

## Galileo Temelli Hassas Nokta Konumlama Yönteminin Performans Değerlendirmesi: Türkiye Örneği

(Performance Evaluation of Galileo-based Precise Point Positioning: A case study in Turkey)

Berkay BAHADUR , Metin NOHUTCU 

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

Geliş Tarihi (Received): 06.05.2019

Kabul Tarihi (Accepted): 09.06.2019

### ÖZ

GPS, uzun bir süredir Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning-PPP) için baskın uydu takımıdır. Ancak, GNSS dünyası son yıllarda GLONASS, Galileo ve BeiDou gibi yeni navigasyon sistemlerinin ortaya çıkmasıyla önemli değişiklikler yaşamaktadır. Özellikle, Galileo ilk sivil tabanlı navigasyon sistemi olma özelliğiyle diğer uydu sistemlerinden ayrılmaktadır. Galileo henüz tam uydu takımına ulaşmamış olsa da günümüz itibarıyla 24 kullanılabilir uyduya sahiptir ve bu sayede PPP uygulamaları açısından şimdiden önemli fırsatlar sağlamaktadır. Bu kapsamda, bu çalışmanın temel amacı Türkiye için öncelikle tek başına kullanılması durumunda Galileo'nun güncel PPP performansının araştırılması ve ayrıca çoklu-GNSS PPP çözümüne katkısının değerlendirilmesidir. Bu amaçla deneysel bir test gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Galileo'nun Türkiye ve yakın çevresi için PPP çözümünü gerçekleştirmek için yeterli uydu sağladığını göstermiştir. Ayrıca, sonuçlardan konum belirleme performansı açısından Galileo temelli PPP çözümünün GPS-PPP çözümüne benzer sonuçlar ürettiği görülmektedir. Diğer taraftan, GPS ve Galileo sistemlerinin birlikte kullanılması PPP performansını yakınsama süresi ve konum doğruluğu açısından önemli ölçüde iyileştirmektedir. Özetle, yakın gelecekte tam kapasiteyle çalışmaya başlayacağı düşünüldüğünde, Galileo'nun PPP tekniği için GPS'e güçlü bir alternatif olabileceği düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** GNSS, Çoklu-GNSS, Hassas Nokta Konumlama, PPP, Galileo.

### ABSTRACT

For a long time, GPS has been the dominant constellation for Precise Point Positioning (PPP). However, in recent years, the GNSS community has been facing significant changes with the advent of new satellite systems, such as GLONASS, Galileo, and BeiDou. Especially, Galileo differs from the other navigation systems as being the first civilian-based navigation system. Although Galileo has not reached full orbital capability yet, its constellation includes 24 available satellites nowadays. Therefore, Galileo already offers considerable opportunities for PPP applications. In this context, the main objectives of this study are to investigate the recent positioning performance of Galileo-only PPP and to evaluate its contribution to the multi-GNSS PPP performance for Turkey. For this purpose, an experimental test was conducted and the results show that Galileo provides

enough number of satellites to perform PPP process for Turkey and its surroundings. Moreover, from the results, it is seen that Galileo-based PPP is comparable with GPS-PPP in terms of positioning performance. On the other hand, the integration of GPS and Galileo constellations significantly improves the PPP performance in terms of convergence time and positioning accuracy. Finally, considering that Galileo will reach full orbital constellation in the near future, it is thought that Galileo can be an important alternative to GPS for PPP technique.

**Keywords:** GNSS, Multi-GNSS, Precise Point Positioning, PPP, Galileo

### 1. GİRİŞ

Tek bir alıcı ile küresel ölçekte yüksek konum doğruluğu sağlayabilen Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning-PPP) tekniği son yıllarda Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (Global Navigation Satellite System-GNSS) kullanıcıları arasında ilgi çekici bir konu olmuştur. PPP tekniğinde, uydu yörünge ve saat hataları küresel bir ağdan elde edilen hassas ürünler yardımıyla giderilir ve bu sayede santimetre veya milimetre seviyesinde konum doğruluğuna erişilebilir (Zumberge, Heflin, Jefferson, Watkins ve Webb, 1997; Kouba ve Heroux, 2001). PPP, mutlak bir konum belirleme tekniği olduğu için herhangi bir referans istasyona ihtiyaç duymaz. Referans istasyon ihtiyacını ortadan kaldırmasının sonucu olarak uygulamada getirdiği kolaylıklar ve işletim maliyetini düşürmesi PPP tekniğini ön plana çıkaran en temel özelliklerdir. Dolayısıyla PPP, son yıllarda atmosferin modellenmesi, tektonik hareketlerin gözlenmesi, yapı sağlığının izlenmesi, havai nirengi vb. birçok GNSS uygulamasında yoğun olarak kullanılmaktadır (Hernández-Pajares, Roma-Dollase, Garcia-Fernández, Orus-Perez ve García-Rigo, 2018; Paziewski, Sieradzki ve Baryla, 2018; Yigit ve Gurlek, 2017; Shi, Yuan, Cai ve Wang, 2017; Lu ve diğerleri, 2015; Wright, Houlié, Hildyard ve Iwabuchi, 2012). Ancak, standart PPP yaklaşımında faz belirsizliklerinin tam sayı olarak belirlenememesinden ötürü, faz belirsizliklerinin gerçek değerine yakınsaması ve dolayısıyla yüksek konum doğruluğuna

erişebilmek için başlangıçta minimum bir gözlem süresine ihtiyaç duyulur. Örneğin, standart bir PPP çözümünde 5 cm veya daha iyi yatay konum doğruluğuna ulaşabilmek için en az 1 saatlik gözlem süresine gereksinim vardır (Choy, Bisnath ve Rizos, 2017). Yakınsama süresi olarak adlandırılan bu periyot halen PPP tekniğinin en büyük dezavantajı olarak görülmektedir.

Son zamanlarda bölgesel ve küresel anlamda yeni navigasyon sistemlerinin ortaya çıkması GNSS dünyasında hızlı bir dönüşüme neden olmaktadır. Özellikle GLONASS uydusu takımının tamamlanması ve Galileo ve BeiDou gibi yeni küresel sistemlerin ortaya çıkması, GNSS uygulamaları açısından yeni uydular ve sinyalleri de beraberinde getirmiştir. Birden fazla navigasyon sisteminin ortak kullanıldığı çözümler, diğer bir deyişle çoklu-GNSS, PPP performansının iyileştirilmesi açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Yapılan birçok çalışma çoklu-GNSS çözümlerinin, sadece GPS gözlemlerini içeren standart PPP çözümüne kıyasla konum doğruluğu ve yakınsama süresi açısından PPP performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymuştur (Tegedor, Øvstedal ve Vigen, 2014; Li ve Zhang, 2014; Cai, Gao, Pan ve Zhu, 2015). Diğer taraftan, yakın gelecekte tam olarak faaliyete geçmesi beklenen Galileo ve BeiDou sistemlerinin özellikle uydu sayılarında önemli ilerlemeler kaydedilmiş olması günümüzde önemi giderek artan hassas konum belirleme uygulamaları için son derece önemlidir.

