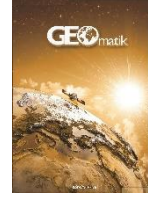




GEOMATİK

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/geomatik>

e-ISSN 2564-6761



Farklı GNSS uydu sistemlerinin hassas nokta konumlama (PPP) tekniğinin performansına etkisinin incelenmesi

Ahmet Can UÇARLI¹, Fatih DEMİR¹, Serdar EROL¹, Reha Metin ALKAN*¹

¹ Geomatik Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

Anahtar Kelimeler

MultiGNSS
Hassas Nokta Konumlama
PPP
Web-tabanlı Online GNSS
Veri Değerlendirme

ÖZ

Uydu jeodezisi ile veri işleme ve analizindeki gelişmeler sonucunda herhangi bir referans istasyonunda toplanan verileri kullanmaya gerek duymadan, tek bir GNSS alıcısı ile santimetre doğruluğunda konum belirlemeyi mümkün kılan PPP tekniği geliştirilmiştir. Bu yöntemde, tek bir alıcı ile toplanan veriler, farklı kuruluşlarca üretilen hassas uydu yörünge ve saat bilgileri ile birlikte değerlendirilerek, statik veya kinematik olarak yüksek doğrulukta konum belirlenebilmektedir. PPP tekniği ile koordinatların belirlenebilmesi için pek çok yaklaşım olmakla birlikte, son zamanlarda web-tabanlı online veri değerlendirme servisleri tüm dünyada başarıyla yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Öte yandan GPS ile başlayan uydu-bazlı konum belirleme çalışmaları, izleyen zamanda GLONASS, Galileo ve BeiDou uydularının da eklenmesiyle birlikte GNSS olarak adlandırılan tümleşik bir konum belirleme sisteminin meydana gelmesini sağlamıştır. Bu çalışma kapsamında İTÜ Ayazağa Kampüsünde, farklı uydu gözlem özelliklerine sahip noktalar tesis edilmiş ve çoklu-GNSS'in statik PPP nokta konum doğruluğuna etkisi incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, PPP tekniği ile elde edilen doğrulukların ölçme yapılan noktadaki fiziki koşullara, uydu sayısına ve uyduların geometrisine bağlı olarak anlamlı şekilde değiştiğini, birden fazla uydu sistemi ile yapılan ölçmelerin de özellikle uydu görünürlüğü kısıtlı noktalarda yapılan ölçmelerin sonuçları üzerinde anlamlı düzeyde iyileştirici bir rol oynadığını ortaya koymuştur.

Investigation of the effect of different GNSS satellite systems on the performance of the precise point positioning (PPP) technique

Keywords

MultiGNSS
Precise Point Positioning
PPP
Web-based Online GNSS
Data Processing

ABSTRACT

As a result of developments in satellite geodesy and data processing and analysis, the PPP technique has been developed that enables centimeter-accurate positioning with a single GNSS receiver, without the need to use data collected from any reference station. In this method, the data collected with a single receiver is processed together with the precise satellite orbit and clock information produced by different organizations, and the position can be determined as static or kinematic with high accuracy. Although there are many approaches for determining the coordinates with the PPP technique, recently web-based online data processing services have been successfully used all over the world. On the other hand, satellite-based positioning studies that started with GPS, with the addition of GLONASS, Galileo and BeiDou satellites in the following time, led to the formation of an integrated positioning system called GNSS. Within this study, points with different satellite observation characteristics were established in İTÜ Ayazağa Campus and the effect of multi-GNSS on static PPP accuracy was examined. The results obtained from the study show that the accuracies obtained with the PPP technique vary significantly depending on the physical conditions at the point where the measurement is made, the number of satellites and the geometry of the satellites. Additionally, the measurements made with more than a single satellite system showed a significant improvement role in the results of the measurements made especially in restricted conditions with respect to satellite visibility.

*Sorumlu Yazar

(ucarli15@itu.edu.tr) ORCID ID 0000-0002-6401-5477
(demirf15@itu.edu.tr) ORCID ID 0000-0003-0903-5085
(erol@itu.edu.tr) ORCID ID 0000-0002-7100-8267
(alkanr@itu.edu.tr) ORCID ID 0000-0002-1981-9783

Kaynak Göster (APA)

Uçarlı A C, Demir F, Erol S & Alkan R M (2021). Farklı GNSS uydu sistemlerinin hassas nokta konumlama (PPP) tekniğinin performansına etkisinin incelenmesi. Geomatik, 6(3), 247-258. DOI: 10.29128/geomatik.779420

1. GİRİŞ

1 Ocak 1994 tarihinde resmi olarak faaliyete başlayan International GNSS Service (IGS), o tarihten bu yana yüksek kalitede pek çok Global Navigation Satellite System (GNSS) ürününü (farklı gecikme sürelerinde ve doğruluklarında üretilen hassas uydu yörünge ve saat ürünleri, yer dönme parametreleri, IGS istasyonlarının koordinatları ve hızları, sabit istasyonlara ilişkin saat bilgilerini) bilim dünyasının kullanımına sunmuştur (Kahveci ve Yıldız, 2012). Bu ürünler, farklı amaçları yerine getirmek üzere yapılan bilimsel araştırmalarda ve mühendislik projeleri ile jeodezik ve jeofizik amaçlı pek çok GNSS uygulamasında yaygın olarak kullanılmakla birlikte, uydu-bazlı konum belirlemede yeni algoritmaların ve tekniklerin ortaya çıkmasını da sağlamıştır. Bunların içerisinde en yaygın olarak kullanılanı, Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning-PPP) olarak adlandırılan tekniktir. PPP her ne kadar 1970’li yıllarda R.J. Anderle tarafından önerilmiş olsa da, IGS ürünlerinin kalitesi ve doğruluğundaki gelişmelere bağlı olarak günümüzün standart konum belirleme tekniği haline gelmiş ve tüm dünyada yaygın olarak kullanılmaya başlanılmıştır. Söz konusu bu yöntem sadece GPS (Global Positioning System) uydularından değil, diğer uydu sistemlerinden de alınan verilerin birlikte değerlendirildiği çoklu-GNSS (multi-GNSS) PPP konseptine dönüşmüş, böylelikle çok daha fazla uydu ile daha zorlu ölçme koşullarında daha iyi performansla konum belirlemek mümkün hale gelmiştir. PPP, pek çok temel ölçme uygulamasında, heyelan izleme çalışmalarında, deprem araştırmalarında, erken uyarı sistemlerinin oluşturulmasında, buzul hareketlerinin izlenmesinde, hassas tarımda, yapı sağlığı izlemede, deniz ölçmelerinde, fotogrametrik çalışmalarda ve İHA ölçmelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, çoklu-GNSS Hassas Nokta Konumlama (PPP) tekniğinin statik uygulamalardaki konum doğruluğu araştırılmıştır. Bu amaçla, orman alanı, su kıyısı, yerleşim alanı, açık alan gibi farklı fiziki koşullara ve yapay/doğal çevresel engellere sahip noktalarda ölçmeler yapılmış, farklı değerlendirme stratejileriyle toplanan veriler değerlendirilerek, çoklu-GNSS’in statik PPP nokta konum doğruluğuna etkisi araştırılmıştır.

2. HASSAS NOKTA KONUMLAMA TEKNİĞİ (PPP)

Günümüzde konum bilgisi teknolojinin gelişimine de bağlı olarak gerek mühendislik uygulamaları gerekse gündelik hayatta yaşamın önemli bir parçası haline gelmiştir. Bu konuda en sık başvurulan yöntem hiç kuşkusuz uydu-bazlı konum belirleme sistemleridir. Bu alanda yapılan ilk çalışmalar 1994 yılında global olarak kullanıma sunulan Amerika Birleşik Devletleri Savunma Bakanlığı’nca geliştirilen NAVSTAR-GPS (NAVigation Satellite Timing And Ranging-Global Positioning System) ya da yaygın olarak kullanılan ve bilinen

biçimiyle GPS ile başlamıştır. Halen (18 Temmuz 2020 itibarıyla) mevcut 31 uydusu ile GPS (30’u aktif), çok farklı alanlarda tüm dünyada en çok kullanılan uydu-bazlı konum belirleme sistemidir. İzleyen zaman içerisinde Rusya’nın GLObal’na NAVigationnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS) sistemi geliştirilmiş, bir dizi süreçten sonra 2011 yılında tekrar tüm dünyada kullanılabilir hale gelmiştir. GLONASS sisteminde toplam 24 uydu olup, 23’ü fiili olarak çalışmaktadır. Bu iki sistem uzun süre kullanılmış, diğer yandan da Avrupa Birliği’ne ait Galileo ile Çin Halk Cumhuriyeti tarafından işletilen BeiDou Navigation Satellite System (BDS) sistemleri de devreye girmiştir. Bu uydu sistemlerinden Galileo 2016’da kullanıma başlanmış olup, halen 22’si aktif olmak üzere 24 uyduya sahiptir. BDS sistemi ise 2018’den beri tamamen kullanılmaya başlanmış olup, toplam 49 uyduya sahiptir (şu anda 44’ü aktif). Tüm bu uydu sistemleri Global Navigation Satellite System (GNSS) olarak tanımlanan, 100’ün üzerinde uydu ile tüm dünyaya hizmet veren tümleşik bir konum belirleme sistemini oluşturmuşlardır (Int Kyn. 1). GNSS ile uygulanan ölçme yöntemine ve kullanılan donanıma bağlı olarak metreler mertebesinde, santimetre-milimetreye varan doğruluk aralığında konum (hız ve zaman ile birlikte) belirlenebilmektedir.

