



IGS-RTS ürünleri kullanılarak gerçek-zamanlı hassas nokta konumlama (RT-PPP) tekniğinin performans analizi: Antarktika örneği

Performance analysis of real-time precise point positioning (RT-PPP) technique using IGS-RTS products: A case study in Antarctica

Reha Metin ALKAN ¹, Serdar EROL ^{1*}, Bilal MUTLU ¹

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

Geliş (*received*): 28 Aralık (*December*) 2021 Kabul (*accepted*): 28 Şubat (*February*) 2022

ÖZ

Bu çalışmada, 30 ülkenin 100 civarında bilim üssünün bulunduğu Antarktika kıtasında farklı meslek disiplinlerince gerçekleştirilecek çalışmalarda gereksinim duyulan anlık 3-Boyutlu (3B) konum bilgisinin üretilmesinde uydu-bazlı konum belirleme yöntemleri içerisinde yer alan gerçek-zamanlı Hassas Nokta Konum Belirleme (RT-PPP) tekniğinin kullanılabilirliği ele alınmıştır. Uygulamada, Türk Antarktik Bilim Üssünün kurulacağı Horseshoe adasına en yakın sürekli gözlem yapan ve ölçülerini gerçek-zamanlı olarak internetten yayınlayan IGS-MGEX Real Time Service (RTS) ağ noktalarından birisi olan OHI300ATA istasyonu verileri kullanılmıştır. RT-PPP tekniğinin performansını değerlendirmek için bu referans istasyonunun her bir ölçme epöğündeki gerçek-zamanlı koordinatları, IGS-MGEX RTS projesi kapsamında çalışmalarını sürdüren analiz merkezlerinden olan Alman DLR ve Fransız CNES kurumları tarafından üretilen çoklu-GNSS gerçek-zamanlı düzeltme ürünleri kullanılarak, farklı uydu konfigürasyonları (GPS; GPS+GLONASS; GPS+GLONASS+Galileo; GPS+GLONASS+Galileo+BDS) için belirlenmiştir. Böylelikle hem farklı GNSS uydu sistemlerinin hem de IGS'in iki farklı analiz merkezinden alınan farklı düzeltme ürünlerinin (hassas uydu yörünge ve saat düzeltmelerinin) RT-PPP çözümleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda, RT-PPP çözümüne ardışık olarak ilave edilen GNSS uydu sistemlerinin, tek başına GPS gözlemlerinin kullanımına kıyasla RT-PPP çözüm doğruluğunu iyileştirdiği ve yakınsama süresini kısalttığı gözlemlenmiştir. Buna ek olarak RT-PPP tekniğinin performansının çözüm için kullanılan IGS ürünlerine de bağlı olduğu görülmüştür. Tüm bu bulgular sonucunda, Antarktika kıtasında çoklu-GNSS (multi-GNSS) RT-PPP tekniği ile, çözümde kullanılan IGS Analiz Merkezlerinin düzeltme ürünlerine ve uydu konfigürasyonuna bağlı olarak yaklaşık 10-60 dakika arasında değişen yakınsama süreleri sonrasında, cm ile iki dm arasında değişen doğruluklarla gerçek-zamanlı yatay konum ve yükseklik belirlemenin mümkün olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Antarktika, Kinematik Konum Belirleme, GNSS, Gerçek-zamanlı PPP (RT-PPP), IGS-RTS, BNC.

ABSTRACT

In this study, the usability of Real-Time Precise Point Positioning (RT-PPP) technique, which is one of the satellite-based positioning methods, in the production of 3-Dimensional (3D) position information required for all kinds of studies to be carried out by different disciplines in the Antarctica continent, where there are almost 100 science bases of around 30 countries, was discussed. As a data source, the nearest GNSS station to the Horseshoe island, where the Turkish Antarctic Science Base will be established, OHI300ATA was chosen because it is one of the IGS-MGEX Real Time Service (RTS) network points which makes continuous observations and broadcasts in real-time from the internet. In order to evaluate the performance of the RT-PPP technique, the real-time coordinates of the reference station in each epoch were determined for different satellite configurations (GPS; GPS+GLONASS; GPS+GLONASS+Galileo; GPS+GLONASS+Galileo+BDS) by using multi-GNSS real-time correction products produced by German DLR and French CNES institutions, which are analysis centers working within the scope of the IGS-MGEX RTS project. Thus, the effects of both different GNSS satellite systems and different correction products (precise satellite orbit and clock corrections) taken from two different analysis centers of IGS on RT-PPP solutions were investigated. As a result of the study, it was observed that GNSS satellite systems added to the RT-PPP solution sequentially, improved the RT-PPP solution accuracy and shortened the convergence time compared to the use of GPS-only observations. In addition, it has been revealed that the performance of the RT-PPP technique also depends on the IGS products used for the solution. According to all these findings, it was possible to determine real-time 2D horizontal position and height with a cm to two dm accuracy, respectively in the Antarctica continent by using the multi-GNSS RT-PPP technique, after convergence times ranging from about 10-60 minutes depending on the correction products of the IGS Analysis Centers used in the solution and the satellite configuration.