Avrupa Birliği ve Avrupa Uzay Ajansı (European Space Agency-ESA) tarafından ortak olarak geliştirilen Galileo, sivil-tabanlı ilk navigasyon ve konumlama sistemi olma özelliğini taşımaktadır. Galileo bu özelliği sayesinde diğer bölgesel ve küresel sistemlerden geliştirilme ve kullanım amacı anlamında ayrılmaktadır. Galileo sistemi 55° eğimli üç yörünge düzlemine eşit olarak dağılmış toplamda 30 uyduyu kapsayacak şekilde tasarlanmıştır. Her bir Galileo uydusu yaklaşık 23222 km yükseklikte daireye yakın yörüngelerde yer almakta ve E1, E5a, E5b ve E6 olmak üzere dört farklı frekansta navigasyon sinyalleri göndermektedir. Galileo dört farklı sinyalde birlikte çok çeşitli uygulamalara izin verecek bir tasarıma sahiptir. İlk uydu çifti 21 Ekim 2011 tarihinde fırlatılan Galileo, o tarihten itibaren önemli aşama kaydetmiş ve 2019 yılı Mart ayı itibarıyla ikisi test aşamasında olmak üzere toplamda 24 kullanılabilir uyduya ulaşmıştır. Sistemin 2020 yılında tam olarak faaliyete geçmesi planlanmaktadır ("European GNSS Service Centre", (t.y.)). Özetle, Galileo ulaştığı kullanılabilir uydu sayısı ve sağladığı sinyallerle günümüzde GNSS kullanıcıları için önemli fırsatlar

sunmaktadır ve ayrıca yakın gelecekte tam kapasiteyle çalışmaya başladığında GPS için ciddi bir alternatif haline gelebileceği düşünülmektedir.

Kısa süre öncesine kadar kullanılabilir uydu sayısının yetersiz olmasından dolayı Galileo'nun GNSS uygulamalarında tek başına kullanımına yönelik çok az çalışma yapılmıştır. Yakın zamanda yapılan bir çalışmada, Yalvac ve Berber (2018) Galileo'nun kısa ve uzun baz çözümleri özelinde performansını incelemiş ve sonuçları GPS ve GLONASS çözümleriyle karşılaştırmıştır. Galileo'nun PPP açısından kullanımına gelince, şimdiye dek yapılan çalışmalar genellikle çoklu-GNSS çözümlerinde diğer sistemlerle birlikte kullanıldığında konum belirleme performansına olan katkısını değerlendirmiştir (Cai ve diğerleri, 2015; Liu ve diğerleri, 2017; Bahadur ve Nohutcu, 2018a). Bu çalışmalar, GPS ve Galileo uydularının ortak kullanıldığı çözümlerin yalnızca GPS uydularının dâhil edildiği standart çözümlere kıyasla PPP performansını gerek konum doğruluğu gerekse yakınsama süresi açısından iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Ülkemiz için yapılan bir çalışmada ise Galileo'nun PPP performansına katkısı farklı çoklu-GNSS kombinasyonları dâhilinde incelenmiş, ancak o tarihte yeterli uydu sayısı bulunmadığı için sadece Galileo gözlemlerinin yer aldığı çözümler çalışma kapsamına alınamamıştır (Bahadur ve Nohutcu, 2018b). Ancak bugün gelinen noktada Galileo 24 kullanılabilir uyduyla tek başına PPP çözümü gerçekleştirmek için yeterli görünür uydu sayısını sağlamaktadır. Tüm bunlar göz önünde bulundurularak bu çalışmanın temel amacı, tek başına kullanıldığında Galileo'nun ülkemiz için güncel konumlama performansının PPP tekniği açısından incelemesi olarak belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada artan uydu sayısı ile birlikte Galileo'nun, GPS ile birlikte kullanılması durumunda PPP performansına sağlayacağı potansiyel katkının araştırılması da hedeflenmektedir. Bu çalışma kapsamında, Türkiye ve çevresinden seçilmiş GNSS istasyonlarını içeren deneysel bir test gerçekleştirilmiştir. Uygulama sonuçları yukarıda belirtilen amaçlara uygun olarak analiz edilmiş ve elde edilen bulgular detaylı bir şekilde sunulmuştur.

## 2. YÖNTEM

Bu bölümde öncelikle PPP çözümleri için gerekli fonksiyonel modeller sunulacaktır. Ardından PPP tekniğinde hata kaynaklarının etkisini ortadan kaldırmak için kullanılan işlem stratejileri açıklanacaktır.

### a. Çoklu-GNSS PPP Modeli

PPP tekniğinde, uydu yörünge ve saat hatalarını gidermek için genellikle IGS (International GNSS Service) tarafından sağlanan hassas uydu ve yörünge bilgileri kullanılmaktadır. Ayrıca, standart PPP yaklaşımında çift-frekanslı kod ve faz gözlemlerinin ionosferden bağımsız (İB) lineer kombinasyonları kullanılarak GNSS sinyalleri üzerindeki birinci derece ionosferik gecikme etkisi ortadan kaldırılır (Zumberge ve diğerleri, 1997; Kouba ve Heroux, 2001). IGS uzun süredir kendi küresel ağından elde ettiği hassas ürünleri internet sitesi aracılığıyla tüm GNSS kullanıcılarına ücretsiz olarak sunmaktadır ("International GNSS Service", (t.y.)). Son yıllarda IGS Multi-GNSS (MGEX) pilot projesi kapsamında GPS'e ek olarak GLONASS, Galileo, BeiDou ve QZSS uyduları için de hassas uydu yörünge ve saat bilgilerini üretmeye başlamıştır. Aynı yersel referans sisteminde ve zaman ölçeğinde üretilen bu ürünleri kullanarak birden fazla navigasyon sistemini aynı GNSS çözümüne dâhil etmek mümkün hale gelmiştir (Montenbruck ve diğerleri, 2017).

Standart IGS ürünleri gibi MGEX ürünleri de İB lineer kombinasyonlar temel alınarak üretilir. Ayrıca, bu ürünlerin içerdiği uydu saat hataları uydu kod donanım hatalarını da içerisinde barındırır. Dolayısıyla, standart PPP modelinde uydu kod donanım hataları uydu saat hatasına yüklenir ve MGEX ürünleri kullanılarak düzeltilir. Alıcı kod donanım hataları ise aralarındaki yüksek korelasyon nedeniyle alıcı saat hatasına yüklenir ve birlikte tahmin edilir. Diğer taraftan, IGS uydu faz donanım hataları için ayrı bir düzeltme üretmemektedir. Bu nedenle, uydu ve alıcı için faz donanım hataları belirsizlik parametresine yüklenir ve tahmin sürecinde birlikte kestirilir (Kouba ve Heroux, 2001; Steigenberger ve diğerleri, 2015). Tüm bunlar göz önüne alındığında, çift-frekanslı kod ( $P$ ) ve faz ( $L$ ) gözlemleri için İB lineer kombinasyon eşitlikleri aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$P_{IF,r}^{s,j} = \rho_r^{s,j} + \widetilde{cdt}_r^s - \widetilde{cdT}^{s,j} + T_r^{s,j} + \varepsilon(P_{IF,r}^{s,j}) \quad (1)$$