Günümüzde Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning-PPP) adı verilen teknik, tüm dünyada pek çok farklı uygulamada yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. PPP ile tek veya çok-frekanslı tek bir GNSS alıcısıyla toplanan kod ve taşıyıcı faz ölçüleri ile birlikte başta International GNSS Service (IGS) olmak üzere, GFZ (German Research Center for Geoscience), JPL (Jet Propulsion Laboratory), Center for Orbit Determination in Europe (CODE) gibi analiz merkezlerinin kullanıma sunduğu hassas uydu yörünge, saat düzeltmeleri ve kod-faz sapma değerleri de kullanılarak yapılan değerlendirmeler sonucunda, statik ve dinamik olarak cm-dm doğruluğunda, global bir koordinat sisteminde 3D konum belirlenebilmektedir. Ancak yüksek doğruluk gereksinimi için ölçmelere etki eden hataların modellenmesi veya düzeltmelerin getirilmesi gereklidir. Bunlar, iyonosfer ve troposferden kaynaklanan hatalar, uydu/alıcı anteni faz merkezi kayıklıkları, faz dönmesi, kutup ve katı yeryuvarı gel-giti, okyanus yüklemesi, ve Sagnac etkilerini içeren rölativistik etkiler, yeryuvarı dönme parametreleri, alıcı ve uydu kod ve faz sapma değerleridir (Héroux and Kouba, 2001; Nie et al., 2020).

Yöntem ilk olarak Anderle (1976) tarafından uygulanmış olmakla birlikte, günümüzdeki anlamda ilk kez Zumberge ve arkadaşları tarafından 1997 yılında gerçekleştirilen çalışmalarıyla birlikte yaygın kullanıma başlanmıştır (Zumberge et al., 1997). Bu çalışmada çift frekanslı GPS alıcıları ile toplanan pseudorange ve taşıyıcı faz ölçmeleri kullanılmış ve PPP tekniği ile oldukça yüksek doğrulukta konum belirlenebileceği ortaya konulmuştur. O zamandan bu yana PPP tekniği tüm dünyada birçok farklı

bilimsel ve pratik uygulamada başarıyla kullanılmıştır (Zumberge et al., 1997; Héroux and Kouba, 2001; Rizos et al., 2012; Choy et al., 2017; Bahadur and Nohutcu, 2019; Dawidowicz, 2020; Facio and Berber, 2020; Kiliszek and Kroszczyński, 2020; Liu et al., 2020).

PPP tekniği başlangıçta sadece GPS gözlemlerine uygulanmış olsa da, diğer uydu sistemleri için hassas ürünlerin üretilip, kullanıma sunulmasıyla birlikte GLONASS, Galileo ve BeiDou uydularının da kullanıldığı çoklu-GNSS (multi-GNSS) PPP konsepti ortaya çıkmıştır. Bu yaklaşım, özellikle yüksek katlı binaların yer aldığı yoğun yerleşim yerlerinde, ormanlık alanlarda, derin açık maden işletmelerinde, vadilerde ve buna benzer uydu gözlemleri açısından görüş açısının kısıtlı olduğu ortamlarda daha fazla uydudan veri alınmasını sağlayarak, yüksek doğruluk ve güvenilirlikte konum belirlemeyi mümkün kılmaktadır. Ayrıca tek bir uydu sistemine bağımlılığı da ortadan kaldırmaktadır. Ancak GPS gözlemleri kullanılmadan diğer uydularla yapılan çözümlerde oldukça düşük performans elde edilmekte olup, GPS verileri PPP için hala en baskın ve vazgeçilmez uydu sistemi olma özelliğini korumaktadır (Bahadur ve Nohutcu, 2019). Bu yöntemde; kullanılan alıcı tipine (düşük maliyetli OEM tipi, jeodezik vb), kullanılan ölçü türüne (kod/faz), frekans sayısına (tek, çift ve çoklu-frekans), gözlem yapılan uydu sayısına ve türüne (GPS, GLONASS, Galileo, BDS veya Multi-GNSS) ve ölçme süresine bağlı olarak statik yöntemle mm-cm mertebesinde; kinematik yöntemle de cm-dm mertebesinde doğruluğa ulaşabilmektedir. Bu çalışmada en az iki veya daha fazla uydu sistemi ile yapılan konum belirleme işlemi, çoklu-GNSS PPP olarak kabul edilmiştir.

Konum belirleyebilmek için kullanıcıların tek bir GNSS alıcısı ile veri toplamalarının yeterli olması operasyon serbestisi sağlayarak yöntemi kolay uygulanabilir kılmakta ve ölçme maliyetini de ciddi şekilde düşürmektedir. Bu yöntemle, homojen doğrulukla küresel bir referans sisteminde konum belirlenebilmektedir. Bu önemli avantajlara karşın yöntemin bazı eksiklikleri de bulunmaktadır. Bunların en önemlisi cm mertebesinde bir doğruluğa erişebilmek için 20-30 dakika veya üzeri bir yakınsama süresine (convergence time) gereksinim duyulmasıdır. Bu durum yöntemin gerçek-zamanlı uygulamalarda kullanımını da zorlaştırmakta, hatta kısıtlamaktadır. Literatürde GPS uydu sistemlerine diğer Küresel Konum Belirleme sistemlerinin eklenmesinin, yakınsama süresinin azaltılmasına katkı sağladığı ifade edilmektedir. Tamsayı belirsizliğinin sabitlenerek yapılan PPP çözümleri, bu yakınsama süresinin kısılmasına katkı sağlamaktadır (Wang, 2014). Ayrıca bu çözüm yöntemi float tamsayı belirsizliği çözümüne göre çok daha yüksek doğruluk ve güvenilirlikte çözüm sağlamaktadır (Bisnath and Collins, 2012).

Her bir uydu navigasyon sisteminin datumu, zaman sistemi ve sinyal yapısı birbirinden farklı olduğu için, çoklu-GNSS sisteminde bu durumun

çözümde dikkate alınması gerekmektedir. Ancak, IGS Multi-GNSS Experiment (MGEX) projesi kapsamında bütün uydu yörünge bilgileri ve saat hataları aynı datumda ve zaman sisteminde belirlendiği için, çoklu-GNSS çözümlerinde bu ürünlerin kullanılması datum ve zaman sistemi problemlerini ortadan kaldıracaktır. Çoklu-GNSS PPP modeli için kod ve faz gözlem eşitlikleri aşağıda verilmiştir (Cai et al., 2015):

$$P_{i,r}^s = \rho_r^s + c\Delta t_r^s - c\Delta T^s + T_r^s + I_{i,r}^s + O^s + \varepsilon(P_{i,r}^s) \quad (1)$$

$$L_{i,r}^s = \rho_r^s + c\Delta t_r^s - c\Delta T^s + T_r^s - I_{i,r}^s + \lambda_i^s N_i^s + O^s + \varepsilon(L_{i,r}^s) \quad (2)$$

Eşitliklerdeki r ve i sırasıyla alıcıyı ve sinyal frekansını, s ise GNSS türünü (G:GPS, R:GLONASS, E:Galileo ve C:BeiDou) göstermektedir. Ayrıca, $P_{i,r}^s$ kod ölçüsünü (m), $L_{i,r}^s$ faz ölçüsünü (m), ρ_r^s uydu-alıcı arası geometrik uzunluğu (m), c ışık hızını (m/sn), Δt_r^s alıcı-donanım kod hatasına göre düzenlenmiş alıcı saat hatasını (s), ΔT^s uydu donanım kod hatasına göre düzenlenmiş uydu saat hatasını (s), T_r^s troposferik gecikmeyi (m), $I_{i,r}^s$ ilgili frekanstaki iyonosferik gecikmeyi (m), O^s uydu yörünge hatasını (m), N_i^s alıcı ve uydu kod ve faz hatalarına göre düzenlenmiş tam sayı belirsizliğini, λ_i^s ilgili frekansın dalga boyunu (m) ve $\varepsilon(\cdot)$ ise çokyolluluk (multi-path) hatası dahil diğer modellenemeyen hataları (m) ifade etmektedir. Yukarıdaki eşitliklerdeki uydu yörünge ve saat hatalarını yok etmek için MGEX hassas ürünleri kullanılır. Ayrıca birinci dereceden iyonosferik gecikmeyi yok etmek için her bir sistemdeki frekansların (f_1 ve f_2) ikili kombinasyonu ile iyonosferden bağımsız kod ve faz gözlem eşitlikleri aşağıdaki formüller yardımıyla oluşturulur.

$$P_{IF,r}^s = (f_1^2 P_1^s - f_2^2 P_2^s) / (f_1^2 - f_2^2) \quad (3)$$

$$L_{IF,r}^s = (f_1^2 L_1^s - f_2^2 L_2^s) / (f_1^2 - f_2^2) \quad (4)$$

Eşitliklerdeki $P_{IF,r}^s$ ve $L_{IF,r}^s$, sırasıyla iyonosferden bağımsız kod ve faz ölçülerini, f_1 ve f_2 ise taşıyıcı dalga frekanslarını göstermektedir. Böylelikle uydu saat hatası, yörünge hatası ve iyonosferik hatadan arındırılmış GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou sistemleri için kod ve faz gözlemlerinin iyonosferden bağımsız gözlem eşitlikleri aşağıdaki gibi oluşturulmaktadır.

