



# Otonom araçlarda çoklu GNSS uydu sistemleri kullanımının konum doğruluğuna etkisinin araştırılması

## Investigation of the effect of multiple GNSS satellite systems usage on position accuracy in automated vehicles

Ahmet Can Uçarlı<sup>1</sup> , Veli İlçi<sup>2,\*</sup> , Kerem Par<sup>3</sup> , Ali Ufuk Peker<sup>4</sup> 

<sup>1,2</sup>Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 55200, Samsun, Türkiye

<sup>3,4</sup>Okan Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 34959, İstanbul, Türkiye

### Öz

Otonom araçlar günümüzde son teknoloji ürünlerin kullanıldığı, hızla gelişen çalışma alanlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Hemen hemen bütün araç firmalarının yanı sıra Google, Uber, Apple, Nvidia ve Huawei gibi uluslararası firmalar da ar-ge çalışmalarını kapsamında otonom araç teknolojilerine büyük yatırımlar yapmaktadırlar. Otonom araçların en önemli bileşenlerinden biri de şehir içi gibi zorlu alanlar da dâhil aracın konumunun olabildiğince doğru ve güvenilir olarak belirlenmesidir. Bu çalışmada hareket halindeki 4. Seviye bir otonom aracın konumunun belirlenmesinde GPS, GLONASS, GALILEO ve BEIDOU uydu sistemlerinin etkisi araştırılmıştır. PPP tekniği kullanılarak elde edilen araç konumunun belirlenmesi için 4 farklı uydu sisteminin 8 farklı kombinasyonla performansları değerlendirilmiştir. Tüm uydu sistemleri verileri kullanılarak elde edilen çözümün en yüksek doğruluğa ulaşmada etkili olduğu bu çalışmada özellikle GALILEO sisteminin çözüme olumlu katkısı olduğu belirlenmiştir. Eksik çözüm zamanları yönünden değerlendirme yapıldığında da GPS+GALILEO çözümünün kesintisiz konum bilgisi elde etmede önemli başarı sağlayabildiği görülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Otonom araçlar, GNSS konum belirleme, GPS, GLONASS, Galileo, Beidou

### 1 Giriş

Otonom araçlarda temel amaç aracın çevresini algılayabilmesi ve güvenle seyahatini sürdürebilmesidir. Bu araçlar ihtiyaç duydukları insan desteği ve geliştirilen sistemlere göre Seviye-0 (otomasyon-yok), Seviye-1 (sürücü yardımı), Seviye-2 (kısmi otomasyon), Seviye-3 (koşullu otomasyon), Seviye-4 (yüksek otomasyon) ve Seviye-5 (tam otomasyon) olmak üzere toplam altı sınıfa ayrılmaktadır [1]. Yakın gelecekte kullanılması planlanan bu son teknoloji sistemler için Amerika, Avrupa Birliği, İngiltere ve Japonya gibi ülkeler başta olmak üzere yasal altyapının oluşturulması çalışmaları sürdürülmektedir. Veri depolama, robotik kontrol sistemleri, güç kullanımı, veri işleme, yazılım, algılayıcı sensörler (kamera, lidar, radar, ultrasonik vb.) ve konum belirleme sistemleri otonom araç teknolojilerinin temel bileşenleridir. Otonom aracın güvenli şekilde seyahatini devam ettirebilmesi için öncelikle kendi

### Abstract

Automated vehicles stand out as one of the rapidly developing fields where cutting-edge technology products are used today. Almost all vehicle companies and international companies such as Google, Uber, Apple, Nvidia, and Huawei make significant investments in autonomous vehicle technologies as part of their R&D studies. One of the essential components of autonomous vehicles is to determine the vehicle's position as accurately and reliably as possible, including in challenging areas such as urban areas. In this study, the effect of GPS, GLONASS, GALILEO and BEIDOU satellite systems in determining the position of a Level 4 autonomous vehicle in motion was investigated. In order to determine the vehicle position obtained using the PPP technique, the performances of 4 different satellite systems with eight different combinations were evaluated. This study determined that the solution obtained by using all satellite system data was effective in achieving the highest accuracy, and especially the GALILEO system contributed positively to the solution. When evaluated in terms of missing data spans, it is seen that the GPS+GALILEO solution can achieve significant success in obtaining uninterrupted location information.

**Keywords:** Automated vehicles, GNSS positioning, GPS, GLONASS, Galileo, Beidou

konumunu küresel bir koordinat sisteminde yüksek doğrulukla belirleyebilmesi gerekmektedir. Araç genellikle hafızasında daha önceden oluşturulmuş olan yüksek doğruluklu ve 3-boyutlu mobil harita üzerinde konumunu belirler ve çevresindeki yollar, binalar vb. taşınmazlara göre kendini konumlandırmış olur. Sonrasında ise sahip olduğu algılama ve görüntüleme sensör verilerini de kullanarak hareketli cisimlerin durumuna göre karar mekanizmalarını kullanır ve güvenli şekilde seyahatini sürdürmeyi amaçlar.

Otonom araçlar diğer tüm araçlar gibi tüneller, şehir içi güzergâhlar vb. uydu sinyallerinin kısmen veya tamamen kesilmesine neden olan zorlu ortamlarda seyahat etme durumunda olabilirler. Güvenli seyahat koşulunu sağlayabilmeleri için araçların tüm zorlu ortamlarda doğru ve güvenilir konum bilgisini elde etmeleri gerekmektedir. Gerçek-zamanlı kinematik (RTK) tekniği günümüzde

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: veli.ilci@omu.edu.tr (V. İlçi)