$$L_{IF,r}^{s,j} = \rho_r^{s,j} + \widetilde{cdt}_r^s - \widetilde{cdT}^{s,j} + T_r^{s,j} + \lambda_{IF}^s \widetilde{N}_{IF}^{s,j} + \varepsilon(L_{IF,r}^{s,j}) \quad (2)$$

$$\widetilde{cdt}_r^s = (cdt_r^s + b_{IF,r}^s) \quad (3)$$

$$\widetilde{cdT}^{s,j} = (cdT^{s,j} + b_{IF}^{s,j}) \quad (4)$$

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

burada  $r$ ,  $s$  ve  $j$  sırasıyla alıcıyı, GNSS indeksini (G:GPS, R:GLONASS, E:Galileo ve C:BeiDou) ve uydu numarasını göstermektedir. Ayrıca,  $\rho_r^{s,j}$  geometrik mesafeyi,  $c$  ışık hızını (m/san),  $T_r^{s,j}$  troposferik gecikmeyi,  $N_{IF}^{s,j}$  ve  $\lambda_{IF}^s$  sırasıyla faz belirsizliği parametresi ve İB lineer kombinasyonunun dalga boyunu,  $\varepsilon$  gürültüyü,  $cdt_r^s$  ve  $cdT^{s,j}$  sırasıyla alıcı ve uydu saat hatasını,  $b_{IF,r}^s$  ve  $b_{IF}^{s,j}$  İB lineer kombinasyon için alıcı ve uydu kod donanım hatalarını,  $B_{IF,r}^s$  ve  $B_{IF}^{s,j}$  ise İB lineer kombinasyon için alıcı ve uydu faz donanım hatalarını ifade etmektedir. Son olarak,  $\widetilde{cdt}_r^s$  ve  $\widetilde{cdT}^{s,j}$  saat hatalarına ek olarak donanım hatalarını da içeren yeniden düzenlenmiş alıcı ve uydu saat hatalarını ifade etmektedir. Eşitliklerde geçen tüm ifadeler uzunluk biriminde (metre) verilmiştir.

Tek sistem PPP çözümleri için yukarıdaki eşitlikler doğrudan fonksiyonel model olarak kullanılabilir. Bu durumda, üç konum bileşeni, bir alıcı saat hatası, bir troposferik gecikme ve gözlemlenen her uydu için bir faz belirsizliği parametresi bilinmeyen parametreler olarak kestirilir. Birden fazla navigasyon sisteminin dâhil edildiği ortak çözümlerde ise yukarıdaki eşitliklerden görüleceği üzere her sistem için farklı bir alıcı saat hatası ortaya çıkar. Burada, her sistem için farklı bir alıcı saat hatası tanıtmak yerine ilgili sistem için GPS zamanına göre sistemler arası fark parametresi (Inter-system bias-ISB) tanımlanır. GPS zamanının referans zaman sistemi olarak seçilmesinin nedeni IGS ürünlerinin GPS zaman ölçeğinde üretilmesi ve GNSS alıcılarının çok büyük çoğunluğunun GPS zaman ölçeğini temel almasıdır (Cai ve Gao, 2013; Li ve diğerleri, 2015).

### b. PPP İşlem Stratejisi

Bu çalışma kapsamında, PPP çözümlerini gerçekleştirmek üzere PPPH yazılımı kullanılmıştır (Bahadur ve Nohutcu, 2018a). PPPH, GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou uydularının verilerini işleyebilen tamamen açık-kaynak kodlu bir çoklu-GNSS analiz yazılımıdır. Bu yazılım aracılığıyla farklı navigasyon sistemlerini içeren çoklu-GNSS PPP çözümleri gerçekleştirilebilir. İlgili yazılımda PPP çözümleri bir önceki bölümde açıklanan fonksiyonel modele uygun olarak gerçekleştirilmiştir ve troposferik gecikme dışındaki tüm bilinmeyen parametreler tahmin sürecinde ilgili modelde yer aldığı gibi doğrudan kestirilmiştir. Troposferik sinyal gecikmesine gelindiğinde ise uzay-uydu jeodezisi tekniklerindeki genel kabullere uygun olarak troposferin ıslak ve kuru kısımları ayrı ayrı ele

alınmıştır (Davis, Elgered, Niell ve Kuehn, 1993). Troposferik gecikmenin kuru bileşeni Saastamoinen (1972) modeli yardımıyla ve Global Pressure and Temperature 2 (Lagler, Schindelegger, Böhm, Krásná ve Nilsson, 2013) modelinden elde edilen meteorolojik veriler kullanılarak başucu doğrultusunda modellenmiştir. Troposferin ıslak bölümünde yer alan su buharı değişimindeki düzensizlikler nedeniyle troposferin ilgili kısmını modellemek bir hayli zordur. Bu nedenle, troposferik sinyal gecikmesinin ıslak bileşeni bir bilinmeyen olarak tahmin sürecine dâhil edilmiştir. Her iki bileşen için de gözlem doğrultusundaki gecikmeleri elde edebilmek için Global Mapping Function (Böhm, Niell, Tregoning ve Schuh, 2006) kullanılmıştır. PPP çözümünü gerçekleştirmek için PPPH yazılımında uygulanan temel işlem stratejileri detaylı olarak Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. PPPH yazılımında uygulanan işlem stratejileri.

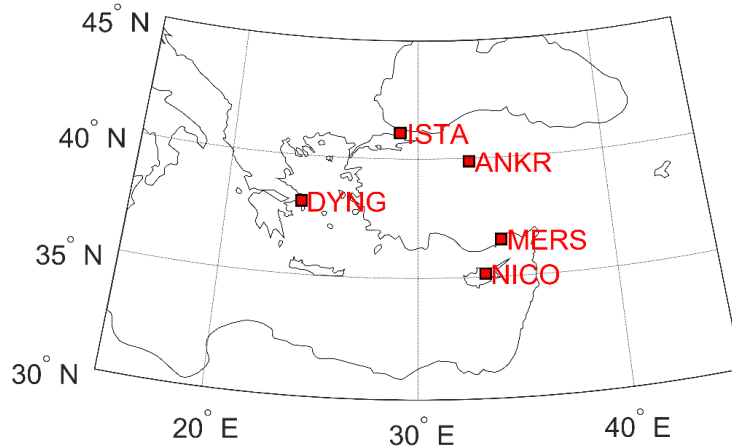
Uydu yörünge ve saat bilgisi	GFZ (Geo Forschungs Zentrum Potsdam) final ürünü
Gözlemler	Fark alınmamış iyonosferden bağımsız faz ve kod gözlemleri (GPS için L1 ve L2; Galileo için E1 ve E5a sinyalleri)
Uydu anten faz merkezi düzeltmesi ve değişimi	IGS mutlak anten modeli, Mevcut değilse Galileo ve BeiDou için standart değerler (Rizos ve diğerleri, 2013)
Alıcı anten faz merkezi düzeltmesi ve değişimi	IGS mutlak anten modeli (Antex), Mevcut değilse Galileo ve BeiDou için GPS değerleri

