama sürelerine sahip olduğu görülebilir. İstasyon bazında yakınsama süresi iyileştirme oranları %1 ile %57,7 arasında değişmektedir. Tüm istasyonlar göz önüne alındığında elde edilen ortalama yakınsama süresi GPS/Galileo çözümü için 30,2 dakika olarak elde edilmiştir. Bu sonuç GPS/Galileo çözümünün GPS çözümüne kıyasla ortalama %36,6 daha iyi yakınsama süresi performansına sahip olduğunu göstermektedir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada gerçek zamanlı PPP çözümü için GPS ve Galileo çözümlerinin konum belirleme performansları değerlendirilmiştir. Öncelikle GPS ve Galileo çözümlerinin gerçek zamanlı PPP performansları konum doğruluğu ve yakınsama süresi açısından değerlendirilmiştir. Devamında bu iki sistemin ortak olarak kullanıldığı çoklu-GNSS çözümünde GPS ve Galileo uydularının ağırlıklandırılması için deneysel bir test gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında deneysel testlerde 5-11 Mart 2023 tarihlerinde 10 IGS istasyonundan toplanan günlük GNSS gözlem verisi kullanılmıştır.

Sonuçlar ilk olarak Galileo uydu takımının genellikle PPP çözümlerine olanak sağlayacak şekilde uydu kaynağına sahip olduğunu göstermektedir. Gerçek zamanlı PPP için GPS ve Galileo müstakil çözümlerinden sırasıyla 0,024 ve 0,025 m 3B konum doğruluğu elde edilmiştir. Bu açıdan Galileo çözümünün GPS çözümüne kıyaslanabilir bir performans gösterdiği söylenebilir. Ancak GPS ve Galileo çözümlerinden elde edilen ortalama yakınsama süreleri sırasıyla 47,6 ve 72,7 dakika olarak hesaplanmıştır. Bu noktada Galileo çözümünün GPS çözümüne kıyasla daha kötü yakınsama performansına sahip olduğu söylenmelidir. GPS ve Galileo uydularının ortak olarak kullanıldığı çoklu-GNSS çözümünde deneysel bir yaklaşımla varyans oranları değiştirilerek ilgili sistemlere ait gözlemlere atanan ağırlıklar değiştirilmiştir. Sırasıyla Galileo gözlemlerine GPS gözlemleri referans alınarak 5 kat daha düşükten başlanarak 5 kat daha yüksek olacak şekilde ağırlık tanımlanmıştır. Gerek konum doğruluğu gerekse yakınsama süresi değerleri incelendiğinde çoklu-GNSS çözümünden GPS ve Galileo gözlemlerine eşit ağırlık tanımlanması durumunda en iyi performans elde edilebileceği görülmüştür. Bu çalışma temel anlamda gerçek zamanlı PPP çözümünde GPS ve Galileo sistemleri için eşit ağırlık seçiminin önemli olduğu ve bu sayede elde edilebilecek konum

belirleme performansının artırılabilirliğini göstermiştir.

ORCID

Muhammet Fatih BOZKIR 
https://orcid.org/0009-0002-4800-2112

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

KAYNAKLAR

- Alkan, R.M., Erol, S. ve Mutlu, B. (2022). IGS-RTS ürünleri kullanılarak gerçek-zamanlı hassas nokta konumlama (RT-PPP) tekniğinin performans analizi: Antarktika örneği. *Yerbilimleri/Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Dergisi*, 43(1), 76–95. doi: 10.17824/yerbilimleri.1050124
- Anderle, R.J. (1976). Point positioning concept using precise ephemeris. In: *Satellite Doppler positioning; Proceedings of the International Geodetic Symposium, Las Cruces, N. Mex., October 12-14, 1976*, A77-47370 22-43.
- 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
- Bahadur, B. ve Nohutcu, M. (2019). Galileo Temelli Hassas Nokta Konumlama Yönteminin Performans Değerlendirmesi: Türkiye Örneği. *Harita Dergisi*, 162, 1-11.
- 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
- 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