Geliş / Received: 03.03.2022 Kabul / Accepted: 18.04.2022 Yayımlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1082124

yaygın olarak kullanılan GNSS ölçüm tekniklerinden biridir [2]. Bu teknik bilinen bir noktaya kurulan bir referans alıcı ve bir gezici alıcı olmak üzere en az iki GNSS alıcısının kullanıldığı ve cm doğrulukla konum belirlendiği tekniktir [3], [4]. Referans istasyonundan radyo dalgaları aracılığıyla gönderilen düzeltme bilgileri ile gezici kendi konumunu belirlemektedir. Bu yöntemde referans ile gezen alıcı arasındaki başlangıçta en az 5 ve sonrasında en az 4 ortak uydular izlenebilmelidir [5]. RTK yönteminin doğruluğu atmosferik hatalar ve yörünge hatası sebebiyle referans ve gezen alıcılar arasındaki mesafeye bağımlı olarak azalmakta ve bu sebeple uygulama mesafesi 10-20 km ile sınırlı olmaktadır [6]–[8]. RTK tekniğindeki mesafeye bağımlılığı ortadan kaldıran ağ-RTK tekniği de günümüzde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır [9], [10]. Özellikle kurumlar ve bazı özel kuruluşlar tarafından kurulan referans istasyonları ağı yardımıyla ağ içerisinde kalan tüm bölgelerde cm-doğrulukla konum bilgisi elde etmek mümkün olmaktadır. Ağ-RTK yönteminde kontrol merkezinden gezen alıcılara veri iletimi GSM üzerinden sağlanmaktadır. Bu sebeple ağ-RTK tekniği GSM hattının çalışmadığı yerlerde kullanılamamaktadır [11], [12]. Tek bir GNSS alıcısı ile yüksek doğruluklu konum bilgisi sağlayan Ağ-RTK tekniğinde sistem kurulum maliyetinin yüksek olması da diğer bir dezavantaj olarak ortaya çıkmaktadır [2]. RTK ve Ağ-RTK tekniklerinin yukarıda bahsedilen dezavantajlarının yanı sıra küresel bir çözüm de sunamaları sebebiyle otonom araç teknolojilerinde kullanımları sınırlı seviyede olabilmektedir.

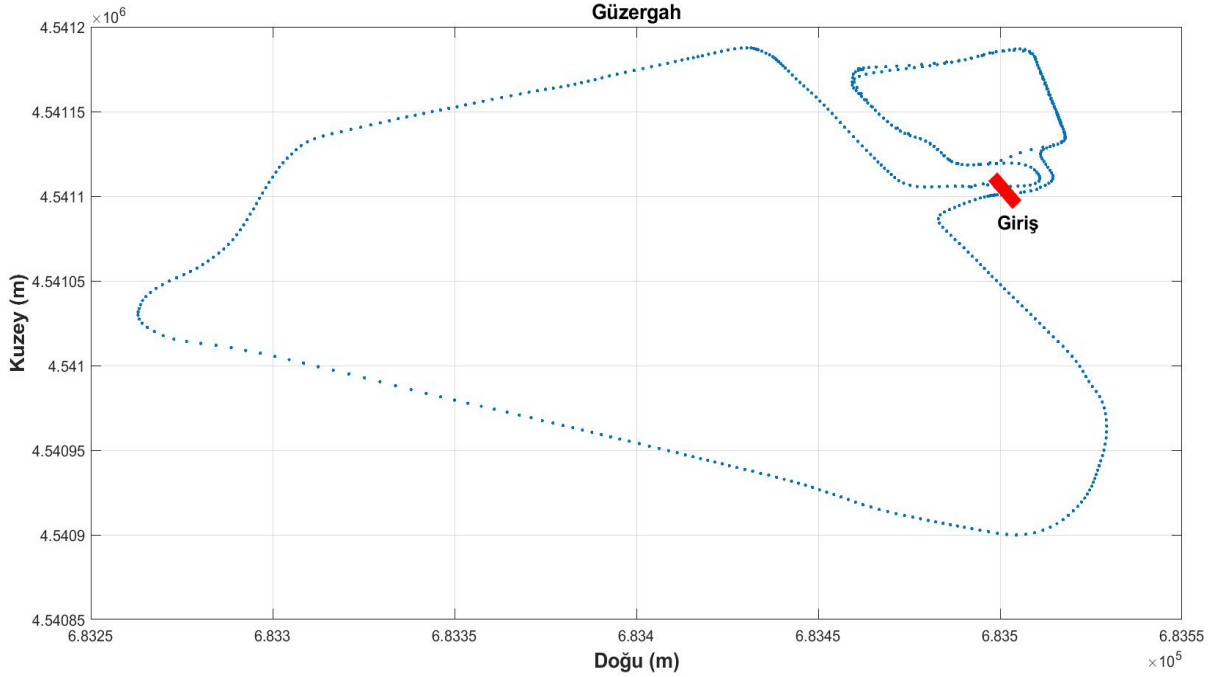
Günümüzde kullanımı hızla artan gerçek zamanlı konum belirleme tekniklerinden bir diğeri ise hassas nokta konumlama (PPP) tekniğidir. Herhangi bir referans istasyon kurulumuna ihtiyaç duyulmayan PPP tekniğinin düşük maliyetli olması ve yüksek doğruluk sağlaması sebebiyle son yıllarda kullanımı hızla artmaktadır [13], [14]. Bu tekniğin kullanımı başta International GNSS Service (IGS) olmak üzere GNSS uydular sistem verilerini web üzerinden yayınlayan servisler ve dünya üzerinde dağınık olarak yerleştirilen referans istasyonları verileri kullanılarak mümkün olabilmektedir [15]. Tüm uydular ve yer istasyon verileri yenilikçi algoritmalar ile değerlendirilmekte ve üretilen düzeltme bilgileri gezen alıcılara iletilerek real-time/gerçek-zamanlı PPP (RT-PPP) veya post-process PPP (PP-PPP) çözüm elde edilmesi sağlanmaktadır. PP-PPP çözümü akademik ve ticari yazılımlar kullanılarak elde edilebildiği gibi bazı CSRS-PPP, MAGIC-GNSS, AUSPOS, OPUS, Trimble RTX, GAPS, APPS ve SCOUT gibi online-PPP servisleri kullanılarak da elde edilebilmektedir [16], [17]. IGS-RT servisinin gerçek zamanlı olarak uydular yörünge ve uydular saat bilgilerini sunması PPP çözümünün gerçek zamanlı olarak elde edilebilmesine olanak sağlamış ve böylece RTKLIB/RTKNAVI, PPP-WIZARD ve BKG/BNC gibi yazılımlar RT-PPP çözümlerini kullanıcılarının hizmetine sunmuşlardır [3], [18]. Ayrıca TerraStar, Trimble RTX, StarFire, ATLAS vb. servisler aracılığıyla L-band sinyallerini alma kabiliyetine sahip GNSS alıcıları kullanılarak RT-PPP çözüm elde edilebilmektedir. RT-PPP çözümlerinin kullanımını sınırlayan en önemli kısıt ise ölçüme başladıktan sonra istenilen doğruluk değerlerine

ulaşmak için gerek duyulan yakınsama süresidir [19]. Ancak her geçen gün iyileştirilen PPP tekniğinde bu süre giderek azalmakta ve böylece tekniğin kullanımı otonom araçlar vb. uygulamalarda artmaktadır.