Keywords: Antarctica, Kinematic Positioning, GNSS, Real-time PPP (RT-PPP), IGS-RTS, BNC.

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1050124>

*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: erol@itu.edu.tr

GİRİŞ

Antarktika Kıtası, keşfinden bu yana geçen yıllar boyunca bilim insanlarının, araştırmacıların, kaşiflerin, turistlerin, gezginlerin ve pek çok farklı grubun yoğun ilgisini çekmiştir. Dünyanın bu beşinci büyük kıtasının yaklaşık %97'si ortalama kalınlığı 1600 metre olan buz tabakasıyla kaplıdır. Bu durum Kıtanın aynı zamanda Dünya yüzeyindeki tatlı suyun %70'ine sahip olmasını da sağlamaktadır. Dünya üzerindeki en soğuk, en izole, en rüzgârlı, en kurak ve en zorlu yaşam koşullarına sahip yer olan çetin Antarktika kıtası, birçok maden yatağına ek olarak dünya petrol ve gaz rezervlerinin de

%25'ine sahiptir. Oldukça zorlu koşullara sahip bu kıtanın da içinde bulunduğu 60 derece güney enleminin daha altındaki tüm bölgeler yıl boyunca 1 uzun gece, 1 uzun gündüz yaşar. Zira bu bölgede Güneş 21 Mart'ta battıktan sonra altı aylık gece süreci başlamaktadır. 23 Eylül'de güneşin doğmasıyla da altı ay sürecek gündüz başlamış olmaktadır. Antarktika kıyılarında, sıcaklıklar genellikle yaz aylarında (Aralık-Şubat) donma noktasına yakın olur. Kış aylarında ise kıyı istasyonlarında aylık ortalama sıcaklıklar -10 °C ile -30 °C arasında değişmektedir (AFI, 2021).

Sahip olduğu pek çok özelliğiyle doğal bir laboratuvar olan Antarktika, bilim dünyasının

her zaman dikkatini çekmiştir. 30 ülkeye ait 100 civarında bilim üssünün bulunduğu kıtada, farklı disiplinlere sahip bilim insanları, Dünyanın bugünü ve geleceğini yakından ilgilendiren iklim, çevre, buzul ve kıyı erozyonları, deniz, jeofizik, sismoloji, tektonik, jeodezik, jeodinamik, biyoloji, tıp ve uzay bilimleri başta olmak üzere diğer birçok bilim dalında çalışmalar ve araştırmalar yapmaktadır.

Bölgede yapılan tüm bu araştırmaların ve faaliyetlerin pek çoğunda konum bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzde her ne kadar klasik yersel ölçme yöntemleri (açı/kenar ve yükseklik farkı ölçmeleri vb.) kolay uygulanabilir olması ve görece düşük maliyeti ile halen yaygın olarak tüm dünyada kullanılıyor olsa da, bu zorlu coğrafyada uygulanmalarının bazı zorlukları ve kısıtları bulunmaktadır. Bunların başında bölgedeki mevcut sert rüzgârlar ve dondurucu soğuklar, nokta tesisindeki güçlükler, 60° güney enleminin daha altındaki bölgelerde yıl boyunca 1 uzun gece, 1 uzun gündüz yaşanması gibi hususlar gelmektedir. Bununla birlikte noktalar arası görüş zorunluluğu gerektirmemesi, hava koşullarından neredeyse bağımsız olması, günün her saatinde ölçme yapılabilmesi gibi unsurlara bağlı olarak uydu-bazlı konum belirleme yöntemlerinden olan Global Navigation Satellite System/Küresel Navigasyon Uydu Sistemlerinden (GNSS) yaygın olarak yararlanılmaktadır. Ancak bu zorlu koşullar GNSS yönteminin uygulanmasında da normal koşullardaki (düşük enlemlerdeki) uygulamalara göre bazı farklılıklar ortaya çıkarmakta ve buna bağlı olarak da konum belirleme performansı olumsuz olarak etkilenmektedir. Örneğin klasik statik rölatif GNSS ölçmelerinde, gezici alıcıya belirli bir mesafede bulunan ve konumu bilinen en az bir referans istasyonu gerekmektedir. Elbette dünyanın pek çok bölgesinde olduğu