$$P_{IF,r}^G = \rho_r^G + c\Delta t_r^G + T_r^G + \varepsilon(P_{IF,r}^G) \quad (5)$$

$$L_{IF,r}^G = \rho_r^G + c\Delta t_r^G + T_r^G + \lambda_{IF}^G N_{IF}^G + \varepsilon(L_{IF,r}^G) \quad (6)$$

$$P_{IF,r}^R = \rho_r^R + c\Delta t_r^G + cdt_{sys}^R + T_r^R + \varepsilon(P_{IF,r}^R) \quad (7)$$

$$L_{IF,r}^R = \rho_r^R + c\Delta t_r^G + cdt_{sys}^R + T_r^R + \lambda_{IF}^R N_{IF}^R + \varepsilon(L_{IF,r}^R) \quad (8)$$

$$P_{IF,r}^E = \rho_r^E + c\Delta t_r^G + cdt_{sys}^E + T_r^E + \varepsilon(P_{IF,r}^E) \quad (9)$$

$$L_{IF,r}^E = \rho_r^E + c\Delta t_r^G + cdt_{sys}^E + T_r^E + \lambda_{IF}^E N_{IF}^E + \varepsilon(L_{IF,r}^E) \quad (10)$$

$$P_{IF,r}^C = \rho_r^C + c\Delta t_r^G + cdt_{sys}^C + T_r^C + \varepsilon(P_{IF,r}^C) \quad (11)$$

$$L_{IF,r}^C = \rho_r^C + c\Delta t_r^G + cdt_{sys}^C + T_r^C + \lambda_{IF}^C N_{IF}^C + \varepsilon(L_{IF,r}^C) \quad (12)$$

Eşitliklerde, her bir sistem için ayrı alıcı saat hatası belirtmek yerine GPS'e göre olan farkı yansıtan sistemler-arası fark parametreleri (cdt_{sys}^R , cdt_{sys}^E ve cdt_{sys}^C) modele dâhil edilmiştir.

3. WEB-TABANLI ONLINE GNSS VERİ DEĞERLENDİRME SERVİSLERİ

PPP yöntemi ile konum belirleyebilmek için farklı alternatifler bulunmaktadır. Bunlar genel olarak şöyle sıralanabilir:

- Bilimsel (Akademik) Programlar (Bernese, GipsyX vd),
- Ticari Programlar (GrafNav vd),
- In-house Programlar (RTKLib, Net_Diff vd),
- Web-tabanlı Online GNSS Değerlendirme Servisleri (APPS, CSRS-PPP, magicGNSS, Trimble RTX-PP vd).

Bunlardan bilimsel tabanlı olanların kullanılabilmesi için güçlü bir GNSS teorik bilgiye sahip olunması gerekmektedir. Bazıları ücretsiz olmakla birlikte, örneğin en yaygın kullanılanlarından birisi olan Bernese yazılımı için oldukça ciddi miktarda bir lisans ücreti ödenmesi gerekmektedir. Benzer durum ticari programlar için de geçerlidir. In-house programlar ise genellikle bir kurumun kendi imkanları ile yapılmakta olup, kodlayan kullanıcının ihtiyaçlarını ön plana aldığı, buna bağlı olarak da elde edilen sonuçların programı hazırlayanların kurduğu algoritmaya doğrudan bağlı olduğu, çoğunlukla da kullanımı pratik olmayan yazılımlardır (Alkan ve diğ., 2015). Son gruptakilerse, web-tabanlı online değerlendirme servisleri, diğer yaklaşımlardaki pek çok olumsuzluk olmaksızın, oldukça kolay bir şekilde GNSS verilerinin değerlendirilmesine imkân sağlamaktadır. Hemen hemen tümü ücretsiz olan bu servislerin kullanılabilmesi için internet bağlantısı olan bir bilgisayar ile geçerli bir e-posta adresi genellikle yeterli olmaktadır. Temel seviyede GNSS bilgisine sahip bir kullanıcının yapması gereken, sahada topladığı GNSS verilerini servislerin web-tabanlı ara yüzlerinden yararlanarak veya e-posta/FTP aracılığıyla servise ulaştırmasıdır. Değerlendirme aşamasında ise, veri değerlendirme yöntemi (statik/kinematik), atmosferik hata düzeltme yöntemi, kullanılan antenin tanıtılması ve çözümün hangi koordinat sistemine dayalı olacağı gibi temel bazı bilgilerin girilmesinden ibaret olmaktadır. Servisler verileri aldıktan sonra değerlendirmeye başlamakta ve toplanan verinin boyutuna, internet hızına ve servisin yoğunluğuna bağlı olarak kısa sayılabacak bir süre sonrasında (genellikle dakikalar mertebesinde) sonuçları çeşitli formatlarda göndermektedir. Bu sonuçlar, sadece

PPP koordinatlarını değil, aynı zamanda sonuçların yorumlanmasına imkân sağlayacak ek bilgileri (saat hataları, troposferik toplam zenit gecikmesi, DOP-Dilution of Precision) grafikler ve tablolarla zenginleştirerek rapor halinde kullanıcılara göndermektedir. Servislerin bazıları sadece GPS verilerini kabul ederken, pek çoğu buna ek olarak diğer uydu sistemlerini de hesaplarına katarak çoklu-GNSS PPP çözümü üretmektedir. Önemli bir kısmı float çözüm ile sonuçları hesaplarken (APPS, CSRS-PPP, magicGNSS gibi), kısıtlı sayıdaki birkaçı da (Trimble RTX-PP gibi) “başlangıç belirsizliği”ni ya da “tamsayı belirsizliği”ni sabitleyerek (PPP with ambiguity resolution - PPP-AR) çözüm vermektedir. Hiç şüphesiz ikinci yaklaşım, yakınsamanın gerçekleşmesi için yeterli ölçme süresi olması halinde float çözüme göre daha yüksek doğruluk sağlamaktadır.

Diğer yandan bu tür servislerin dezavantajları, standart veri değerlendirme seçenekleri dışında kullanıcıya çoğunlukla alternatif sunulmaması veya sınırlı olması, değerlendirme süreci sonunda yapılan hesaplara ilişkin ayrıntılı bilgi verilmemesi, internet hızına bağlı olarak büyük hacimli verilerin yüklenmesi ve/veya sonuçların alınmasındaki gecikmelerdir. Ayrıca Internet bağlantısındaki kesintiler veya yapılan güncellemeler nedeniyle servislere erişilememesi de önemli bir sorun olabilmektedir.

Çalışmanın uygulama kısmında kullanılan online servisler ile ilgili veri değerlendirme yöntemleri, çözüm için kullandıkları ürünler ve genel olarak son kullanıcı deneyimi ile ilgili bilgiler, izleyen kısımlarda verilmektedir.

3.1. Automatic Precise Positioning Service (APPS)

Automatic Precise Positioning Service (APPS), NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) tarafından işletilen web-tabanlı bir GPS değerlendirme servisedir. Servis JPL tarafından üretilen gerçek zamanlı, günlük ve haftalık GPS yörünge ve saat bilgilerini kullanmaktadır. APPS, sadece GPS uydularından alınan çift frekanslı verileri değerlendirerek GIPSY 6.4 bilimsel yazılımı ile statik veya kinematik (kayıtlı kullanıcılar için) yöntemlerle PPP koordinatlarını hesaplamaktadır. RINEX 2, RINEX 2.11 formatlarındaki veriler, servisin web sayfası aracılığıyla kısıtlı seçeneklerle veya e-posta/FTP ile gönderilebilmektedir. Değerlendirme aşamasında NASA Jet Propulsion Laboratory tarafından üretilen hassas uydu yörünge ve saat ürünlerinden (real-time, ultra-rapid, rapid ve final) yararlanılmaktadır. En yüksek doğruluklu hassas uydu yörünge ve saat düzeltmeleri haftalık periyodlarda üretilerek yayınlanmakta olup, en yüksek doğruluk için bu sürenin beklenmesi gerekmektedir (Alkan ve diğ., 2017). Gönderilen veriler ITRF14 datumunda hesaplanarak, diğer ek bilgiler ile kullanıcılara gönderilmektedir. APPS-PPP

değerlendirme servisi ile ilgili güncel bilgiler servisin web sayfasında yer almaktadır (Int Kyn. 2).

3.2. Canadian Spatial Reference System-Precise Point Positioning (CSRS-PPP)

CSRS-PPP, Geodetic Survey Division of Natural Resources Canada (NRCan) tarafından işletilen web-tabanlı bir GNSS-PPP değerlendirme servisidir. Üyelik sistemi ile çalışan servis ile tek veya çift frekanslı GNSS gözlemleri (GPS ve GLONASS), statik veya kinematik olarak PPP yöntemi ile değerlendirilmektedir. Servis, 2003 yılından bu yana 3 milyondan fazla GNSS veri setini değerlendirerek tüm dünyadaki kullanıcılara ücretsiz olarak hizmet vermektedir. Kullanıcıların yapması gereken, sahada topladıkları RINEX (max. 300 MB, *.zip, *.gzi, *.gz, *.Z, *.tar, veya *.??O formatlarında) verileri, değerlendirme yöntemi (statik/kinematik), referans sistemi seçimi (NAD83 veya ITRF14) ile gerekirse kıyı bölgesi uygulamaları için okyanus gelgit yükleme dosyalarını yüklemesinden ibarettir.