PPP tekniği bir GNSS alıcısıyla toplanan kod ve faz ölçümleri kullanılarak konum belirlemeye olanak sağlayan yenilikçi bir tekniktir [20]. Bu teknik ile statik veya kinematik olarak toplanan veriler kullanılarak GNSS alıcısının 3-boyutlu konumu cm-dm doğruluğunda ve küresel bir koordinat sisteminde belirlenmektedir [21]. PPP çözümü elde edebilmek için IGS vb. servislerin farklı doğruluk seviyelerinde web üzerinden yayınladığı uydular yörünge bilgileri, uydular saat düzeltmeleri ve kod-faz sapma değerleri de kullanılmaktadır. Bu veriler kullanılarak anten faz kayıklıkları ve faz dönmesi, okyanus yüklemesi ve Sagnac etkisi, troposferik ve iyonosferik hatalar, kutup ve katı yeryuvarı gelgiti, gibi hata kaynakları giderilerek konum doğrulukları artırılır [22].

Günümüzde Amerika Birleşik Devletleri tarafından geliştirilen GPS, Rusya tarafından geliştirilen GLONASS ve Çin tarafından geliştirilen BEIDOU sistemleri temelde askeri kullanımlar için geliştirilmiş ve geliştiren ülkeye bağlı sistemlerdir. Her ne kadar bu sistemler sivil kullanımlara açık olsa da sistem sahibi ülkeler uygun gördükleri durumlarda tüm veri akışını kesme haklarını kullanabilirler. Ayrıca sivil kullanımlar söz konusu olduğunda ise bu sistemlerde Seçmeli Erişilebilirlik (SA) adı verilen doğruluğu düşürücü kısıtlamalarla karşılaşmaktadır [23]. Avrupa Birliği ve Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından geliştirilen GALILEO uydular navigasyon sistemi ise tamamen sivil kullanıma yönelik olarak geliştirilmiştir. GNSS ile konum belirleme amacıyla kullanılan donanım ve yazılımların hemen tamamında temel bileşen olarak GPS sistem verileri kullanılmaktadır. Ancak GPS sisteminin şehir içi ve ormanlık alanlar, açık maden işletmeleri vb. zorlu alanlarda görünen uydular sayısının yeterli olmaması veya uygun uydular geometrisinin oluşmaması durumlarında istenilen konum doğrulukları ya hiç sağlanamamakta veya düşük doğrulukla sağlanabilmektedir. Bu sorunu gidermek amacıyla son yıllarda çoklu uydular sistem çözümleri pek çok akademik çalışmanın yanı sıra ticari çalışmalarda da kullanılmaktadır. Birden çok uydular sistem verilerinin birlikte kullanılmasıyla Global Navigation Satellite Systems-Küresel Navigasyon Uydular Sistemleri (GNSS) kavramı ortaya çıkmıştır. Son yıllarda GNSS alıcılarının yanı sıra post-process ve online yazılımlar da çoklu uydular sistem verilerini konum belirleme çözümlerine dahil etmektedirler. Günümüzde 31 GPS, 25 GLONASS, 31 BEIDOU ve 26 GALILEO uydular konum belirleme amacıyla kullanılabilir durumdadır [24]. Konum belirleme çalışmalarında çoklu uydular sistem verileri çözüme dahil edilerek zorlu ölçme koşullarında dahi kesintisiz ve yüksek doğrulukla konum bilgisi elde edilebilmektedir [24].

Bu çalışmada 4. seviye otonom aracın konumunun belirlenmesine farklı uydular sistem kombinasyonlarının etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla GPS, GPS+GLONASS, GPS+GALILEO, GPS+BEIDOU, GPS+GLONASS+GALILEO, GPS+GLONASS+BEIDOU, GPS+GALILEO+BEIDOU ve GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU olmak üzere



Şekil 1. Çalışma alanı

8 farklı uydu kombinasyon verileri post-process çözüm ile PPP tekniği kullanılarak elde edilmiştir. Sonuçlar uydu sayısı, konum duyarlılık kaybı (PDOP), eksik çözüm verisi, yatay ve düşey konum doğrulukları dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

## 2 Materyal ve metod

### 2.1 Çalışma alanı

Çalışma İstanbul Anadolu yakasında yaklaşık 1,350 metre uzunluğundaki şehir içi güzergâhta gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Güzergâh boyunca uydu verilerinin toplanmasını kısmen engelleyici ağaçlık ve binaların yoğun olduğu bölgeler bulunmaktadır. Özellikle Şekil 1 üzerinde kırmızı ile gösterilen alanda sinyallerin tamamen kesilmesine sebep olan, yolun üzerini tamamen örten güvenlik girişi bulunmaktadır.



Şekil 2. 4. Seviye otonom araç

### 2.2 Veri toplama ve değerlendirme

Çalışmada veri toplama amacıyla 4. Seviye bir otonom araç olan bir Toyota Corolla marka araç kullanılmıştır (Şekil

2). Uygulama 04.08.2021 tarihinde gerçekleştirilmiştir. Araç üzerinde bir adet NovAtel PWRPak7 sistemi ve içerisinde OEM7 alıcı ve 2 adet VEXXIS GNSS-502 antenler bulunmaktadır. GNSS sistemi GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU ve QZSS uydu sinyallerini toplayabilecek kapasitededir. Uygulamada öncelikle araç statik konumda bir süre veri topladıktan sonra güzergâh üzerinde yaklaşık 20 km/saat hızla hareket etmiş, güzergâh bitiminde başladığı bölgeye gelmiş ve yine bir süre statik konumda veri toplamaya devam ettikten sonra uygulama sonlandırılmıştır. Güzergâh boyunca 1 sn. veri toplama aralığında ve 10° uydu yükseklik açısında tüm uydu verileri toplanmıştır.