gibi Antarktika'da da uluslararası organizasyonların çatısı altında yer alan sürekli gözlem yapan GNSS istasyonları bulunsa da dünyanın diğer bölgelerindekilerle kıyaslanamayacak kadar sayılarının az olması bu istasyonlarla gezici GNSS alıcısı arasındaki baz uzunluklarının yüzlerce km'yi bulmalarına neden olabilmektedir. Bilindiği üzere rölatif yöntemde çözüm yapılabilmesi için referans ve gezici alıcılarda eş zamanlı olarak aynı GNSS uydularına gözlem yapılması gerekmektedir. Antarktika kıtasının bulunduğu coğrafik bölgede GNSS uydularının yörüngelerinin Ekvatorla yaptıkları açıya bağlı olarak, düşük enlemlerdeki bölgelerle kıyaslandığında yüksek açılarla ve uzun sürelerle uydu gözlemlerinin yapılması daha kısıtlı olmakta, buna bağlı olarak da uzun bazlarda güvenilir tamsayı faz başlangıç belirsizliği (ambiguity-fixed) çözümü yapılamamaktadır. Antarktika'daki mevcut referans istasyonlarının kullanılamaması durumunda alternatif çözüm, uygulayıcıların çalışma bölgelerinde çok sayıda konumu bilinen jeodezik nokta tesis ederek sıklaştırma yapmasıdır. Bu seçeneğin uygulanması da yukarıda belirtilen Kıtanın kendine özgü coğrafik ve teknik kısıtları nedeniyle oldukça güç görünmektedir.

Diğer yandan mühendislik ölçmeleri, haritacılık, deniz uygulamaları, İnsansız Hava Aracı uygulamaları, heyelan ölçmeleri, deprem erken uyarı sistemleri, sismoloji, buzul ve kıyı erozyonlarının izlenmesi, otonom ölçme sistemleri gibi bilimsel ve pratik pek çok uygulama alanında gerçek-zamanlı (real-time) olarak cm-dm doğrulukta üretilecek konum bilgisi kritik öneme sahiptir. GNSS yöntemi ile cm-mertebesindeki doğruluklarla gerçek-zamanlı konum belirleme için en yaygın kullanılan yöntem, 1990'lı yıllardan beri uygulanan Single-baseline Real-Time Kinematik (RTK) yöntemidir. Ancak bu yöntemin uygulamasında gezici alıcı ile

referans istasyonu arasındaki mesafenin en fazla 10-20 km arasında olması gerekmekte olup, bu husus yöntemin uygulanmasını kısıtlamakta, ölçme verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Bu olumsuzlukları ortadan kaldıran Network RTK (NRTK) adı verilen diğer bir yöntem, tüm dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak her iki yöntemde de yüksek doğrulukla konumu bilinen referans istasyonlarına veya CORS türü GNSS ağlarına ihtiyaç duyulması, düzeltmelerin iletilmesi/alınması için güçlü bir iletişim altyapısının (radyolink, GSM, internet vb.) gerekmesi, yöntemin bazı bölgelerde kullanımını kısıtlamaktadır. Sayılan tüm bu hususlar, Antarktika'da bilhassa gerçek-zamanlı rölatif konum belirleme yöntemlerinin uygulanmasında önemli lojistik ve teknik sorunlarla karşılaşılacağını ve ayrıca bu bölgede kullanılmalarının çok efektif olamayacağını göstermektedir.