Servis verileri aldıktan sonra, o zaman itibarıyla IGS veya NRCan tarafından üretilen en iyi hassas uydu yörünge ve saat ürünlerini (ultra-rapid, rapid veya final) kullanarak verileri değerlendirmekte ve statik veya kinematik olarak PPP koordinatları hesaplamaktadır. Statik yöntem seçilmişse, düzeltilmiş tek bir ortalama koordinat hesaplanmakta, kinematik yöntemde ise düzeltilmiş bir iz (yörünge) üretilmektedir. Ancak GPS için ölçmeler yapıldıktan sonraki ilk 90 dakika, GLONASS için de 3 saat boyunca çözüm üretilmemektedir. Yapılan değerlendirme sonuçları PPP koordinatları ve değerlendirmeye ait ek bilgileri içeren dosyalar halinde kullanıcıya e-posta aracılığıyla iletilir. CSRS-PPP değerlendirme servisi hakkında detaylı bilgiler servisin web sayfasında yer almaktadır (Int Kyn. 3).

3.3. magicGNSS-PPP

İspanya menşeli GMV Aerospace and Defense Company tarafından geliştirilen magicGNSS değerlendirme servisi, 2008 yılında kullanıma sunulmuştur. Web-tabanlı olarak hizmet veren magicGNSS'in ücretsiz olan e-posta servisi aracılığıyla sadece GPS ve GLONASS verileri değerlendirilebilirken, belirli bir ücret ödenerek kayıt yaptıran kullanıcılar GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou ve QZSS uydularından alınan verileri de değerlendirebilmektedir. Statik ve kinematik değerlendirme seçeneklerine sahip servis, IGS ve GMV'nin ürettiği uydu yörünge ve saat ürünlerini kullanarak gönderilen çift frekanslı GNSS verilerini değerlendirmektedir. Servis, RINEX 2.xx ve 3.xx formatındaki GNSS verilerini kabul etmektedir. İşlemin tamamlanmasının ardından PPP koordinatları ve değerlendirme işlemine ait pek çok istatistiksel bilgiyi de içeren rapor ve grafikler, e-posta ile kullanıcılara kısa bir süre içerisinde gönderilmektedir. magicGNSS değerlendirme servisi

hakkında detaylı bilgiler servisin web sayfasında yer almaktadır (Int Kyn. 4).

3.4. Trimble CenterPoint RTX Post-processing Service (Trimble RTX-PP)

Trimble firması tarafından kullanıma sunulan Trimble CenterPoint RTX (Real Time eXtended) Post-processing servisi (Trimble RTX-PP), statik ölçmelerle toplanan verilerin ücretsiz bir şekilde değerlendirilmelerine imkân sağlamaktadır. Servisten limitsiz bir şekilde yararlanmak isteyen kullanıcıların servise kayıt olması ve her yıl kayıtlarını yenilemeleri yeterli olmaktadır. Firmanın kendi alıcı formatı ile RINEX 2.xx ve RINEX 3.xx formatlarındaki verileri kabul eden servis, GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou ve QZSS) gözlemlerini içeren dosyayı aldıktan sonra değerlendirilmeye başlamakta, sonuçları içeren bir PDF dosyasını kullanıcının e-posta adresine kısa bir süre içerisinde göndermektedir. Servis, ITRF sisteminde ve ölçme yapılan epokta hesaplanan koordinatları başka bir epoğa kaydırma işleminde, ölçmelerin yapıldığı konum için hesaplanmış yıllık tektonik plaka hareket verilerini kullanmaktadır. RTX-PP servisi "başlangıç belirsizliği"ni tamsayılarla sabitleyerek, ambiguity fixed çözüm ile noktaların koordinatlarını hesaplamaktadır. Bu durum yakınsama süresini ciddi şekilde kısaltmaktadır (Doucet et al., 2012). Servis aracılığıyla ulaşılabilecek doğruluk değeri, pek çok faktöre bağlı olarak değişmekle birlikte, en az 1 saatlik verilerin değerlendirilmesi sonucunda yatayda 2 cm ve daha iyi, düşeyde de 6 cm ve daha iyi olarak verilmektedir. Servis hakkında daha detaylı bilgiler, servisin ilgili web sayfasında yer almaktadır (Int Kyn. 5).

4. UYGULAMA

4.1. GNSS Ölçmeleri

Farklı GNSS uydu sistemlerinin Hassas Nokta Konumlama (PPP) tekniğinin doğruluk performansına etkisini belirleyebilmek için, İTÜ Ayazağa Kampüsü içerisinde farklı çevresel ve topografik özelliklere (dolayısıyla farklı uydu gözlem özelliklerine) sahip;

- Açık Alan,
- Orman Alanı,
- Su Kıyısı (Gölet Alanı),
- Yoğun Yerleşim Alanı

olmak üzere 4 farklı bölgede jeodezik noktalar tesis edilmiş, bu noktalarda statik ölçmeler yapılmıştır. Söz konusu bu ölçme bölgelerinin temel özellikleri aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Açık Alan: Gökyüzü görüşünün açık olduğu, herhangi bir engel bulunmayan ve uydulardan gelen sinyalleri engelleyici doğal veya yapay objelerin olmadığı alanlardır. Bu kapsamda 3 adet nokta tesis edilmiştir (Açık Alan 1, Açık Alan 2, Açık Alan 3). Tesis edilen noktalardan bazı görüntüler Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Açık Alanda Tesis Edilen Nokta Örnekleri

Orman Alanı: Yüksek ağaçların yoğun bir şekilde bulunduğu alanlar olarak tanımlanmıştır. Bu kapsamda 3 adet nokta tesis edilmiştir (Orman 1, Orman 2, Orman 3). Tesis edilen noktalardan bazı görüntüler Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Ormanlık Alanda Tesis Edilen Nokta Örnekleri

Su Kıyısı (Gölet Alanı): Kampüs içerisinde bulunan göletin hemen çevresindeki alan olarak tanımlanmıştır. Bu kapsamda 3 adet nokta tesis edilmiştir (Gölet 1, Gölet 2, Gölet 3). Tesis edilen noktalardan bazı görüntüler Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. Su Kıyısında Tesis Edilen Nokta Örnekleri

Yoğun Yerleşim Alanı: Kampüste yer alan yüksek katlı yapıların çevresindeki alanlar olarak tanımlanmıştır. Bu kapsamda 3 adet nokta tesis edilmiştir (Yoğun 1, Yoğun 2, Yoğun 3). Tesis edilen noktalardan bazı görüntüler Şekil 4’de verilmiştir.



Şekil 4. Yoğun Yerleşim Alanında Tesis Edilen Nokta Örnekleri

Tesis edilen 12 noktada 90 ila 120 dakika arasında değişen sürelerde CHCNAV i80 multi-frekans, multi-constellation GNSS alıcısı ile 9 ve 11 Mart 2020 tarihlerinde statik GNSS ölçmeleri gerçekleştirilmiştir. 10 derece uydu yükseklik açısı ve üzerinde görülebilen tüm uydu sistemlerine ait veriler 5 saniye kayıt aralığında toplanmıştır. Ölçmelerde kullanılan alıcıların temel bazı teknik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir (Int Kyn. 6).

Tablo 1. Ölçmelerde Kullanılan CHCNAV i80 GNSS Alıcılarının Temel Bazı Özellikleri

GNSS ÖZELLİKLERİ

- GPS: L1C/A, L2C, L2E, L5
- GLONASS: L1C/A, L1P, L2C/A, L2P, L3
- Galileo: E1, E5A, E5B
- BeiDou: B1, B2
- NavIC (IRNSS): L1C/A, L5

ÖLÇME DOĞRULUĞU

Yüksek Hassasiyetli Statik

Yatay: 2.5 mm + 0.1 ppm RMS

Düşey: 3.5 mm + 0.5 ppm RMS

Post-Processed / Gerçek-Zamanlı Kinematic

Yatay: 8 mm + 1 ppm RMS

Düşey: 15 mm + 1 ppm RMS

Ağ RTK

Yatay: 8 mm + 0.5 ppm RMS

Düşeyde: 15mm + 0.5 ppm RMS

Ölçmeler süresince her bir noktada gözlemlenen GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou uydularının sayıları ile DOP (Dilution of Precision-Duyarlılık Kaybı) değerleri Tablo 2’de özet olarak verilmiştir.

Tablo 2’de verilen değerlere bakıldığında, ölçme yapılan jeodezik noktalarda GPS (G) için en az 3 en fazla 9, ortalama 7; GLONASS (R) için en az 2 en fazla 8, ortalama 5; Galileo (E) için için en az 2 en fazla 8, ortalama 5; BeiDou (C) için en az 1 en fazla 10, ortalama 6 ve tümü için en az 12 en fazla 30, ortalama 23 uydudan veri alındığı görülmektedir.

Diğer yandan hemen her noktada GPS’e ait ortalama GDOP değeri, diğer sistemlerin tümünden daha iyi bulunmuştur. Ancak tüm uyduların bir araya gelmesiyle oluşan 4’lü sistemde (GREC) GDOP değerleri en az 1 en fazla 2.9 ve ortalama olarak da 1.4 gibi oldukça iyi bir değere ulaşmıştır. Literatürde verilen farklı sınıflandırmalar olmakla birlikte, genel

bir fikir vermesi açısından DOP değeri ile navigasyon performansı arasındaki ilişki Tablo 3’de verilmiştir (Liu et al., 2013).