Rölativistik düzeltmeler	Uygulandı (Kouba, 2015)
Faz dönüklüğü düzeltmesi	Uygulandı (Wu ve diğerleri, 1993)
Katı yer gelgiti ve okyanus yüklemesi	Uygulandı (Petit ve Luzum, 2010)
Tahmin yöntemi	Genişletilmiş Kalman filtresi
Yükselim açısı	8°
Gözlem ağırlıkları	Yükselim açısına göre, korrelasyonsuz
Gözlemlerin standart sapmaları	Faz gözlemi: 0.003 m Kod gözlemi: 3 m (başucu doğrultusunda)

### 3. UYGULAMA

Bu bölümde tek başına kullanıldığında Galileo’nun güncel PPP performansını ve çoklu-GNSS çözümüne katkısını incelemek için gerçekleştirilmiş olan deneysel test ve elde edilen sonuçlar sunulacaktır. Bu kapsamda öncelikle uygulamada kullanılan veri seti ve özellikleri tanıtılacaktır. Daha sonra gerçekleştirilen PPP çözümlerinden elde edilen sonuçların değerlendirme kriterleri açıklanacaktır. Son olarak uygulama çalışmasından edinilen bulgular kapsamlı bir şekilde sunulacaktır.

Uygulama kapsamında öncelikle 17-23 Şubat 2019 tarihleri arasındaki bir haftalık dönem için ülkemiz ve çevresindeki beş farklı MGEX istasyonunda 30 saniye veri aralığı ile toplanan 24 saatlik gözlem dosyaları IGS sunucularından elde edilmiştir. Söz konusu beş istasyonun (ANKR, DYNG, ISTA, MERS ve NICO) coğrafi konumları Şekil 1’de sunulmuştur. Diğer taraftan, PPP çözümlerinde GFZ tarafından üretilen final uydu yörünge ve saat ürünleri kullanılmıştır. Bu ürünlerin veri aralığı ise sırasıyla 300 ve 30 saniyedir.



Şekil 1. Uygulamada kullanılan istasyonların coğrafi konumları.

PPP performansını değerlendirebilmek için elde edilen sonuçlar konum hatası, KOH (karesel ortalama hata) ve yakınsama süresi olmak üzere üç farklı açıdan değerlendirilmiştir. Bu amaçla, IGS tarafından sunulan haftalık çözümlerde verilen yüksek doğruluğa sahip istasyon koordinatları referans değerler olarak kullanılmıştır. Burada, konum hatası, ilgili PPP çözümünden gözlem süresi sonunda elde edilen istasyon koordinatları ile IGS haftalık çözümünden alınan yüksek doğruluğa sahip istasyon koordinatları arasındaki mutlak farkı ifade etmektedir. Bu koordinat farkları lokal koordinat sisteminde kuzey, doğu ve yukarı (K, D, Y) bileşenlerinin yanı sıra üç boyutlu (3B) toplam konum hatası olarak hesaplanmıştır. Yakınsama süresi ise 3B konum hatasının 10 cm altına düştüğü ve yakınsadığından emin olmak için sonraki 15 dakika boyunca 10 cm üstüne çıkmadığı an olarak tanımlanmıştır. Son olarak KOH, yine lokal koordinat sisteminde yakınsama anından sonraki tüm epoklar dikkate alınarak IGS haftalık çözümünde verilen istasyon koordinatlarından olan farkların karelerinin ortalamasının karekökü şeklinde hesaplanmıştır. Örneğin, kuzey yöndeki karesel ortalama hata aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$KOH = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n}}$$

burada  $\varepsilon$  ilgili epoktaki hata bileşenini ve  $n$  değeri de yakınsama süresinden sonraki epok sayısını göstermektedir.

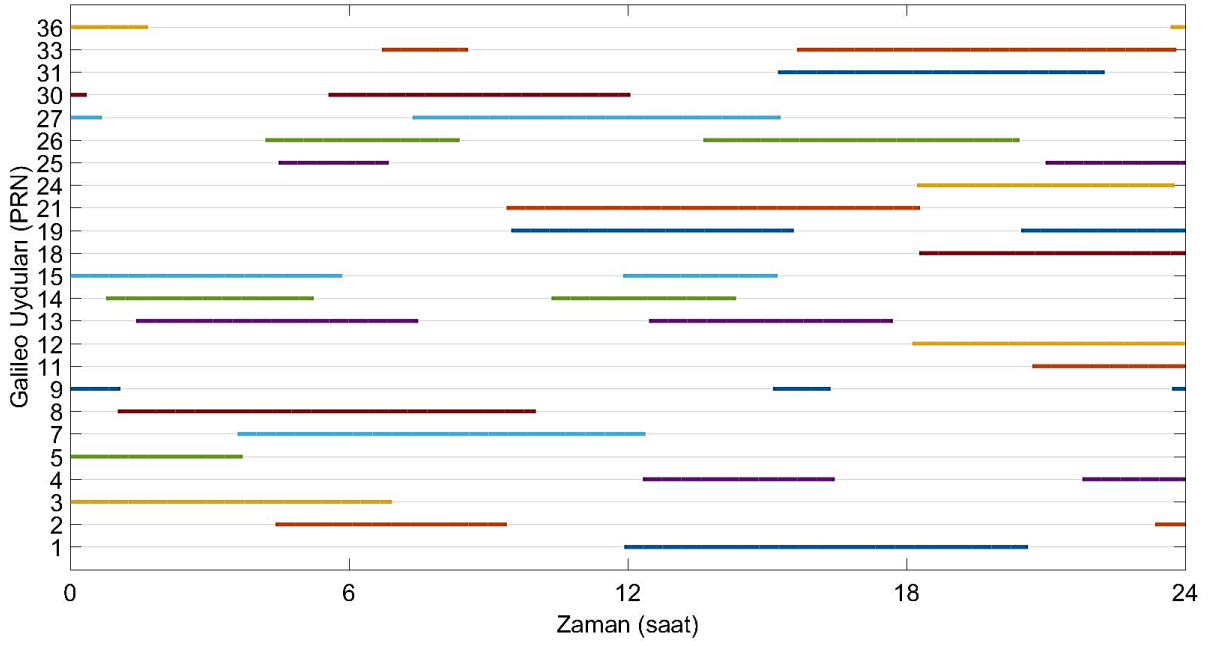
Görünür uydu sayısı PPP performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu bağlamda öncelikli olarak ilgili veri seti GPS ve Galileo sistemlerinin görünür uydu sayıları açısından analiz edilmiştir. Tablo 2 bir haftalık dönemde her istasyon için ayrı ayrı hesaplanmış epok başına düşen en az, en fazla ve ortalama görünür uydu sayılarını vermektedir. Tablodan görüleceği üzere epok başına düşen ortalama GPS uydu sayısı istasyonlar özelinde 9.0 ile 9.4 arasında değişmektedir ve tüm istasyonlar göz önüne alındığında epok başına düşen ortalama GPS uydu sayısı 9.1 olarak hesaplanmıştır. Galileo için ise epok başına düşen ortalama uydu sayısı istasyona bağlı olarak 5.7 ile 6.9 arasında değişmektedir ve tüm istasyonlar için hesaplanan ortalama görünür uydu sayısı 6.4'tür. Buradan görüleceği üzere GPS, Galileo'ya kıyasla daha fazla görünür uydu sağlamaktadır. Ayrıca, epok başına düşen ortalama görünür uydu sayılarında istasyonlar arası değişim GPS sistemi için 0.4 gibi küçük bir değerken Galileo için bu değer 1.2'dir. Diğer bir deyişle, Galileo uydu görünürlüğü istasyona bağlı olarak GPS uydu görünürlüğüne göre daha fazla değişmektedir. Bunun en önemli nedeni Galileo'nun henüz uydu takımını tamamlamamış olması ve yörünge düzlemlerindeki düzensiz uydu dağılımıdır.