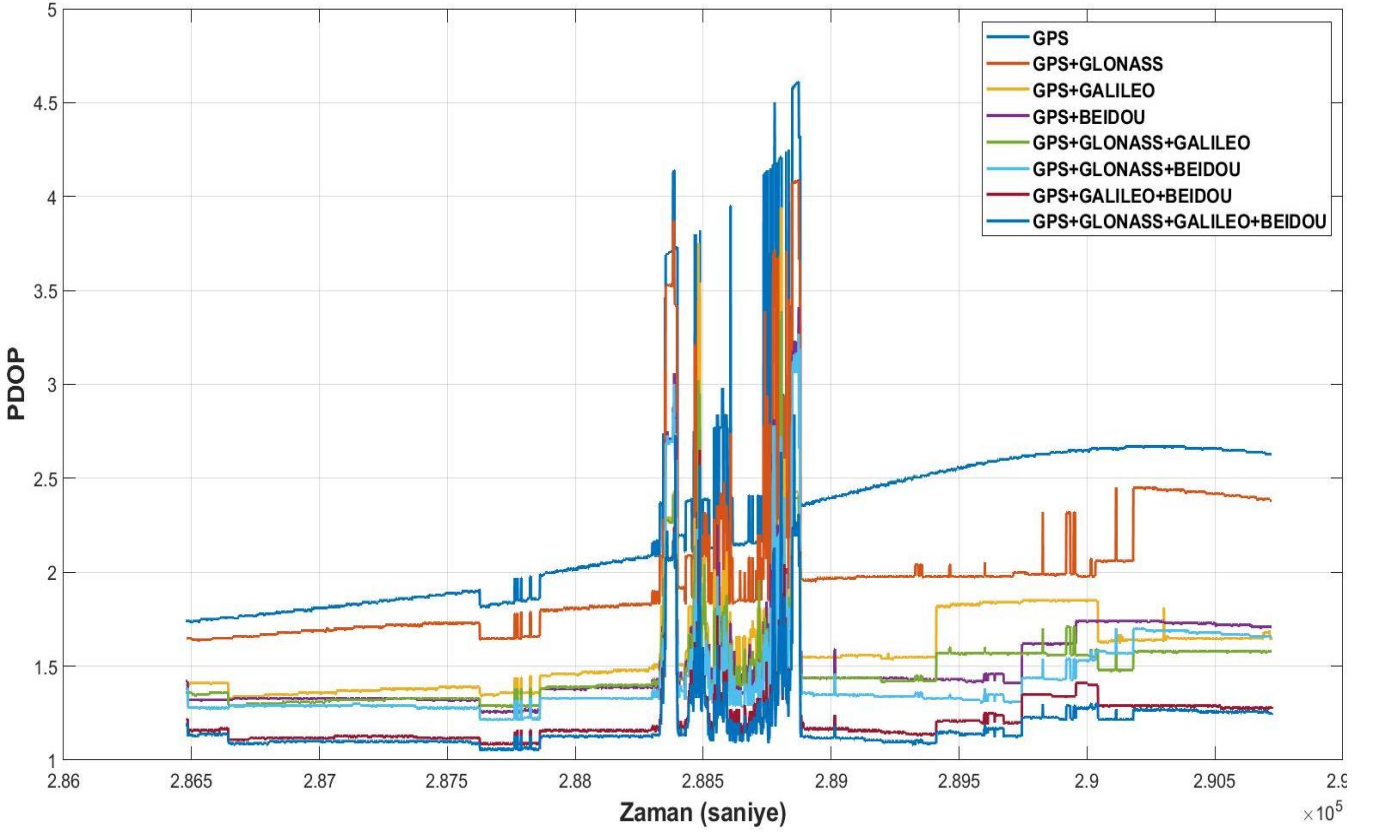
Araçın uygulama boyunca konumunun belirlenmesi amacıyla Inertial Explorer post-process yazılımı kullanılmıştır [25]. Bu yazılım çok frekanslı GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU ve QZSS uydu sistemleri verilerini çözebilme yeteneğine sahiptir. Çözüm ise Post-Process-PPP yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çözümde kullanılan bazı parametreler Tablo 1'de verilmektedir. Çoklu uydu sistemlerinin çözüme etkisinin belirlenmesi amacıyla GPS, GPS+GLONASS, GPS+GALILEO, GPS+BEIDOU, GPS+GLONASS+GALILEO, GPS+GLONASS+BEIDOU, GPS+GALILEO+BEIDOU ve GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU olmak üzere 8 farklı veri setiyle çözümler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Bazı process parametreleri

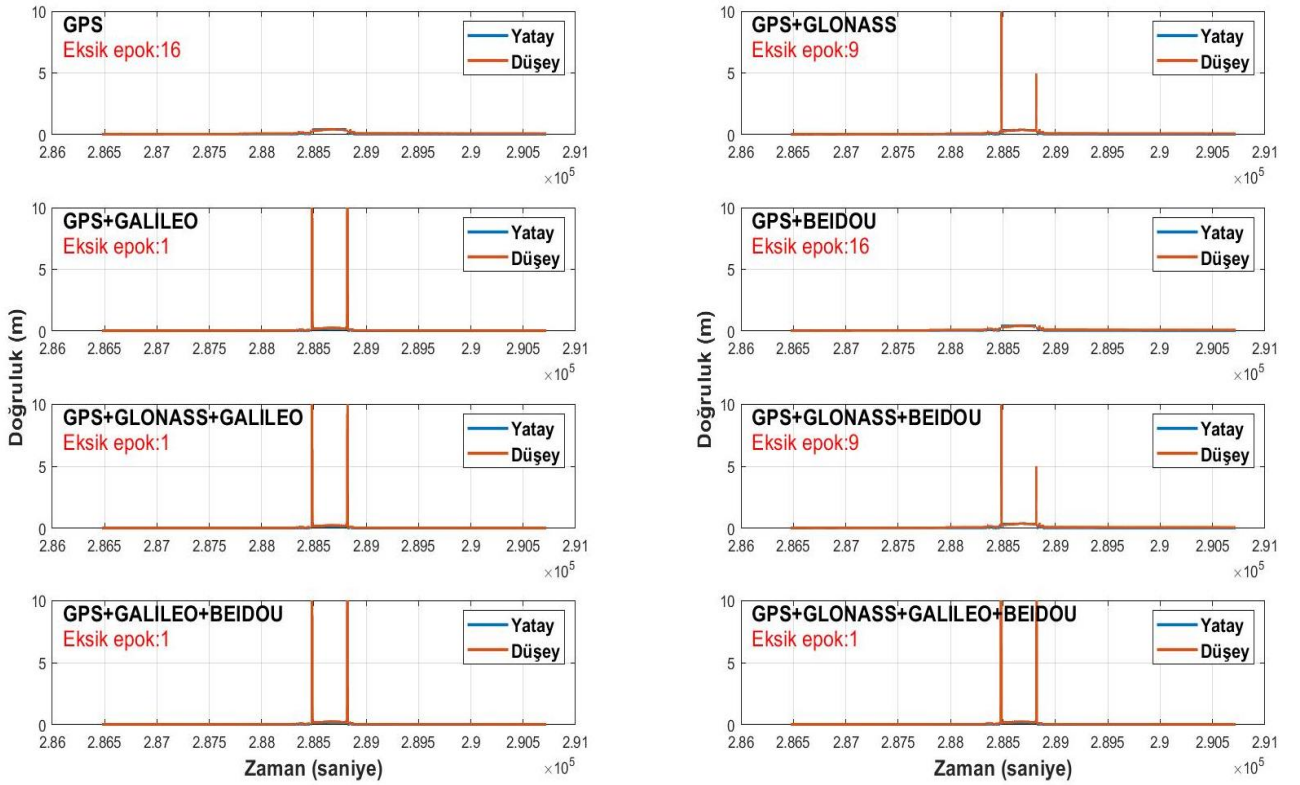
Processing Method	PPP
Processing Direction	Multi-Pass
Profile	GNSS Ground Vehicle
Datum	WGS84
Processing Interval	1 sec.
Elevation Mask	10 degree
Precise Files	SP3 and Clock