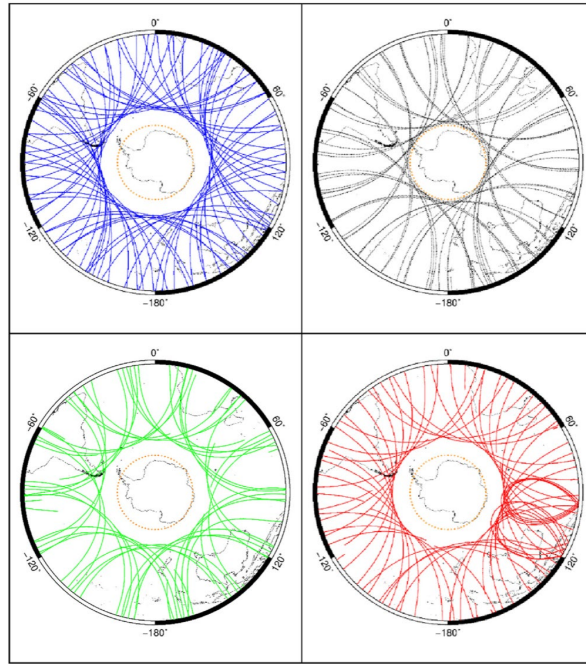
Rölatif yöntemde yer alan bu kısıtlar bilim insanlarını, ilave bir alıcıyla toplanan verilere gereksinim duymayan, rölatif yöntemin sağladığı doğruluğu sağlayacak düzeyde konum belirlemeyi mümkün kılacak yöntem arayışlarına yönlendirmiş ve bu durum tek bir alıcı kullanarak yüksek doğrulukta konum belirlemeye imkân tanıyan yöntemlerin geliştirilmesini sağlamıştır. Bunlardan en bilineni Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning-PPP) tekniğidir. Bu teknik aslında 1970'li yıllarda R.J. Anderle (1976) tarafından ortaya konulmuş olmasına karşın, günümüzdeki anlamıyla ilk kez Zumberge vd. (1997) tarafından uygulanmıştır. PPP yönteminde, tekli veya çoklu-frekansa sahip tek bir GNSS alıcısıyla toplanan veriler, başta International GNSS Service (IGS) olmak üzere birçok veri analiz merkezi tarafından yayınlanan hassas uydu yörünge ve saat ürünleri ile kod/faz sapmaları gibi diğer başka ürünlerle birlikte değerlendirilerek konum

belirlenmektedir. Ancak bu yöntemde cm-dm mertebesindeki doğruluklara ulaşabilmek için ölçmelere etki eden bazı etkilerin (taşıyıcı dalga faz dönüklüğü, sagnac, anten faz merkezi, gel-git ve okyanus ve kara yüklemesi vb.) modellenmeleri ve/veya düzeltilmeleri gerekmektedir. PPP ile konum belirlemenin en önemli eksikliği, cm mertebesinde bir doğrulukla konum belirleyebilmek için ortalama 20-30 dakika ila bazı durumlarda daha fazla süreli yakınsama süresine gereksinim duyulmasıdır. Bu durum, tekniğin özellikle gerçek-zamanlı uygulamalarda kullanılabilirliği için önemli bir kısıt olmaktadır. IGS'in başlattığı Real-Time Service (RTS) projesi kapsamında Nisan 2013 yılından bu yana gerçek-zamanlı uydu yörünge ve saat bilgileri üretilerek kullanıma sunulmuştur. Bunun sonucunda gerçek-zamanlı PPP (RT-PPP) konsepti geliştirilmiş ve pek çok uygulamada kullanılmaya başlanmıştır. PPP sahip olduğu uygulama kolaylığı ve sağladığı doğruluk üstünlüğüyle günümüzün standart bir konum belirleme yöntemi haline gelmiştir.

GNSS tekniğinin kullanımı Antarktika Kıtasında konum belirlemede öne çıkmakla birlikte, bölgenin kendine has coğrafik ve iklimsel koşulları, diğer başka çalışma bölgelerinde yaşanmayan ilave başka zorlukları ve kısıtları beraberinde getirmektedir. Zira genel anlamda kutup bölgelerinde, çalışmamız özelinde ele alınan Antarktika Kıtasında, uyduların konstelasyonlarına bağlı olarak gözlem yapılan uydu sayısı kısıtlı olmakta, GNSS uyduları (GPS (G), GLONASS (R), Galileo (E) ve BDS (C)) daha kısa süreli olarak ve düşük yükseklik açılarında gözlemlenmektedir. GNSS sisteminin bileşenlerinden GPS ve BDS uydularının yörüngeleri Ekvator düzlemi ile 55°'lik bir açıya sahiptir. Buna karşın Galileo uydularının yörüngeleri Ekvatorla 56°, GLONASS uyduları ise 64.8°'lik açıya sahiptir.