Tablo 2. 17-23 Şubat 2019 tarihleri arası bir haftalık dönemde GPS ve Galileo sistemleri için istasyon bazında epok başına düşen en az, en fazla ve ortalama görünür uydu sayıları.

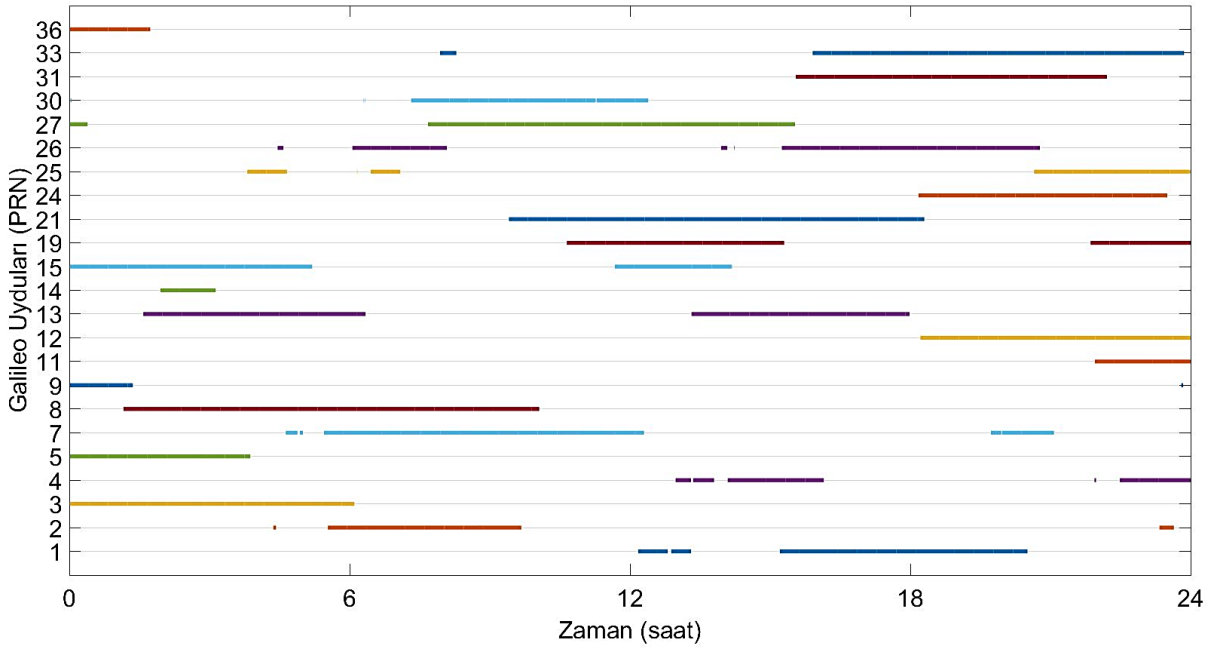
	GPS			Galileo		
	Min.	Maks.	Ort.	Min.	Maks.	Ort.
<b>ANKR</b>	5.0	13.0	9.1	3.0	10.0	6.7
<b>DYNG</b>	6.0	13.0	9.4	4.0	11.0	6.9
<b>ISTA</b>	7.0	13.0	9.0	3.0	9.0	5.7
<b>MERS</b>	6.0	14.0	9.1	4.0	10.0	6.6
<b>NICO</b>	6.0	14.0	9.1	3.0	9.0	6.0

Şekil 2 ve 3 sırasıyla en yüksek ve en düşük görünür Galileo uydu sayısı ortalamalarına sahip DYNG ve ISTA istasyonları için 17 Şubat 2019 tarihinde görünür olan Galileo uydularının gün içindeki değişimlerini GPS zamanı (UTC +0) için göstermektedir. Şekillerden, her iki istasyon için de benzer Galileo uydularının görünür olduğu ancak görünürlük sürelerinin ISTA istasyonunda DYNG istasyonuna kıyasla bir miktar daha kısa olduğu görülmektedir. Bu durum ISTA istasyonu için epok başına düşen ortalama görünür Galileo uydu sayısının diğer istasyonlara göre daha düşük

çıkmasına neden olmuştur. Ancak yine de Galileo'nun Türkiye ve yakın çevresinde PPP çözümünü gerçekleştirmek için yeterli uydu sayısını sağladığı görülmektedir. Diğer yandan, Galileo uydu takımı tam kapasiteyle çalışmaya başladığında ortalama görünür uydu sayısının artacağı ve istasyonlar arasındaki farklılıkların azalacağı öngörülebilir.



Şekil 2. 17 Şubat 2019 için gün boyunca DYNG istasyonunda görünür Galileo uydularının değişimi.



Şekil 3. 17 Şubat 2019 için gün boyunca ISTA istasyonunda görünür Galileo uydularının değişimi.

Uygulama bölümünün bir sonraki adımında Galileo'nun tek başına güncel PPP performansını değerlendirebilmek için öncelikle istasyonların günlük gözlem verileri sadece Galileo uyduları dâhil edilecek şekilde ve önceki bölümde açıklanan yöntem ile PPPH yazılımında değerlendirilmiştir. Sonuçları karşılaştırabilmek için aynı veri seti, standart PPP yaklaşımında olduğu gibi yalnızca GPS uyduları dâhil edilerek

ayrıca işlenmiştir. Son olarak Galileo'nun standart PPP çözümüne katkısını değerlendirebilmek için her iki sistemin dâhil edildiği ortak GPS/Galileo çözümü gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar bu üç farklı PPP senaryosu için istatistiksel olarak ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Tablo 3 GPS-PPP, Galileo-PPP ve GPS/Galileo-PPP için tüm istasyonlardan elde edilen ortalama konum hatalarını göstermektedir. Tablodan görüleceği üzere hem



GPS-PPP hem de Galileo-PPP 24 saatlik çözüm sonucunda santimetre seviyesinde üç boyutlu konum doğruluğu sağlayabilmektedir. Galileo-PPP'nin bir haftalık süreç için ortalama 3B konum hatası 23.8 mm iken GPS-PPP'nin ortalama 3B konum hatası 19.0 mm olarak hesaplanmıştır. Galileo-PPP'nin üç boyutlu konum belirleme performansının, GPS-PPP'ye kıyasla bir miktar daha kötü olmasına rağmen yine de umut verici olduğu söylenebilir. Beklendiği üzere her iki çözümde de düşey yöndeki konum hatası yatay

yöndeki hatadan daha fazladır. Benzer durum KOH değerleri için de geçerlidir. Üç boyutlu KOH değerleri incelendiğinde Galileo-PPP'nin GPS-PPP'ye yakın değerlere sahip olduğu görülmektedir. Diğer taraftan, GPS ve Galileo uydularının ortak kullanıldığı PPP çözümünün ortalama 3B konum ve KOH değerleri GPS-PPP ve Galileo-PPP'ye göre daha düşüktür. Galileo uydularının standart PPP çözümüne dâhil edildiği takdirde konum belirleme performansını iyileştirdiği açıktır.