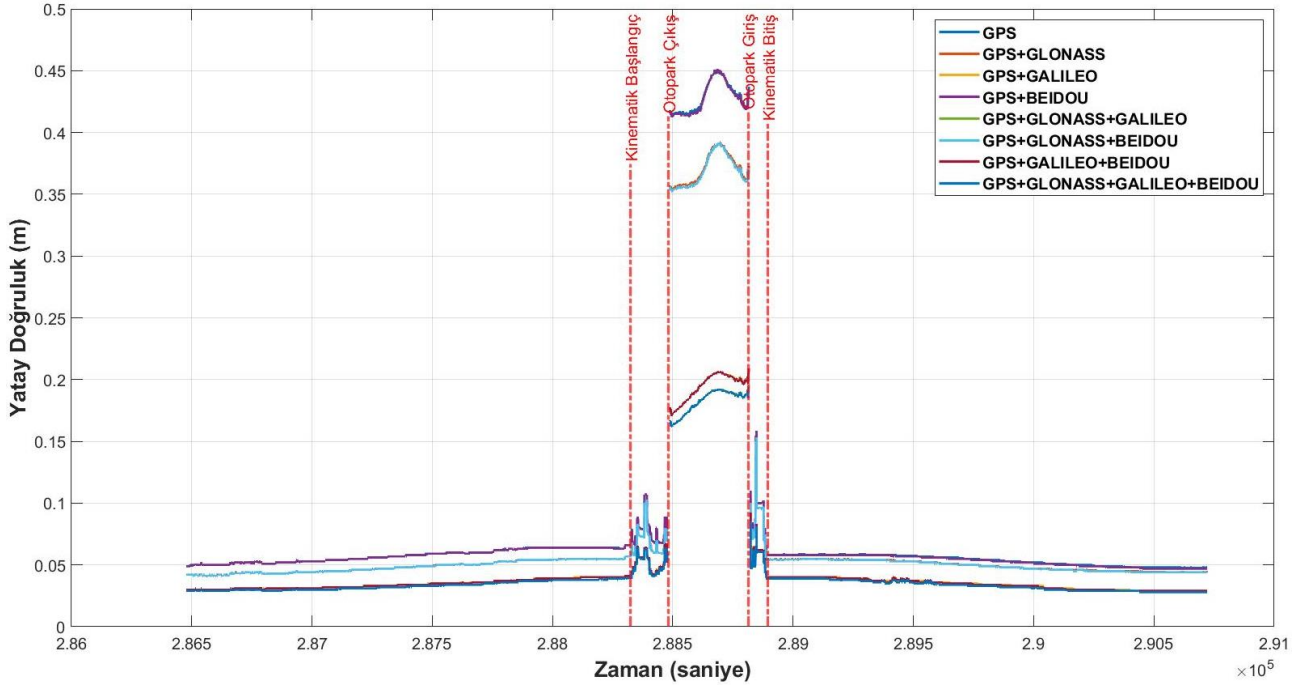




Şekil 5. Konumsal uydu duyarlık kaybı (PDOP) grafiği



Şekil 6. Yatay ve düşey konum doğrulukları



Şekil 7. Yatay konum doğrulukları

### 3.2 Konum ve yükseklik doğruluğu

Yüksek doğruluklu ve güvenilir konum bilgisi otonom bir aracın güvenli şekilde seyahatini sürdürebilmesi için bir zorunluluktur. Şekil 6'da farklı uydu kombinasyonları kullanılarak güzergâh boyunca elde edilen yatay ve düşey konum doğrulukları görülmektedir. Ayrıca kullanılan uydu sistemleri ve çalışma süresince çözüm sağlanamayan epoklar da şekillerin sol-üst bölümünde verilmiştir. GPS ve GPS+BEIDOU çözümlerde 16'şar, GPS+GLONASS ve GPS+GLONASS+BEIDOU'da 9'ar, diğerlerinde ise sadece 1'er epokta çözüm elde edilemediği görülmektedir. Söz konusu çözüm sağlanamayan anların tamamının Şekil 1'deki kırmızı ile işaretli bölgeden kaynaklandığı tespit edilmiştir. GPS ve GPS+BEIDOU çözümlerde eksik olan sonuç anlarında diğer uydu kombinasyonlarında çözüm elde edilmiş olsa da elde edilen çözümlerin 10m civarında hata içerdiği görülmektedir. Uydu kombinasyonlarında elde edilecek konum doğruluklarının gerçekçi bir şekilde değerlendirilmesi adına eksik epokların tüm kombinasyonlardan çıkarılmasının daha uygun olacağı düşünülmüştür.

Şekil 7'de eksik epoklar çıkarıldıktan sonra elde edilen yatay konum doğrulukları görülmektedir. Burada çözümler en büyük hataya sahipten en az hataya sahip doğru GPS, GPS+BEIDOU, GPS+GLONASS, GPS+GLONASS+BEIDOU, GPS+GALILEO, GPS+GALILEO+BEIDOU, GPS+GLONASS+GALILEO ve GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU olarak sıralanmaktadır.

Şekil 8'de ise eksik epoklar çıkarıldıktan sonra elde edilen düşey konum doğrulukları görülmektedir. Burada yine yatay doğruluklar ile paralel olarak en büyük hataya sahipten en az hataya sahip doğru çözümler GPS, GPS+BEIDOU, GPS+GLONASS, GPS+GLONASS+BEIDOU, GPS+GALILEO, GPS+GALILEO+BEIDOU, GPS+GLONASS+GALILEO ve GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU olarak sıralanmaktadır.