Tablo 2. Ölçme Yapılan Noktalardaki Uydu Sayıları ve GDOP Değerleri

Nokta No	Uydu Sayısı/ GDOP	GPS (G)			Galileo (E)			GLONASS (R)			BeiDou (C)			Tümü (GREC)		
		Min.	Max.	Ort.	Min.	Max.	Ort.	Min.	Max.	Ort.	Min.	Max.	Ort.	Min.	Max.	Ort.
Açık Alan 1	Uydu Sayısı	7	9	8	5	8	6	4	6	5	6	9	8	23	31	28
	GDOP	2.1	2.7	2.3	2.4	3.8	2.9	2.6	13.7	4.0	2.0	4.1	2.7	1.0	1.5	1.2
Açık Alan 2	Uydu Sayısı	6	9	8	5	7	6	3	6	5	6	9	8	23	29	26
	GDOP	1.7	3.4	2.4	2.6	4.5	3.1	0.0	13.7	5.9	2.1	9.0	3.1	1.0	1.5	1.2
Açık Alan 3	Uydu Sayısı	6	8	7	4	6	5	4	7	5	8	10	9	24	29	27
	GDOP	1.9	3.4	2.4	2.8	143840.9	274.2	1.8	15.9	3.9	2.4	4.1	3.0	1.0	1.4	1.2
Orman 1	Uydu Sayısı	5	9	7	4	6	5	3	8	6	3	8	5	17	28	24
	GDOP	2.2	10.4	3.1	2.9	449280.6	338.0	0.0	113.9	5.0	0.0	67.5	4.1	1.1	1.9	1.4
Orman 2	Uydu Sayısı	4	9	7	2	7	6	2	8	6	2	7	5	17	30	24
	GDOP	2.2	38.1	3.5	0.0	81.7	4.3	0.0	1321.8	10.5	0.0	1298.3	27.9	1.2	2.5	1.5
Orman 3	Uydu Sayısı	5	9	7	4	8	6	4	8	7	4	9	6	19	30	26
	GDOP	2.2	9.6	3.3	2.7	122.4	5.8	2.2	23.9	3.8	2.0	57.1	10.2	1.1	1.8	1.3
Gölet 1	Uydu Sayısı	5	8	7	4	6	5	4	7	5	4	6	5	19	26	22
	GDOP	2.1	6.8	3.3	2.7	32.0	7.0	2.3	86229.3	206.7	3.2	48.8	8.2	1.2	2.0	1.5
Gölet 2	Uydu Sayısı	5	7	6	4	5	5	4	6	5	3	6	4	16	24	20
	GDOP	2.8	6.7	4.0	3.3	63433.9	134.9	2.6	231.3	8.4	0.0	10722.2	35.8	1.2	2.9	1.6
Gölet 3	Uydu Sayısı	5	7	6	3	6	5	5	6	5	4	6	5	19	24	22
	GDOP	2.0	6.4	3.0	0.0	32.0	5.6	2.6	4.3	3.6	2.6	48.8	7.5	1.2	1.7	1.4
Yoğun 1	Uydu Sayısı	4	8	5	2	7	5	2	8	5	1	4	3	13	23	18
	GDOP	1.9	9364.1	14.4	0.0	33.0	5.0	0.0	100.3	4.7	0.0	100.1	5.1	1.2	2.1	1.6
Yoğun 2	Uydu Sayısı	3	7	5	3	6	5	2	7	5	1	3	2	12	21	17
	GDOP	0.0	9.7	4.2	0.0	29.4	5.2	0.0	68.0	6.1	0.0	0.0	0.0	1.2	2.3	1.6
Yoğun 3	Uydu Sayısı	4	8	6	4	6	5	5	8	7	5	8	7	20	29	25
	GDOP	2.0	6.8	3.3	2.5	249.3	7.9	2.2	13.6	3.0	2.3	3.9	3.0	1.1	1.5	1.3

Tablo 3. DOP Değerleri ve Navigasyon Performansı İlişkisi

DOP Değeri	Değerlendirme
≤1	İdeal
>1-2	Mükemmel
>2-5	İyi
>5-10	Orta Dereceli
>10-20	Makul
≥20	Zayıf

4.2. Verilerin Değerlendirilmesi ve Sayısal Sonuçlar

Farklı uydu sistemlerinin statik PPP çözümlerine olan etkisini araştırabilmek için 4’lü uydu sistemlerinin tümünden toplanan veriler aşağıda verilen farklı senaryolarda değerlendirilmiştir:

Senaryo 1- Sadece GPS (G)

Senaryo 2- GPS+GLONASS (G+R)

Senaryo 3- GPS+Galileo (G+E)

Senaryo 4- GPS+BeiDou (G+C)

Senaryo 5- GPS+GLONASS+Galileo (G+R+E)

Senaryo 6- GPS+GLONASS+BeiDou (G+R+C)

Senaryo 7- GPS+Galileo+BeiDou (G+E+C)

Senaryo 8- GPS+GLONASS+Galileo+BeiDou (G+R+E+C)

Günümüzde kullanılan online GNSS PPP değerlendirme yazılımlarının hemen tümünde çözümde kullanılmak istenilen uydu sistemleri seçilememekte, gönderilen RINEX dosyalarında hangi uydulara ait veriler varsa, onlar doğrudan değerlendirilmeye alınmaktadır. Bu yüzden ölçmelerde görünen tüm uydu sistemlerinden toplanan verilerin, yukarıdaki senaryolara göre değerlendirilebilmeleri için yeniden düzenlenmeleri gerekmektedir. Bunun içinde *gfzrnX-RINEX GNSS Data Conversion and Manipulation Toolbox* adlı programdan yararlanılmıştır. *gfzrnX* ‘GFZ Alman

Yerbilimleri Araştırma Merkezi (German Research Centre for Geosciences)’nin geliştirdiği bir yazılımdır. Bu yazılımla RINEX verilerinin;

i-) kontrol ve onarımı,

ii-) sürümler arasında dönüştürme,

iii-) veri bölme/birleştirme,

iv-) veri düzenlenmesi (veri toplama aralığı, GNSS uydu ve gözlem tipi seçimi,

v-) veri karşılaştırması,

gibi pek çok işlem yapılabilir. Yazılım GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, IRNSS ve QZSS uydu sistemlerini desteklemektedir. Yazılım ile ilgili bilgiler Nischan (2016)’da detaylıca verilmektedir. Bu program aracılığıyla tüm uydu sistemlerinden toplanan verileri içeren RINEX dosyaları, sadece her bir senaryoda belirtilen uydu sistemlerini içerecek şekilde alt gruplara ayrılarak, düzenlenmiştir. Böylelikle her nokta için alt RINEX dosyaları oluşturulmuştur. Örneğin sadece GPS olarak tanımlanan senaryoda sadece GPS uydularından alınan veriler bulunurken, GPS+Galileo olarak tanımlanan senaryoda ise GPS uyduları ile Galileo uyduları olacak şekilde düzenlenmiştir.

Bu işlemten sonra noktaların PPP yöntemi ile koordinatlarının belirlenmesi işlemine geçilmiştir. Bu kapsamda önceki bölümde incelenen web-tabanlı online GNSS PPP değerlendirme servisleri kullanılmıştır. Bunlar:

- Automatic Precise Positioning Service (APPS),
- Canadian Spatial Reference System-Precise Point Positioning (CSRS-PPP),
- magicGNSS-PPP,
- Trimble CenterPoint RTX Post-processing Service (Trimble RTX-PP)

servisleridir.

Tablo 4’de, her bir servisin hangi uydu sistemini/sistemlerini kullanarak değerlendirme yaptığı verilmiştir. Tabloda yer alan ✓ işareti servisten cevap alındığı, ✗ ifadesi ise servisten cevap alınmadığı anlamındadır.

Tesis edilen jeodezik noktalarda yapılan 4’lü uydu sistemlerinin tümünün toplandığı “Ana Veri Setleri (RINEX Dosyalar)” ile, çalışma kapsamında belirlenen senaryolara göre oluşturulan “Alt Veri Setleri (RINEX Dosyalar)” APPS, CSRS-PPP, magicGNSS ve Trimble CenterPoint RTX servislerine, statik PPP koordinatları hesaplanmak üzere gönderilmiştir. Bu süreçte ait bilgiler, servislerin özelliklerinin ele alındığı Bölüm 3’de verildiği için, tekrarlanmamıştır. Her bir servise uygun RINEX formatındaki veriler gönderildikten kısa bir süre sonra sadece PPP koordinatları değil, değerlendirme işlemine ve yapılan hesaplara ait pek çok bilginin yer aldığı raporlar ve dosyalar e-posta aracılığıyla tarafımıza iletilmiştir. Çalışmada magicGNSS yazılımından 2 nokta kümesi için (Açık Alan ve Orman Alanı) çözüm alınamamıştır.