Tablo 3. Günlük gözlem dosyalarının işlenmesi sonucunda GPS-PPP (G), Galileo-PPP (E) ve GPS/Galileo-PPP (GE) için tüm istasyonlardan elde edilen ortalama konum hataları ve KOH değerleri.

PPP Modu	Konum Hatası (mm)				KOH (mm)			
	K	D	Y	3B	K	D	Y	3B
G	2.3	8.9	12.0	19.0	5.5	13.5	23.6	28.6
E	7.3	7.2	20.1	23.8	6.9	17.2	24.9	31.8
GE	2.2	8.6	9.5	16.7	5.1	13.5	21.6	27.0

Tablo 3'te sunulan değerler her bir PPP senaryosu için ilgili hafta boyunca elde edilen ortalama değerlerdir ve günlük gözlemler sonucunda çözümlerin üretebileceği konum belirleme performansı açısından önemli bir fikir vermektedir. Ancak PPP açısından faz belirsizliklerinin yakınsaması gerçekleştiikten sonra tahmin edilen konum bileşenlerinin çok fazla değişmediği bilinen bir gerçektir. Bu nedenle 24 saatlik çözüm için gözlem süresinin sonunda elde edilen sonuçların birbirine yakınlaşması beklenen bir durumdur. Ayrıca, daha önceden de belirttiği gibi PPP tekniğinde beklenen yakınsama süresi genellikle 1 saat civarındadır. 24 saatlik çözümlerde yakınsama genellikle ilk 1-2 saat içerisinde gerçekleştiği için buradan elde edilecek sonuçlar sadece ilgili zaman dilimindeki yakınsama performansı hakkında bilgi vermektedir. Bu nedenle günlük çözümler için yakınsama performansı açısından bir değerlendirme yapmak yerine, bütün gün için yakınsama performansını ortaya çıkaracak bir analiz gerçekleştirmek daha sağlıklı bir yol olacaktır. İlave olarak, daha kısa gözlem sürelerinde PPP çözümlerinden elde edilebilecek konum doğrulukları bazı GNSS uygulamaları için önem arz eden bir konudur. Tüm bunlar göz önüne alındığında daha detaylı bir analiz gerçekleştirebilmek için ilgili veri seti bu kez 2 saatlik periyotlara ayrılarak yine üç farklı PPP

senaryosu altında işlenmiştir. Bu sayede bir haftalık dönem için 84 farklı periyot elde edilmiş ve her periyotta PPP çözümü sıfırdan gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4 GPS-PPP, Galileo-PPP ve GPS/Galileo-PPP için günlük gözlemlerin 2 saatlik periyotlara ayrılması ile gerçekleştirilen çözümlerden elde edilen ortalama konum hatalarını, KOH'ları ve yakınsama sürelerini göstermektedir. Burada elde edilen konum hatası değerleri 5 istasyon için toplamda 420 periyodun ortalamasıdır. Yakınsama süreleri ise yalnızca 2 saat içerisinde yakınsayan periyotlar dikkate alınarak hesaplanmıştır. Burada GPS-PPP, Galileo-PPP ve GPS/Galileo-PPP çözümleri için toplamda 420 periyodun sırasıyla %95, %94 ve %98'si 2 saatlik süre içinde yakınsamıştır. Tablo 4'ten görüleceği üzere iki saatlik periyot içerisinde istasyon koordinatları henüz gerçek değerine yeterince yakınsamadığı için bu çözümden elde edilen konum hataları ve KOH'lar günlük çözümlere göre daha yüksektir. Ayrıca Tablo 3'den görüleceği üzere standart PPP çözümünde (24 saatlik) yukarı yöndeki hata bileşenleri genel kabullere uygun olarak diğer hata bileşenlerine göre daha yüksektir (yaklaşık 1.5-2 kat). Ancak bu durum Tablo 4'te sunulan konum hataları için geçerli değildir. Bunun en büyük sebebi yine ilgili süre zarfında çözümün gerçek değere yeterince yakınsayamamasıdır.

Tablo 4. İki saatlik gözlem dosyalarının işlenmesi sonucunda GPS-PPP (G), Galileo-PPP (E) ve GPS/Galileo-PPP (GE) için tüm istasyonlardan elde edilen ortalama konum hataları, KOH değerleri ve yakınsama süreleri.

PPP Modu	Konum Hatası (mm)				KOH (mm)				Yakınsama Süresi (dk)
	K	D	Y	3B	K	D	Y	3B	
G	15.0	37.9	37.6	61.6	32.7	52.3	64.0	95.1	39.3
E	21.2	42.0	38.7	68.1	27.7	54.4	52.9	86.1	39.6
GE	12.9	26.7	31.2	47.5	19.8	36.7	44.6	64.8	25.1

Galileo-PPP, günlük çözümlerde olduğu gibi 2 saatlik çözümlerde de 3B konum hatası ve KOH değerleri incelendiğinde GPS-PPP'ye benzer sonuçlar üretmiştir. Yakınsama süresi açısından incelendiğinde ise yine GPS-PPP ve Galileo-PPP çözümlerinin birbirine yakın sonuçlar verdiği gözlemlenebilir. Diğer taraftan, 2 saatlik periyotlar için gerçekleştirilen PPP çözümlerinde GPS'e ek olarak Galileo uydularının çözüme dâhil edilmesi konum belirleme performansı açısından sonuçları günlük çözümlere göre daha fazla etkilemiştir. Ayrıca, her iki sistemin bir arada kullanılması yakınsama süresini de kayda değer oranda iyileştirmiştir.

Tablo 5 her üç PPP senaryosu için 2 saatlik çözümler sonucunda elde edilen ortalama konum hatalarını, KOH ve yakınsama süresi değerlerini istasyon bazında ayrı ayrı göstermektedir. Tablodan görüleceği üzere Galileo-PPP en kötü

performansı ANKR istasyonunda göstermiştir. Ancak bu istasyonun GPS-PPP çözümlerinde de diğer istasyonlara kıyasla yüksek hata değerlerinin elde edildiği yine tablodan görülmektedir. ANKR istasyonu bir tarafa bırakılırsa Galileo-PPP çözümlerinin konum belirleme performanslarının görünür uydu sayılarına paralel olduğu ve en düşük ortalama 3B hata değerinin DYNG istasyonundan en büyük 3B hata değerlerinin ise ISTA istasyonunda elde edildiği yine ilgili tablodan görülebilir. İlave olarak DYNG istasyonunda Galileo-PPP GPS-PPP'ye kıyasla daha iyi konum belirleme performansı göstermiştir. Ayrıca, Tablo 5 KOH değerleri ve yakınsama süreleri açısından incelendiğinde konum hatalarında olduğu gibi istasyonlardaki görünür uydu sayılarına paralel sonuçların elde edildiği görülmektedir.