OU, GPS+GALILEO, GPS+GALILEO+BEIDOU, GPS+GLONASS+GALILEO ve GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU şeklinde sıralanmaktadır.

Şekil 7 ve Şekil 8'de statik konumda iken GNSS gözlemlerine başlanan bu uygulamada aracın harekete başladığı ve güzergâh tamamlandıktan sonra hareketini tamamladığı süreler kırmızı dikey kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 1'de de kırmızı ile gösterilen ve GNSS sinyallerinin tamamen kesildiği bölgeden geçiş zamanları da yine Şekil 7 ve Şekil 8'de kırmızı dikey çizgilerle gösterilmiştir. Şekil 7 ve Şekil 8'de kinematik başlangıç ve kinematik bitiş olarak gösterilen süreler arasında istatistiksel bilgiler Tablo 3'de verilirken, bu süreler dışında kalan yani araç statik konumda iken elde edilen sonuçlara ait istatistiksel bilgiler Tablo 2'de verilmiştir.

Statik kısma ait elde edilen veriler değerlendirildiğinde GALILEO sistemi GPS sistemine destek olarak çözüme dahil edildiğinde hem GLONASS hem de BEIDOU uydu sistemlerine kıyasla yatay ve düşey bileşenlerde çok daha yüksek doğruluklar elde edilmesini sağladığı görülmektedir. GPS ve GLONASS verilerinin dahil edildiği çözümde ortalama 5 cm yatay ve 8.1 cm düşey konum doğrulukları elde edilirken, GPS ve BEIDOU verilerinin dahil edildiği çözümde ortalama 5.7 cm yatay ve 8.6 cm düşey doğruluklar elde edilmiş, GPS ve GALILEO verilerinin dahil edildiği çözümde ise önemli bir iyileştirme sağlanarak 3.5 cm yatay ve 5.5 cm düşey doğruluk elde edilmiştir. Diğer bir deyişle sadece GPS verileri kullanılarak elde edilen sonuçlara kıyasla GPS ve BEIDOU verileri kullanılarak bir iyileşme sağlanamamış, GPS ve GLONASS verileri kullanılarak yatayda %12, düşeyde ise %6, GPS ve GALILEO verileri kullanılarak ise yatayda %38, düşeyde ise %36 oranında iyileşme sağlanabilmiştir. Üçlü uydu kombinasyonlarında da sırasıyla GALILEO, GLONASS ve

BEIDOU uydu verilerinin yer aldığı sonuçların daha yüksek doğrulukla elde edilebildiği görülmektedir. En yüksek doğruluklar ise tüm uydu verilerinin çözüme dahil edildiği dörtlü kombinasyonla elde edilebildiği görülmektedir. Dörtlü kombinasyon ile yatayda 3.4 cm, düşeyde ise 5.3 cm doğruluklarla konum bilgisi elde edildiği görülmektedir.

Kinematik kısma ait elde edilen veriler değerlendirildiğinde statik kısım sonuçlarına benzer şekilde GALILEO sistemi GPS sistemine destek olarak çözüme dahil edildiğinde diğer uydu sistemlerine oranla hem yatay hem de düşey bileşenlerde daha yüksek doğruluklar elde edilmesini sağladığı görülmektedir. GPS ve GLONASS verilerinin dahil edildiği çözümde ortalama 34.1 cm yatay ve 34.2 cm düşey konum doğrulukları elde edilirken, GPS ve BEIDOU verilerinin dahil edildiği çözümde ortalama 39.4 cm yatay ve 37.7 cm düşey doğruluklar elde edilmiş, GPS ve GALILEO verilerinin dahil edildiği çözümde ise önemli bir iyileştirme sağlanarak 18.1 cm yatay ve 22.7 cm ise düşey doğruluk elde edilmiştir. Kinematik verilerde GPS verileri kullanılarak elde edilen sonuçlara kıyasla GPS ve BEIDOU verileri kullanılarak yem yatayda hem de düşeyde mm seviyesinde bir iyileşme bir iyileşme sağlanırken, GPS ve GLONASS verileri kullanılarak yatayda %14, düşeyde ise %10 iyileşme sağlanmış, GPS ve GALILEO verileri kullanılarak ise yatayda %54, düşeyde ise %41 oranında oldukça yüksek seviyede iyileşme sağlanabilmiştir. Yine statik sonuçlarla uyumlu şekilde üçlü uydu kombinasyonlarında da sırasıyla GALILEO, GLONASS ve BEIDOU uydu verilerinin yer aldığı sonuçların daha yüksek doğrulukla elde edilebildiği görülmekte ve en yüksek doğruluklar ise tüm uydu verilerinin çözüme dahil edildiği dörtlü kombinasyonla elde edilebildiği görülmektedir. Dörtlü kombinasyon ile yatayda 17 cm, düşeyde ise 21.7 cm doğruluklarla konum bilgisi elde edildiği görülmektedir.

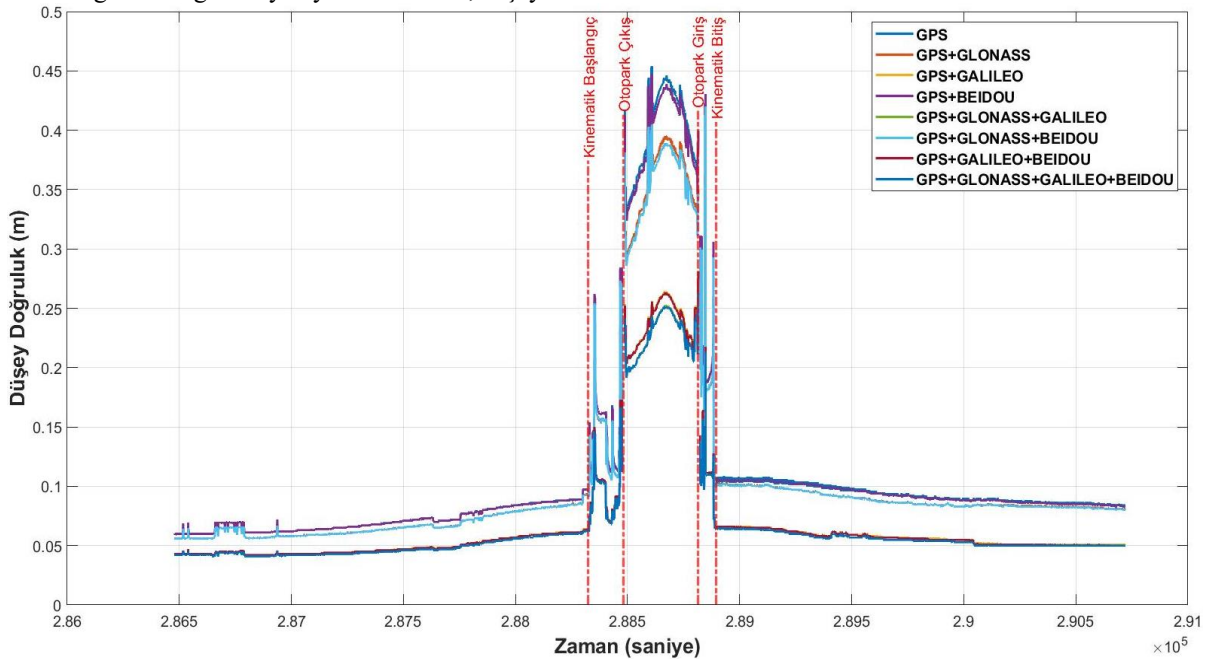
Avrupa GNSS Ajansı (GSA) [27] tarafından 2018 yılında yayınlanan raporda otonom araçlar için emniyet açısından kritik konum doğruluk değerleri yatayda 20 cm'den, düşeyde