Her bir servisten, Senaryo 1-8 için elde edilen statik-PPP nokta koordinatlarının doğruluğunu belirleyebilmek için, tesis edilen jeodezik noktaların yüksek doğrulukla elde edilmiş bilinen koordinatlarına ihtiyaç bulunmaktadır. Bilindiği

üzere günümüzde GNSS ile en yüksek doğrulukta konum, rölatif (görel) yöntem ile belirlenmektedir. Bu çalışmada da noktaların koordinatlarının bu yöntemle belirlenmesinin uygun olacağı değerlendirilmiştir. Bunun için İTÜ Ayazağa Kampüsü İnşaat Fakültesi çatısında yer alan IGS noktalarından birisi olan ISTA istasyonu referans nokta olarak alınmış ve buna bağlı olarak klasik rölatif yöntemle noktaların koordinatları hesaplanmıştır. Hesaplarda Trimble Business Center (TBC) yazılımı kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda her bir noktanın ITRF datumunda ve ölçme epöğündeki bilinen jeodezik koordinatları hesaplanmıştır. Yapılan hesaplar sonucunda noktaların yatay konum ve yükseklikleri sırasıyla 5 mm ve 11 mm'lik bir ortalama hata ile

hesaplanmıştır. Burada vurgulanması gereken bir durum, PPP koordinatı hangi uydu sistemi ile belirlendiyse, noktaların sabit koordinatları hesaplanırken de sadece o uydu sisteminin dikkate alındığıdır. Bununla birlikte rölatif yöntemden elde edilen bu koordinat setleri arasında anlamlı sayılmayacak düzeyde (birkaç mm mertebesinde) farklar bulunmuştur.

Son aşama olarak yukarıda bahsedilen tüm senaryolara göre hesaplanan statik PPP koordinatları rölatif yöntem ile belirlenmiş (bilinen) nokta koordinatları ile yatay konum (2D) ve elipsoidal yükseklik (h) bileşenleri için ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Elde edilen farklar Tablo 5'de ve Şekil 5'de verilmiştir.

Tablo 4. Çalışmada Kullanılan Servisler ve Değerlendirmeye Alınan Uydu Sistemleri

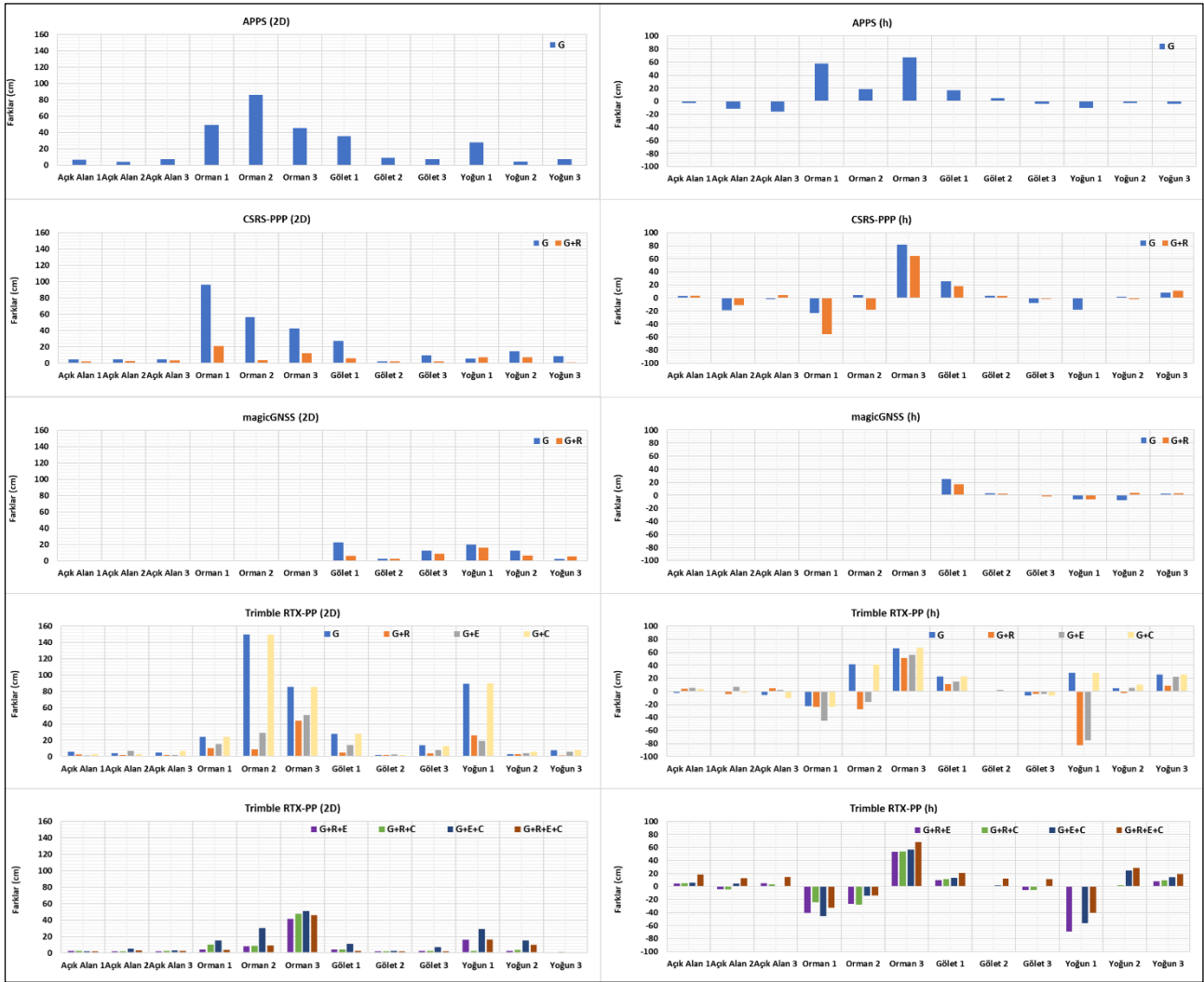
Nokta No.	APPS	CSRS-PPP			magicGNSS		Trimble CenterPoint RTX-PP						
	G	G	G+R	G	G+R	G	G+R	G+E	G+C	G+R+E	G+R+C	G+E+C	G+R+E+C
Açık Alan 1	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Açık Alan 2	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Açık Alan 3	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Orman 1	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Orman 2	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Orman 3	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Gölet 1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Gölet 2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Gölet 3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Yoğun 1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Yoğun 2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Yoğun 3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tablo 5. Jeodezik Noktaların Bilinen Koordinatlarıyla, Statik-PPP Koordinatları Arasındaki Farklar

Nokta No.	APPS		CSRS-PPP				magicGNSS			
	G	G	G	G	G+R	G+R	G	G	G+R	G+R
	2D (cm)	h (cm)	2D (cm)	h (cm)	2D (cm)	h (cm)	2D (cm)	h (cm)	2D (cm)	h (cm)
Açık Alan 1	6.7	-2.8	4.3	2.6	2.2	3.6	N/A	N/A	N/A	N/A
Açık Alan 2	3.8	-11.9	5.0	-19.0	2.5	-11.2	N/A	N/A	N/A	N/A
Açık Alan 3	7.2	-15.5	4.6	-2.1	2.8	3.7	N/A	N/A	N/A	N/A
Orman 1	49.1	57.9	96.0	-23.2	21.0	-55.4	N/A	N/A	N/A	N/A
Orman 2	85.8	19.2	56.3	3.9	3.4	-18.1	N/A	N/A	N/A	N/A
Orman 3	45.3	67.8	42.6	82.1	12.1	64.4	N/A	N/A	N/A	N/A
Gölet 1	35.3	16.9	27.0	25.7	6.0	18.1	22.4	25.1	6.2	16.7
Gölet 2	8.9	5.1	2.2	3.3	1.9	2.3	2.4	2.7	2.5	2.3
Gölet 3	6.8	-4.3	9.2	-7.6	1.7	-1.5	12.7	-0.2	8.9	-2.0
Yoğun 1	27.3	-10.3	5.6	-18.3	7.1	-0.6	20.1	-5.8	16.2	-6.0
Yoğun 2	4.3	-2.4	14.3	1.6	6.8	-2.3	12.9	-7.3	6.4	3.4
Yoğun 3	7.1	-4.0	8.6	7.9	0.9	11.2	2.1	2.2	5.5	3.0

Tablo 5 (devamı). Jeodezik Noktaların Bilinen Koordinatlarıyla, Statik-PPP Koordinatları Arasındaki Farklar