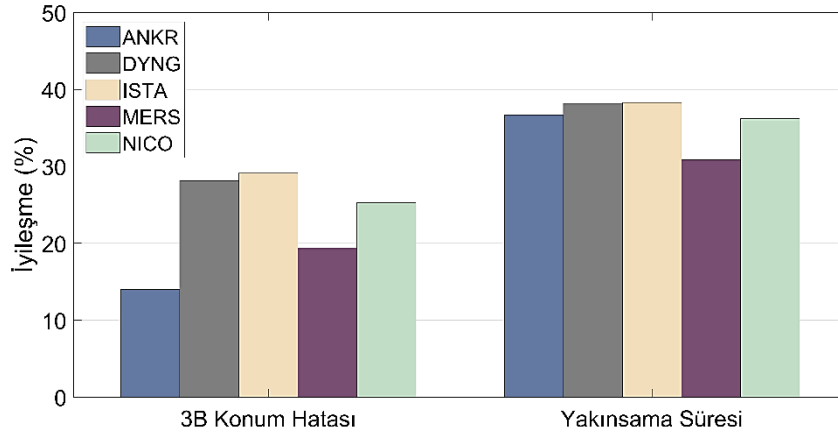
Tablo 5. İki saatlik gözlem dosyalarının işlenmesi sonucunda GPS-PPP (G), Galileo-PPP (E) ve GPS/Galileo-PPP (GE) için istasyon bazında elde edilen ortalama konum hataları, KOH değerleri ve yakınsama süreleri.

İstasyon	PPP Modu	Konum Hatası (mm)				KOH (mm)				Yakınsama Süresi (dk)
		K	D	Y	3B	K	D	Y	3B	
ANKR	G	16.5	46.1	46.6	73.9	35.6	63.1	54.6	96.4	36.0
	E	32.4	62.0	58.8	97.8	33.8	70.0	69.4	109.1	36.6
	GE	15.5	43.5	35.9	63.6	24.2	52.1	45.9	77.3	22.8
DYNG	G	17.6	35.1	30.5	57.9	47.5	56.2	72.5	109.6	30.7
	E	14.6	30.6	32.8	54.5	21.9	41.4	48.9	71.9	32.5
	GE	12.7	19.4	29.5	41.7	16.5	32.5	39.6	56.9	19.0
ISTA	G	12.5	36.9	33.3	55.8	30.0	49.7	58.0	87.7	45.4
	E	24.2	41.2	33.9	67.3	38.8	59.4	50.2	94.0	43.4
	GE	11.4	22.2	27.1	39.6	21.8	31.6	44.3	61.9	28.0
MERS	G	14.3	33.5	35.2	55.8	22.2	41.8	50.4	73.9	39.3
	E	15.6	33.8	34.2	56.3	18.6	45.5	43.8	70.0	40.8
	GE	12.8	24.9	28.5	45.0	16.1	32.9	33.9	53.3	27.1
NICO	G	14.0	39.5	45.1	67.1	28.0	52.0	86.1	110.3	45.8
	E	20.6	45.6	36.2	68.9	26.0	58.6	54.8	89.3	45.4
	GE	12.4	25.6	36.7	50.2	21.4	36.6	61.8	78.4	29.2



Son olarak, GPS'e ek olarak Galileo uydularının çözüme dâhil edilmesinin PPP çözümüne etkisinin incelenmesi açısından Tablo 4'te sunulan 2 saatlik çözümler için elde edilen ortalama değerlere bakıldığında, tüm istasyonlar için Galileo uydularının çözüme dâhil edilmesinin GPS-PPP sonuçlarını 3B konum hatası ve yakınsama süresi açısından sırasıyla ortalama %22.9 ve %36.1 oranında iyileştirdiği görülmektedir. Ayrıca, GPS/Galileo-PPP çözümünün GPS-PPP çözümüne kıyasla üç boyutlu konum hatası ve yakınsama süresi açısından her istasyon için sağlanan iyileştirme

oranları Şekil 4'te ayrı ayrı gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere Galileo/GPS-PPP çözümü her istasyonda GPS-PPP çözümünü gerek üç boyutlu konum hatası gerekse yakınsama süresi açısından kayda değer oranda iyileştirmiştir. Yakınsama süresindeki iyileşme oranlarının her istasyonda konum hatasındaki iyileşmeye göre daha yüksek seviyede olduğu şekilden rahatlıkla görülmektedir. Sonuçta, GPS ve Galileo uydularının ortak kullanılması durumunda PPP çözümlerinden daha kısa sürede daha yüksek doğruluğa sahip çözümler elde edilmektedir.



Şekil 4. GPS/Galileo-PPP çözümü kullanıldığında GPS-PPP çözümüne kıyasla istasyon bazında üç boyutlu konum hatası ve yakınsama süresi açısından iyileşme oranları.

#### 4. ÖZET VE SONUÇLAR

Bu çalışmanın temel amacı ülkemiz ve çevresi için tek başına kullanıldığında Galileo'nun güncel PPP performansını ve çoklu-GNSS çözümüne katkısını incelemektir. Bu bağlamda 17-23 Şubat 2019 tarihleri arasındaki bir haftalık süreyi kapsayan deneysel bir test gerçekleştirilmiştir. Ülkemiz ve yakın çevresinde yer alan 5 MGEX istasyonundan elde edilen günlük gözlem verileri GPS, Galileo ve GPS/Galileo-PPP senaryoları altında ayrı ayrı işlenmiştir. PPP çözümlerinden elde edilen sonuçlar konum hatası, karesel ortalama hata ve yakınsama süresi açısından değerlendirilmiştir. Diğer taraftan, PPP performansı açısından önemli konulardan birisi olan görünür uyduların sayısı hem GPS hem de Galileo için analiz edilmiştir. Galileo uydularının görünürlüğü istasyona bağlı olarak GPS uydularının görünürlüğüne göre daha fazla değişmektedir. Bunun en önemli nedeni Galileo'nun henüz uydular takımını tamamlamamış olması ve yörünge düzlemlerindeki düzensiz uyduların dağılımıdır.