ise 2 m'den daha düşük olarak verilmiştir. Kinematik veriler incelendiğinde GSA tarafından verilen standartlara GPS+GALILEO, GPS+GLONASS+GALILEO, GPS+GALILEO+BEIDOU ve GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU gibi çoklu uydu sistemlerinin kullanımıyla ulaşılabildiği görülmektedir. Diğer bir deyişle GSA tarafından verilen standartlara çoklu uydu sistem verilerinin kullanımıyla ulaşılabileceği açıkça görülmektedir.

#### 4 Sonuçlar

Otonom araçların yakın gelecekte hayatımızın önemli bir parçası olması beklenmektedir. Bu çalışmada otonom araçların en önemli bileşenlerinden biri olan konum ve yükseklik doğruluğuna farklı GNSS sistemlerinin etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki çoklu GNSS sistemleri özellikle zorlu çevresel koşullarda dahi kesintisiz ve yüksek konum ve yükseklik doğrulukları elde etmede önemli bir etken oluşturmaktadır. Özellikle son on yılda yörüngedeki uydu sayısını önemli ölçüde artıran ve küresel anlamda çözüm sağlayabilme kapasitesine ulaşan GALILEO uydu sisteminin çözüme önemli ölçüde katkı sağlamıştır. Aracın hareket halinde olduğu zaman aralığında Uluslararası kuruluşlar tarafından belirlenen standartlara sadece GALILEO sisteminin dahil edildiği çözümlerde erişilebildiği, GPS, GPS+GLONASS, GPS+BEIDOU ve GPS+GLONASS+BEIDOU çözümlerinde ise erişilemediği görülmektedir.

Günümüzde GNSS firmalarının hemen tamamı GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU ve QZSS uydu sistemlerini destekleyen pek çok ticari ürün satışa sunmaktadır. Ancak TUSAGA-AKTİF sistemi gibi kullanıcılarına gerçek zamanlı ağ-RTK çözümleri sunan kamu veya özel kuruluşların çoğu sadece GPS ve GLONASS uydu sistemlerini çözümlerine dâhil etmektedirler.



Şekil 8. Düşey konum doğrulukları

**Tablo 2.** Statik kısma ait istatistiki bilgiler

Uydu Konfigürasyonu	Yatay Doğruluk (cm)				Düşey Doğruluk (cm)			
	min.	maks.	ort.	RMS	min.	maks.	ort.	RMS
GPS	4.7	15.8	5.7	5.7	5.9	43.0	8.6	8.9
GPS+GLONASS	4.1	15.3	5.0	5.1	5.5	42.0	8.1	8.4
GPS+GALILEO	2.9	8.3	3.5	3.6	4.2	21.7	5.5	5.6
GPS+BEIDOU	4.7	15.8	5.7	5.7	5.9	43.0	8.6	8.9
GPS+GLONASS+GALILEO	2.8	8.1	3.4	3.4	4.1	21.3	5.3	5.5
GPS+GLONASS+BEIDOU	4.1	15.3	5.0	5.1	5.5	42.0	8.1	8.4
GPS+GALILEO+BEIDOU	2.9	8.3	3.5	3.6	4.2	21.7	5.5	5.6
GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU	2.8	8.1	3.4	3.4	4.1	21.3	5.3	5.5

**Tablo 3.** Kinematik kısma ait istatistiki bilgiler

Uydu Konfigürasyonu	Yatay Doğruluk (cm)				Düşey Doğruluk (cm)			
	min.	maks.	ort.	RMS	min.	maks.	ort.	RMS
GPS	7.2	45.1	39.5	40.8	12.6	45.4	38.2	38.8
GPS+GLONASS	6.4	39.2	34.1	35.3	12.0	41.0	34.2	34.7
GPS+GALILEO	4.9	20.9	18.1	18.6	8.7	28.2	22.7	23.0
GPS+BEIDOU	7.2	45.1	39.4	40.7	12.5	44.7	37.7	38.2
GPS+GLONASS+GALILEO	4.7	19.5	17.0	17.4	8.6	26.3	21.8	22.1
GPS+GLONASS+BEIDOU	6.4	39.2	34.0	35.1	11.9	40.5	33.8	34.3
GPS+GALILEO+BEIDOU	4.9	20.9	18.1	18.5	8.7	28.1	22.6	23.0
GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU	4.7	19.4	17.0	17.4	8.6	26.3	21.7	22.0

Bu çalışma göstermiştir ki başta GALILEO uydu sistemi olmak üzere BEIDOU uydu sisteminin de çözüme dâhil edilmesi elde edilecek konum doğruluklarına önemli katkı sağlayacaktır. Ağ-RTK sisteminde söz konusu iyileştirmenin yapılması ile yakın gelecekte yollarda olması planlanan otonom araçlarda Ağ-RTK'dan üretilen konum bilgisinin kullanımı sağlanabilecektir. Böylece otonom araçlarda gibi her türlü çevresel koşulda yüksek doğrulukla ve güvenilir konum bilgisi ihtiyacı olan ürünlerin ihtiyacı da karşılanmış olacaktır.

#### Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir. (Proje No. 3200327).