Nokta No.	Trimble CenterPoint RTX-PP															
	G		G		G+R		G+R		G+E		G+E		G+C		G+C	
	2D (cm)	h (cm)	2D (cm)	h (cm)	2D (cm)	h (cm)	2D (cm)	h (cm)	2D (cm)	h (cm)	2D (cm)	h (cm)	2D (cm)	h (cm)	2D (cm)	h (cm)
Açık Alan 1	5.5	-2.3	2.2	4.3	1.2	5.5	3.0	3.2	2.2	4.1	2.8	-4.9	2.1	5.9	2.0	18.2
Açık Alan 2	3.8	0.0	2.1	-4.0	6.7	7.0	3.1	-2.4	2.1	-4.2	2.0	4.5	5.3	4.6	3.2	13.0
Açık Alan 3	4.9	-5.5	1.8	5.0	2.1	2.1	6.9	-10.6	1.8	4.8	2.5	-3.1	3.1	-0.6	2.5	14.8
Orman 1	24.4	-22.2	9.9	-24.1	15.2	-45.5	23.9	-23.5	4.0	-40.9	10.4	24.4	15.3	-45.7	3.7	-32.7
Orman 2	150.0	41.5	8.4	-27.1	29.2	-15.8	149.5	41.1	8.2	-26.9	8.9	27.4	30.5	-14.3	9.1	-13.9
Orman 3	85.5	66.2	43.6	51.1	50.8	56.3	85.4	66.9	41.3	53.0	47.5	-53.6	50.7	56.5	45.7	68.6
Gölet 1	27.6	22.7	4.6	11.1	14.4	15.0	27.8	22.6	4.1	10.1	4.4	-11.0	10.7	13.1	2.8	21.1
Gölet 2	1.9	0.7	1.7	0.5	2.2	1.9	1.8	0.6	2.0	-0.7	2.0	0.8	2.4	1.4	2.0	12.3
Gölet 3	13.3	-6.7	3.3	-3.6	8.0	-3.7	13.1	-6.6	2.3	-5.1	2.3	5.1	6.9	0.1	1.9	11.2
Yoğun 1	89.1	28.5	26.1	-83.3	19.0	-75.4	89.6	28.5	15.6	-69.4	2.3	0.2	29.4	-56.5	16.5	-40.2
Yoğun 2	3.3	4.8	2.8	-2.6	4.2	5.3	5.7	10.2	2.5	0.8	3.6	-2.0	15.5	24.6	9.8	28.6
Yoğun 3	7.4	25.7	1.1	9.2	5.6	22.2	7.8	25.9	1.0	7.8	1.2	-9.2	1.0	14.2	0.7	19.0

**Şekil 5.** Kullanılan Yazılımlara Göre Elde Edilen Farklar

4.3. Bulgular ve Tartışma

Ölçmelere ait GDOP değerleri ile gözlenen uydu sayılarının verildiği Tablo 2 incelendiğinde, GDOP değerlerinin ortalamalarının yalnızca GPS uydularına ait olan değerlerin, diğer uydu sistemleri ile karşılaştırıldığında en iyi olduğu; buna karşın bütün uydu sistemlerinin bir araya gelmesiyle oluşan dördü sistemde ise bu değer tekli sistemlere göre çok daha iyi olduğu (GDOP=1.4) görülmektedir. Noktaların bir kısmının GNSS

ölçmeleri açısından kısıtlı yerlerde olduğu, yani etraflarının veri almaya engel yapay/doğal objelerle kapatılmış olduğu göz önüne alındığında, bu sonuç son derece önemlidir. Bu tür zorlu koşullarda çoklu-GNSS yapısı uydu sayısını artırmakta, buna bağlı olarak da uyduların dağılım geometrisini iyileştirerek konum doğruluğunun artmasına önemli katkı sağlamaktadır.

Tablo 5’de ve Şekil 5’de, en iyi koşullara sahip, genel olarak uydu gözlemi için bir kısıtın/engelin olmadığı “Açık Alan”larda yapılan ölçmelerden

yalnızca GPS ölçülerinin değerlendirildiği sonuçlara bakıldığında, APPS, CSRS-PPP ve Trimble RTX-PP servislerinden yatay konumda cm'ler mertebesinde, yükseklikte ise Trimble RTX-PP servisi ile yine cm, diğer servislerde ise 2 dm'ye varan farklar elde edilmiştir. Diğer ölçme bölgelerinde ise, gerek yatay konum, gerekse de yükseklik bileşeninde dm'ler mertebesine varan farklar bulunmuştur.

GPS ve GLONASS uydularının birlikte değerlendirilmesi sonucunda "Açık Alan" daki noktalar için elde edilen farkların, yalnızca GPS verilerinin değerlendirilmesine göre çok daha iyileştiği ve cm'ler mertebesine ulaştığı görülmüştür. Orman koşullarında yapılan ölçmelerin değerlendirilmesi sonucunda yatay konumda cm-dm mertebesinde farklar elde edilmişken, yükseklikte yarım metreye varan farklar elde edilmiştir. GPS+GLONASS konfigürasyonunun Gölet bölgesindeki 3 noktada da yatay konum doğruluğunu iyileştirdiği (cm mertebesinde), yükseklikte de Gölet 1 noktası hariç birkaç cm'lik farkların elde edildiği görülmüştür. Son olarak Yoğun 1, 2 ve 3 noktalarının tümünde de iyileşme görülmekteyken, Yoğun 1 noktası hariç diğerlerinde cm-dm mertebesinde farklar elde edilmiştir.

Çalışmada kullanılan APPS servisi yalnızca GPS verilerini değerlendirebilirken, CSRS-PPP ile magicGNSS'in ücretsiz hizmet veren servisi yalnızca GPS ve GPS+GLONASS uydularından alınan verileri birlikte değerlendirebilmektedir. Çalışmada kullanılan alıcılarla bu uyduların dışında Galileo ve BeiDou uydularından da gözlemler yapılmış olup, bu verilerin değerlendirilebilmesi sadece Trimble CenterPoint RTX-PP servisi ile mümkün olabilmektedir. RTX-PP servisi ile "Açık Alan" da yapılan ölçmelerin değerlendirilmesi sonucunda G, GR, GE, GC, GRE, GRC, GEC ve GREC uydu konfigürasyonlarında cm'ler mertebesinde yatay konum farklarına ulaşılmıştır. Bunların yükseklik bileşenleri içinse GREC konfigürasyonunda dm, diğerlerinde ise cm mertebesinde fark elde edilmiştir. "Orman, Gölet ve Yoğun Alan" bölgelerinde birkaç istisna hariç olmak üzere, GR, GRE, GRC ve GREC konfigürasyonunda yatay konumda cm'ler mertebesinde farklar elde edilirken, yükseklikte cm ila dm'ler arasında değişen farklara ulaşılmıştır.

Sonuçlar, değerlendirmede kullanılan servislere göre de yorumlanmıştır (Tablo 5 ve Şekil 5). Yalnızca GPS verilerini değerlendirmesi nedeniyle çoklu-GNSS olarak kabul edilemeyecek olan APPS servisinden elde edilen sonuçlara bakıldığında, ölçme koşullarının güçleştiği alanlarda noktaların yatay konum ve yüksekliklerinin bilinen koordinatlarla karşılaştırmasından elde edilen farkların arttığı, GNSS ölçme koşullarının zor olduğu bu tip bölgelerde yapılan konum belirleme çalışmalarının daha düşük doğrulukla sonuçlar ürettiği söylenebilmektedir.

CSRS-PPP servisinden elde edilen yatay konum ve yükseklik farklarına bakıldığında, açık alanlarda hem GPS, hem de GPS+GLONASS senaryolarından oldukça benzer ve iyi sonuçlar alındığı; buna karşın

daha zor ölçme koşullarına sahip başta ormanlık alanlar olmak üzere diğerlerinde ise GPS+GLONASS kombinasyonunun yalnızca GPS'e göre sonuçları iyileştirdiği görülmüştür.

magicGNSS servisi ile hesaplanan PPP koordinatlarının karşılaştırma sonuçlarına bakıldığında, GPS+GLONASS konfigürasyonunun yalnızca GPS'e göre yatay konumda iyileşme sağladığı gözlenmektedir. Ancak Orman ve Açık Alanlarda yapılan ölçmeler için sonuç alınamamıştır.

Diğer bir web-tabanlı servis olan Trimble CenterPoint RTX-PP, çalışmada ele alınan 8 ayrı senaryonun tümüne de olumlu cevap vermiş, tüm kombinasyonlar için sonuç alınabilmektedir. Bu servis ile PP-AR yaklaşımı ile çözüm elde edildiği belirtilmiş olsa da, genel olarak bakıldığında float çözüm yapan diğer servislere göre daha iyi sonuçlar elde edilememiştir. Ancak servisin kendi içerisindeki karşılaştırmasına bakıldığında çoklu-GNSS'in hemen tüm senaryolarda önemli iyileşmeler sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonuçların içerisinde en anlamlı iyileşmeler ölçme koşullarının daha zor olduğu Orman ve Yoğun Yerleşim Alanlarında olmuştur. Örneğin Orman 2 noktasında sadece GPS ile elde edilen yatay konum farkı 150 cm iken diğer GNSS sistemlerinin kullanılması ile cm'ler mertebesine indiği gözlenmektedir. Yine yoğun şehir alanını temsil eden Yoğun 1 noktasında çoklu-GNSS çözümlerinin, tekli sisteme göre daha iyi sonuçlar verdiği açık bir şekilde gözlenmektedir.

Kullanılan servislere göre yapılan bu değerlendirmeler sonucunda, aşağıdaki genel sonuçlara ulaşılmıştır:

1-) Uydu gözlemleri için engellerin olmadığı, gökyüzünün açık olduğu durumlarda tüm servislerden elde edilen farklar, hem yatay konum hem de yükseklik için santimetreler mertebesinde elde edilmiştir.