24 saatlik PPP çözümlerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde GPS-PPP, Galileo-PPP ve GPS/Galileo-PPP çözümlerinin sırasıyla ortalama 19.0, 23.8 ve 16.7 mm 3B konum hatasına sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, daha detaylı bir analiz gerçekleştirebilmek için ilgili veri seti 2 saatlik periyotlara ayrılarak yine üç farklı PPP senaryosu altında işlenmiştir. Buradan elde edilen sonuçlar incelendiğinde, GPS-PPP, Galileo-PPP ve GPS/Galileo-PPP için sırasıyla ortalama 61.6, 68.1 ve 47.5 mm 3B konum hatası değerleri elde edildiği görülmektedir. GPS-PPP, Galileo-PPP ve GPS/Galileo-PPP çözümleri için elde edilen ortalama yakınsama süreleri ise sırasıyla 39.3, 39.6 ve 25.1 dakikadır. Ek olarak, üç farklı PPP çözümünün konum hataları ve yakınsama süreleri istasyonlar özelinde ayrıca incelenmiştir. Galileo-PPP performansının istasyon bazında küçük değişiklikler gösterse de genellikle GPS-PPP çözümüne benzer sonuçlar ürettiği görülmüştür. Hatta incelenen istasyonlar içinde görünür Galileo uydularının ortalaması en yüksek olan DYNG istasyonunda Galileo-PPP çözümü GPS-PPP'ye kıyasla daha başarılıdır. Sonuçta, Galileo'nun Türkiye ve yakın çevresinde PPP

çözümünü gerçekleştirmek için yeterli uydu sağladığı ve Galileo-PPP çözümlerinin GPS-PPP'ye yakın sonuçlar ürettiği görülmektedir. Ortalama olarak Galileo-PPP performansının GPS-PPP sonuçlarına kıyasla düşük olmasında Galileo görünür uydu sayısının nispeten daha az olmasının etkisi olduğu söylenebilir. Öte yandan, GPS'e 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.

Sonuç olarak, Galileo uydu takımı tamamlanmamış olmasına rağmen şu anda 24 kullanılabilir uydu ile PPP açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Galileo uydu dağılımındaki düzensizlikler nedeniyle görünür uydu sayıları istasyon bazında küçük değişiklikler göstermektedir. Ancak, yakın gelecekte Galileo uydu takımının tamamlanacağı düşünüldüğünde bu farklılıkların ortadan kalkacağı öngörülebilir. Ayrıca, Galileo'nun tam faaliyete geçmesiyle birlikte uydu yörünge ve saat bilgilerinin iyileşeceği de düşünülürse Galileo'nun PPP açısından GPS'e önemli bir alternatif haline gelebileceği söylenebilir.

### ORCID

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

Metin NOHUTCU  <https://orcid.org/0000-0001-9582-582X>

### KAYNAKLAR

- Bahadur, B. ve Nohutcu, M. (2018a). PPPH: a MATLAB-based software for multi-GNSS precise point positioning analysis. *GPS Solutions*, 22(4), 113. Doi: 10.1007/s10291-018-0777-z
- Bahadur, B. ve Nohutcu, M. (2018b). Türkiye ve yakın çevresi için çoklu-GNSS kombinasyonlarının PPP performansına etkisi. *Harita Dergisi*, 84(160), 1-11.
- Böhm, J., Niell, A., Tregoning, P. ve Schuh, H. (2006). Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophysical Research Letters*, 33(7), L07304. Doi: 10.1029/2005GL025546
- 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

- Cai, C., Gao, Y., Pan, L. ve Zhu, J. (2015). Precise point positioning with quad-constellations: GPS, BeiDou, GLONASS and Galileo. *Advances in Space Research*, 56(1), 133-143. Doi: 10.1016/j.asr.2015.04.001
- Choy, S., Bisnath, S. ve Rizos, C. (2017). Uncovering common misconceptions in GNSS Precise Point Positioning and its future prospect. *GPS solutions*, 21(1), 13-22. Doi: 10.1007/s10291-016-0545-x
- Davis, J. L., Elgered, G., Niell, A. E. ve Kuehn, C. E. (1993). Ground-based measurement of gradients in the "wet" radio refractivity of air. *Radio Science*, 28(6), 1003-1018. Doi: 10.1029/93RS01917
- European GNSS Service Centre. (t.y.). Programme. Erişim adresi: <https://www.gsc-europa.eu/galileo-gsc-overview/programme>
- Hernández-Pajares, M., Roma-Dollase, D., Garcia-Fernández, M., Orus-Perez, R. ve Garcia-Rigo, A. (2018). Precise ionospheric electron content monitoring from single-frequency GPS receivers. *GPS Solutions*, 22(4), 102. Doi: 10.1007/s10291-018-0767-1
- International GNSS Service. (t.y.). Products. Erişim adresi: <http://www.igs.org/products>
- 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>
- Lagler, K., Schindelegger, M., Böhm, J., Krásná, H. ve Nilsson, T. (2013). GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques. *Geophysical Research Letters*, 40(6), 1069-1073. Doi: 10.1002/grl.50288
- 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
- Li, X., Ge, M., Dai, X., Ren, X., Fritsche, M., Wickert, J. ve 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. Doi: 10.1007/s00190-015-0802-8

- Liu, T., Yuan, Y., Zhang, B., Wang, N., Tan, B. ve Chen, Y. (2017). Multi-GNSS precise point positioning (MGPPP) using raw observations. *Journal of Geodesy*, 91(3), 253-268. Doi: 10.1007/s00190-016-0960-3
- Lu, C., Li, X., Nilsson, T., Ning, T., Heinkelmann, R., Ge, M., ... Schuh, H. (2015). Real-time retrieval of precipitable water vapor from GPS and BeiDou observations. *Journal of Geodesy*, 89(9), 843-856. Doi: 10.1007/s00190-015-0818-0
- Montenbruck, O., Steigenberger, P., Prange, L., Deng, Z., Zhao, Q., Perosanz, ... 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
- Paziewski, J., Sieradzki, R. ve 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. Doi: 10.1088/1361-6501/aa9ec2
- Petit, G. ve Luzum, B. (2010). IERS Conventions 2010, IERS Technical Note 36, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 pp., ISBN 3-89888-989-6.
- Rizos, C., Montenbruck, O., Weber, R., Weber, G., Neilan, R. ve Hugentobler, U. (2013). The IGS MGEX experiment as a milestone for a comprehensive multi-GNSS service. *Proceedings of the ION 2013 Pacific PNT Meeting* (s. 289-295) içinde. Honolulu, Hawaii.
- Saastamoinen, J. (1972). Contributions to the theory of atmospheric refraction. *Bulletin Géodésique*, 105(1), 279-298.
- Shi, J., Yuan, X., Cai, Y. ve Wang, G. (2017). GPS real-time precise point positioning for aerial triangulation. *GPS solutions*, 21(2), 405-414. Doi: 10.1007/s10291-016-0532-2
- Steigenberger, P., Hugentobler, U., Loyer, S., Perosanz, F., Prange, L., Dach, R., ... 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
- Tegedor, J., Øvstedal, O. ve Vigen, E. (2014). Precise orbit determination and point positioning using GPS, Glonass, Galileo and BeiDou. *Journal of Geodetic Science*, 4(1), 65-73. Doi: 10.2478/jogs-2014-0008
- Wright, T. J., Houlié, 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(12). Doi: 10.1029/2012GL051894
- Wu, J. T., Wu, S. C., Hajj, G. A., Bertiger, W. I. ve Lichten, S. M. (1993). Effects of antenna orientation on GPS carrier phase. *Manuscripta Geodaetica*, 18(2), 91-98.
- Yalvac, S. ve Berber, M. (2018). Galileo satellite data contribution to GNSS solutions for short and long baselines. *Measurement*, 124, 173-178. Doi: 10.1016/j.measurement.2018.04.020
- Yigit, C. O. ve 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. Doi: 10.1080/19475705.2017.1284160
- 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