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

#### Benzerlik oranı (iThenticate): %15

#### Kaynaklar

- [1] Society of Automotive Engineer (SAE), 2020. <https://www.sae.org/news/press-room/2018/12/sae-international-releases-updated-visual-chart-for-its-levels-of-driving-automation-standard-for-self-driving-vehicles> (Erişim: 28,02,2022).
- [2] B. Eissfeller, Real time kinematic and precise point positioning: status and trends. Ger. J., GPS, 87, 131–148, 2012.
- [3] S. Alçay and Ö. Atiz, Farklı yazılımlar kullanılarak gerçek zamanlı hassas nokta konum belirleme (RT-PPP) yönteminin performansının incelenmesi. Geomatik, 6(1), 77–83, 2021. <https://doi.org/10.29128/geomatik.687709>.
- [4] A. Pırtı and Z. Kurtulgu, Sürekli gözlem yapan

referans istasyonları (CORS (Sanal Referans istasyonu-lineer alan düzeltme tekniği)) kullanılarak yapılaşmış ve ağaçlık bölgelerdeki konum belirlemenin doğruluk analizi, Geomatik, 6(1), 1–14, 2021. <https://doi.org/10.29128/geomatik.646674>.

- [5] M. Kahveci and F. Yıldız, GPS/GNSS: Uydularla konum belirleme sistemleri: teori ve uygulama. Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti., 2021.
- [6] Y. Feng and C. Rizos, Network-based geometry-free three carrier ambiguity resolution and phase bias calibration. GPS Solut., 13(1), 43–56, 2009. <https://doi.org/10.1007/s10291-008-0098-8>.
- [7] D. Kim and R. B. Langley, Long-range single-baseline RTK for complementing network-based RTK. 20th Int. Tech. Meet. Satell. Div. Inst. Navig. 2007 ION GNSS 2007, 4, 639–650, 2007.
- [8] B. Li, Y. Feng, Y. Shen, and C. Wang, Geometry-specified troposphere decorrelation for subcentimeter real-time kinematic solutions over long baselines. J. Geophys. Res., 115, B11404, 2010. <https://doi.org/10.1029/2010JB007549>.
- [9] K. Gümüş and M. G. Gümüş, Cors uygulamalarından elde edilen nokta konum doğrulukları üzerine istatistiksel araştırma. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg., 7(3), 1159–1164, 2018. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.502369>.
- [10] A. Martín, A. B. Anquela, A. Dimas-Pagés, and F. Cos-Gayón, Validation of performance of real-time kinematic PPP. A possible tool for deformation monitoring. Measurement, 69, 95–108, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.03.026>.
- [11] R. M. Alkan, İ. M. Ozulu, and V. İlçi, Web-based online data processing services as an alternative to conventional gnss processing software. Afyon



- Kocatepe Univ. J. Sci. Eng., 17(2), 603–619, 2017. <https://doi.org/10.5578/fmbd.57600>.
- [12] V. İlçi, Accuracy comparison of real-time GNSS positioning solutions: Case study of Mid-North Anatolia. *Measurement*, 142, 40–47, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.067>.
- [13] R. M. Alkan, V. İlçi, I. M. Ozulu, and M. H. Saka, A comparative study for accuracy assessment of PPP technique using GPS and GLONASS in urban areas. *Measurement*, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.03.012>.
- [14] S. İnyurt and M. Ulukavak, Web tabanlı GNSS Yazılımlarının (CSRS-PPP, Trimble-RTX) Performansının Araştırılması. *Geomatik*, 5(52495), 120–126, 2020. <https://doi.org/10.29128/geomatik.586990>.
- [15] V. İlçi, CenterPoint RTX Teknolojisinin Doğruluk ve Tekrarlına bilirliliğinin Araştırılması. *Geomatik*, 5(48883), 10–18, 2020, <https://doi.org/10.29128/geomatik.560026>.
- [16] E. G. Özdemir, Bağlı ve Mutlak (PPP) Konum Çözüm Yaklaşımı sunan Web-Tabanlı Çevrimiçi Veri Değerlendirme Servislerinin Farklı Gözlem Periyotlarındaki Performanslarının Araştırılması. *Geomatik*, 7(1), 41–51, 2021. <https://doi.org/10.29128/geomatik.809826>.
- [17] A. Pırtı and D. Yazıcı, Yazılımların doğruluk açısından incelenmesi. *Geomatik*, 7(2), 88–105, 2021. <https://doi.org/10.29128/geomatik.882843>.
- [18] S. Alçay, Gerçek zamanlı hassas nokta konumlama (RT-PPP yönteminin konum belirleme performansının doğruluk ve hassasiyet bakımından incelenmesi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.*, 8(1), 121–133, 2019. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.516842>.
- [19] V. İlçi and A. U. Peker, The kinematic performance of real-time PPP services in challenging environment, *Measurement*, 189, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110434>.
- [20] C. İnal, B. Bilgen, and S. Bülbül, Farklı uydu sistemi kombinasyonlarının gerçek zamanlı hassas nokta konumlamaya etkisi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.*, 11(1), 109–115, 2022. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.996018>.
- [21] J. F. Zumberge, M. B. Hefflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins, and F. H. Webb, Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 102(B3), 5005–5017, 1997. <https://doi.org/10.1029/96jb03860>.
- [22] J. Kouba and P. Héroux, Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. *GPS Solut.*, 5(2), 12–28, 2001. <https://doi.org/10.1007/PL00012883>.
- [23] B. Koca and A. Ceylan, Uydu Konum Belirleme Sistemlerindeki (GNSS) Güncel Durum ve Son Gelişmeler. *Geomatik*, 3(1), 63–73, 2018. <https://doi.org/10.29128/geomatik.348331>.
- [24] İnt.Kayn.1, Test and Assessment Research Center of China Satellite Navigation Office, 2022. <http://www.csno-tarc.cn/en/>. (Erişim: 28,02,2022).
- [25] İnt.Kayn.2, Inertial Explorer, 2022. <https://novatel.com/products/waypoint-post-processing-software/inertial-explorer>. (Erişim: 28,02,2022).
- [26] A. C. Uçarlı, F. Demir, S. Erol, and R. M. Alkan, Farklı GNSS Uydu Sistemlerinin Hassas Nokta Konumlama (PPP) Tekniğinin Performansına Etkisinin İncelenmesi. *Geomatik*, 6(3), 247–258, 2020. <https://doi.org/10.29128/geomatik.779420>.
- [27] European GNSS Agency (GSA), Report on Road User Needs and Requirements, 2018.