- 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., 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
- Jin, S., Cardellach, E. ve Xie, F. (2014). *GNSS Remote Sensing: Theory, Methods and Applications*. Dordrecht: Springer.
- 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 (4 Ağustos 2023): https://files.igs.org/pub/resource/pubs/UsingIGSProductsVer21_cor.pdf
- 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
- Li, X., Ge, M., Zhang, X., Zhang, Y., Guo, B., Wang, R., Klotz, J. ve Wickert, J. (2013). Real-time high-rate co-seismic displacement from ambiguity-fixed precise point positioning: Application to earthquake early warning. *Geophysical Research Letters*, 40, 295-300. doi: 10.1002/grl.50138
- Li, P. ve Zhang, X. (2014). Integrating GPS and GLONASS to accelerate convergence and initialization times of precise point positioning. *GPS Solutions*, 18(3), 461-471. doi: 10.1007/s10291-013-0345-5
- Lu, C., Li, X., Nilsson, T., Heinkelmann, R., Ge, M., Glaser, S. ve Schuh, H. (2015). Real-time retrieval of precipitable water vapor from GPS and BeiDou observations. *Journal of Geodesy*, 89, 843-856. doi: 10.1007/s00190-015-0818-0
- 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
- Montenbruck, O., Steigenberger, P., Prange, L., Deng, Z., Zhao, Q., Perosanz, F., Romero, I., Noll, C., Stürze, A., Weber, G., Schmid, R., MacLeod, K. ve Schaer, S. (2017). The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS) – Achievements, prospects and challenges. *Advances in Space Research* 59(7), 1671-1697. doi: 10.1016/j.asr.2017.01.011
- Ning, Y., Han, H. ve Zhang, L. (2018). Single-frequency precise point positioning enhanced with multi-GNSS observations and global ionosphere maps. *Measurement Science and Technology*, 30(1), 015013. doi: 10.1088/1361-6501/aaf0f6
- Pan, L., Zhang, X., Liu, J., Li, X. ve Li, X. (2017). Performance evaluation of single-frequency precise point positioning with GPS, GLONASS, BeiDou and Galileo. *Journal of Navigation*, 70(3), 465-482. doi: 10.1017/S0373463316000771
- Rizos, C., Janssen, V., Roberts, C. ve Grinter, T. (2012). Precise point positioning: is the era of differential GNSS positioning drawing to an end? *FIG Working Week 2012*, Roma, Italya.
- Saastamoinen, J. (1972). Contributions to the theory of atmospheric refraction. *Bulletin Géodésique*, (1946-1975), 105(1), 279-298. doi: 10.1007/BF02521844
- Saastamoinen J. (1972b). Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites. *The use of artificial satellites for geodesy*, 15, 247-251. doi: 10.1029/GM015p0247
- Spacecraft and Satellites (2023). *Galileo Overview*. Erişim Adresi (4 Ağustos 2023): <https://spaceflight101.com/spacecraft/galileo/>
- Teunissen, P.J. ve Montenbruck, O., (2017). Springer handbook of global navigation satellite systems, Cham, Switzerland: Springer International Publishing, Vol. 10, 978-3.
- Togedor, J., Øvstedal, O. ve Vigen, E. (2014). Precise orbit determination and point positioning using GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou. *Journal of Geodetic Science*, 4, 65-73. doi: 10.2478/jogs-2014-0008

- Tu, R., Zhang, H., Ge, M. ve Huang, G. (2013). A real-time ionospheric model based on GNSS Precise Point Positioning. *Advances in Space Research*, 52, 1125-1134. doi: 10.1016/j.asr.2013.06.015
- Wang, L., Li, Z., Ge, M., Neitzel, F., Wang, X. ve Yuan, H. (2019a). 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
- Wang, A., Chen, J., Zhang, Y., Meng, L. ve Wang, J. (2019b). Performance of selected ionospheric models in multi-global navigation satellite system single-frequency positioning over China. *Remote Sensing*, 11(17), 2070. doi: 10.3390/rs11172070
- Wright, T.J., Houlie, N., Hildyard, M. ve Iwabuchi, T. (2012). Real-time, reliable magnitudes for large earthquakes from 1 Hz GPS precise point positioning: The 2011 Tohoku-Oki (Japan) earthquake. *Geophysical Research Letters*, 39, L12302. doi: 10.1029/2012GL051894
- Yiğit, C.Ö., Gikas, V., Alçay, S. ve Ceylan, A. (2014). Performance evaluation of short to long term GPS, GLONASS and GPS/GLONASS post-processed PPP, *Survey Review*, 46(336), 155-166. doi: 10.1179/1752270613Y.0000000068
- Yiğit, C.Ö. ve Gürlek, 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 & Risk*, 8(2), 893-904. doi: 10.1080/19475705.2017.1284160
- Yuan, X., Fu, J., Sun, H. ve Toth, C. (2009). The application of GPS precise point positioning technology in aerial triangulation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, 541-550. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2009.03.006
- Zheng, F., Gu, S., Gong, X., Lou, Y., Fan, L. ve Shi, C. (2020). Real-time single-frequency pseudorange positioning in China based on regional satellite clock and ionospheric models. *GPS Solutions*, 24, 1-13. doi: 10.1007/s10291-019-0923-2
- Zhou, F., Dong, D., Li, W., Jiang, X., Wickert, J., ve Schuh, H. (2018). GAMP: An open-source software of multi-GNSS precise point positioning using undifferenced and uncombined observations. *GPS Solutions*, 22, 1-10. doi: 10.1007/s10291-018-0699-9
- 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