2-) Değerlendirme servislerinin içinde CSRS-PPP servisinin GPS+GLONASS konfigürasyonunun genel olarak özellikle konum bileşeni için oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

3-) Servislerin hiç birisi tek başına tüm konfigürasyonlarda ve her türlü ölçme koşulunda en iyi sonucu verememiştir. Bir başka ifadeyle servislerin her birinden ölçme yapılan noktaya ve kullanılan uydu konfigürasyonuna göre değişen sonuçlar elde edilmiştir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada farklı uydu sistemlerinin statik PPP nokta konum doğruluğuna olan etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda farklı ölçme koşullarına sahip noktalarda yapılan ölçmelerden elde edilen GNSS verileri farklı senaryolar eşliğinde web-tabanlı online GNSS PPP değerlendirme servisleri ile değerlendirilmiş ve farklı GNSS uydu sistemlerinin kullanılmasının PPP konum doğruluğunu nasıl etkilediği ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Çalışmadan elde edilen sonuçlardan uygun ölçme koşullarına sahip (yapay/doğal engellerin

olmadığı veya en az olduğu) ortamlarda yalnızca GPS uydu sistemi ile yapılan ölçmelerden cm mertebesinde doğrulukla konum belirlenebileceği, ancak daha zor ölçme koşullarına sahip bölgelerde tek GPS sistemi ile elde edilen doğruluğun düştüğü görülmüştür. Bu tür yerlerde çoklu-GNSS'in konum doğruluğunu artırdığı sonucuna varılmıştır.

Çalışmada kullanılan web-tabanlı GNSS değerlendirme servislerinin konum belirleme performanslarının, ölçmelerin yapıldığı noktanın koşullarına ve değerlendirmede kullanılan uydu sistemlerine çok yakından bağlı olduğu görülmüştür. Diğer yandan aynı verilerden dört farklı servisin tümünden de farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bunun en önemli nedeni servislerin arka planda kullandıkları yazılımların farklı olması, farklı stratejiler ile verileri değerlendirmeleridir. Buradan hareketle kullanıcıların tek bir servis ile yetinmeyip, oldukça kolay kullanıma sahip olan bu servislerin birden fazlası ile verilerini değerlendirmeleri, servislerce üretilen sonuç raporlarının titizlikle analiz edilerek yorumlamaları, dikkatle incelenmeleri önerilmektedir. Servislerden elde edilen koordinatlar arasındaki farkın ölçmelerden beklenen doğruluktan daha fazla olması durumunda bunun nedeni ortaya konulmaya çalışılmalı, hatta PPP yöntemine ek olarak SCOUT, OPUS, AUSPOS gibi rölatif yöntemle nokta koordinatlarını hesaplayan web-tabanlı online GNSS değerlendirme servislerinden de yararlanılmalıdır. Bu kapsamda mümkün olduğunca sahada bazı kontrol mekanizmalarının kurulması, tekrarlı ölçmelerin yapılması vb gibi işlemlerle ölçmelerin doğruluğu ve güvenirliliğinin artırılmasında da yarar bulunmaktadır. Zira servislerden elde edilen koordinatların derinlemesine analiz yapılmadan kullanılması durumu, özellikle zorlu koşullarda yapılan ölçmelerde kaba seviyede hatalara neden olabilecektir.

TEŞEKKÜR

Çalışma kapsamında sahada toplanan GNSS verilerimizin değerlendirilmesi imkanı sağladıkları için APPS, CSRS-PPP, magicGNSS ve Trimble CenterPoint RTX-PP online servislerine teşekkür ediyoruz.

ARAŞTIRMACILARIN KATKI ORANI

Ahmet Can Uçarlı: Literatür taraması, Veri toplama, Veri işleme, Araştırma, Makale yazma, Analiz ve yorum; **Fatih Demir:** Literatür taraması, Veri toplama, Veri işleme, Araştırma, Makale yazma, Analiz ve yorum; **Serdar Erol:** Denetim ve danışmanlık, Veri işleme, Makale yazma ve düzenleme, Analiz ve yorum, Eleştirel inceleme; **Reha Metin Alkan:** Fikir, Tasarım ve dizayn, Denetim ve danışmanlık, Makale yazma ve düzenleme, Analiz ve yorum, Eleştirel inceleme;

ÇATIŞMA BEYANI

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

KAYNAKÇA

- Alkan, R.M., Ozulu, İ.M. ve İlçi, V. (2015). Deniz Uygulamalarında Hassas Nokta Konumlama Tekniğinin (PPP) Kullanılabilirliği Üzerine Bir Araştırma. *Harita Dergisi*, 154, 1-8.
- Alkan, R.M., Ozulu, İ.M. ve İlçi, V. (2017). Klasik GNSS Veri Değerlendirme Yazılımlarına Alternatif Olarak Web-tabanlı Online Değerlendirme Servisleri. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 17(2), 603-619.
- Anderle, R.J. (1976). Satellite Doppler Positioning. *Proceedings of the International Geodetic Symposium*, Las Cruces, New Mexico, 12-14 October 1976, 47-75.
- Bahadur, B. and Nohutcu, M. (2019). Comparative Analysis of MGEX Products for Post-Processing Multi-GNSS PPP. *Measurement*, 145, 361-369; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.05.094>.
- Bisnath, S., and Collins, P. (2012). Recent Developments in Precise Point Positioning. *Geomatica*, 66(2), 103-111; <https://doi.org/10.5623/cig2012-023>
- Cai, C., Gao, Y., Pan, L., and Zhu, J. (2015). Precise Point Positioning with Quad-Constellations: GPS, BeiDou, GLONASS and Galileo. *Advances in Space Research*, 56(1), 133-143; <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.04.001>
- Choy, S., Bisnath, S. and Rizos, C. (2017). Uncovering Common Misconceptions in GNSS Precise Point Positioning and its Future Prospect. *GPS Solutions*, 21(1), 13-22; <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0545-x>.
- Dawidowicz, K. (2020). Sub-hourly Precise Point Positioning Accuracy Analysis – Case Study For Selected ASG-EUPOS Stations. *Survey Review*, 52(373), 341-351; <https://doi.org/10.1080/00396265.2019.1579988>.
- Doucet, K., Herwig, M., Kipka, A., Kreikenbohm, P., Landau, H., Leandro, R., Moessmer, M., Pagels, C. (2012). Introducing Ambiguity Resolution in Web-hosted Global Multi-GNSS Precise Point Positioning with Trimble RTX-PP. *Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012)*, Nashville, TN, USA; 17-21 September 2012, 1115-1125.
- Facio, Y. and Berber, M. (2020). Subsidence is Determined in the Heart of the Central Valley Using Post Processed Static and Precise Point Positioning Techniques. *Journal of Applied Geodesy*, 14(1); <https://doi.org/10.1515/jag-2019-0043>.
- Héroux, P. and Kouba, J. (2001). GPS Precise Point Positioning Using IGS Orbit Products. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and*

- Geodesy*, 26(6-8), 573-578; [https://doi.org/10.1016/S1464-1895\(01\)00103-X](https://doi.org/10.1016/S1464-1895(01)00103-X).
- Kahveci, M. ve Yıldız, F. (2012). GPS/GNSS Uydularla Konum Belirleme Sistemleri Teori ve Uygulama. Nobel Akademik Yayıncılık.
- Kiliszek, D., and Kroszczyński, K. (2020). Performance of the Precise Point Positioning Method Along with the Development of GPS, GLONASS and Galileo Systems. *Measurement*, 164, 108009; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108009>.
- Liu, R., Guo, B., Zhang, A. and Yimwadsana, B. (2020). Research on GPS Precise Point Positioning Algorithm with a Sea Surface Height Constraint. *Ocean Engineering*, 197, 106826; <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106826>.
- Liu, X., Wenhai, J., Bai, Y., and Fan, J. (2013). Global Coverage Performance Analysis Based on 4 BeiDou MEO Satellites. In: Sun J., Jiao W., Wu H., Shi C. (eds), China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings: BeiDou/GNSS Navigation Applications, Test & Assessment Technology, User Terminal Technology, 319-330, Springer Science & Business Media.
- Nie, Z., Liu, F., and Gao, Y. (2020). Real-time Precise Point Positioning with a Low-cost Dual-frequency GNSS Device. *GPS Solutions*, 24(1), Article:9; <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0922-3>.
- Nischan, T. (2016). GFZRNX-RINEX GNSS Data Conversion and Manipulation Toolbox (Version 1.05). GFZ Data Services. <http://doi.org/10.5880/GFZ.1.1.2016.002>.
- Rizos, C., Janssen, V., Roberts, C. and Grinter, T. (2012). Precise Point Positioning: Is the Era of Differential GNSS Positioning Drawing to an End? *Proceeding of the FIG Working Week 2012, Rome, Italy, 6-10 May*, paper 5909.
- Wang, M. (2014). Ambiguity Resolution with Precise Point Positioning (Unpublished doctoral thesis). University of Calgary, Calgary, AB. doi:10.11575/PRISM/24782.
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., and Webb, F. H. (1997). Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B3), 5005-5017; <https://doi.org/10.1029/96JB03860>.

Internet kaynakları

- Kyn. 1: CSNS-TARC Test and Assessment Research Center of China Satellite Navigation Office. <http://www.csno-tarc.cn/en/index/index> (11.08.2020).
- Kyn. 2: The Automatic Precise Positioning Service of the Global Differential GPS System. <https://apps.gdgps.net> (11.08.2020).
- Kyn. 3: Natural Resources Canada, Precise Point Positioning. <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php> (11.08.2020).
- Kyn. 4: magicGNSS Quality Data, Algorithms and Products for the GNSS User Community. <https://magicgnss.gmv.com> (11.08.2020).
- Kyn. 5: The Trimble CenterPoint RTX Post-Processing Service. <https://www.trimblertx.com> (11.08.2020).
- Kyn. 6: CHCNAV i80 GNSS. <https://www.chcnav.com/product-detail/i80-gnss> (11.08.2020).



© Author(s) 2021. This work is distributed under <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>