Bu durum, bu açılardan daha fazla değere sahip enlemlerde (yüksek enlem bölgelerinde) gözlemcinin başucu doğrultusunda uydu gözlemi yapılamamasına, kutup bölgelerine yaklaştıkça ancak belirli bir ufuk yüksekliğine kadar ölçmelerin yapılabilmesine imkan vermektedir. Bir başka ifadeyle gözlemcinin bulunduğu yerin enlem değeri arttıkça, gözlemlenen uyduların yükseklik açısı azalmaktadır. Yüksek enleme sahip olan kutup bölgelerinde gözlemcinin bulunduğu konumun üstünde (başucu doğrultusunda), gökyüzünde boşluklar oluşmakta, uydu geometrisi zayıflamakta ve buna bağlı olarak da konum

belirleme performansı olumsuz şekilde etkilenmektedir (özellikle yükseklik bileşeni düşük enlemlerdekine göre çok daha fazla etkilenmektedir) (Jensen ve Sicard, 2010; Jong vd., 2014; Li vd., 2019; Erol vd., 2020; Yastrebova vd., 2021). Antarktika Kıtasının ufkunun üstünde gözlemlenen GNSS sistemine ait uyduların yeryüzü izleri Şekil 1'de verilmiştir. Şekilden de görülebileceği üzere güney kutup noktasının başucu doğrultusunda en az boşluk, GLONASS uydularına aittir. Diğer uydu sistemlerinde ise birbirine oldukça benzer ve daha fazla boşluklar meydana gelmektedir.



Şekil 1. Antarktika Bölgesindeki (güney kutup noktasında bulunan bir alıcı için) GNSS Uydularının Yeryüzü İzleri; GPS (sol üst), GLONASS (sağ üst), Galileo (sol alt), BDS (sağ alt) (Zhang vd., 2020)

Figure 1. Ground Track of GNSS Satellites in Antarctica (for a receiver occupied at the South Pole); GPS (top left), GLONASS (top right), Galileo (bottom left), BDS (bottom right) (Zhang et al., 2020)

Diğer yandan Ekvator ve kutup bölgelerinde geomanyetik aktivite ve solar aktiviteden kaynaklı olarak iyonosferik sintilasyon daha fazla olmakta ve dikkate alınmaması durumunda konum doğruluğu olumsuz yönde fazlaca etkilenmektedir (Jensen ve Sicard, 2010).

Bu çalışmada GNSS konumlandırma tekniği açısından bazı kısıtları bulunan Antarktika Kıtasında RT-PPP tekniğinin yatay (2B) ve düşey konumlama performansı (doğruluk ve yakınma süresi açısından), farklı GNSS uydu sistemlerinin kombinasyonları ve farklı analiz merkezlerince üretilen gerçek-zamanlı düzeltme ürünlerinin etkileri ile birlikte araştırılmıştır.

GERÇEK ZAMANLI HASSAS NOKTA KONUMLAMA TEKNIĞİ (RT-PPP)

Hassas Nokta Konumlama (PPP) tekniği, tek bir GNSS alıcısı ile başka hiçbir istasyon verisine ihtiyaç duyulmadan, IGS ve IGS çatısı altında hizmet veren Analiz Merkezleri (IGS AC) tarafından yayınlanan uydu yörünge, saat ve diğer düzeltme verilerini kullanarak, küresel bir koordinat sisteminde yüksek doğruluklu konum sağlayan popüler ve yaygın olarak kullanılan bir Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS) konum belirleme tekniğidir. Yöntem, günümüzdeki anlamıyla ilk kez Zumberge vd. (1997) tarafından uygulanmıştır. PPP tekniği ortaya çıktığı ilk yıllarda, IGS tarafından sadece GPS için hassas ürünler sağlandığından, yalnızca bu uydu sistemi için kullanılmıştır. GLONASS uydu sisteminin 2011 yılında tekrar tam kapasite çalışmaya başlaması ve IGS tarafından GPS+GLONASS için bütünleşik hassas ürünlerin yayınlanmasıyla birlikte GPS ve GLONASS ölçüleriyle PPP tekniğinin uygulanması mümkün hale gelmiştir. IGS'in 2016 yılında, farklı sinyal ve uydu sistem verilerinin toplanması, izlenmesi ve analiz edilmesi için başlattığı Multi-GNSS Experiment (MGEX) projesi kapsamında çoklu-GNSS ürünleri kullanıma sunulmuş ve çoklu-GNSS

PPP uygulanmaya başlanmıştır. Çoklu-GNSS kavramıyla beraber, aynı anda çok sayıda uydudan veri elde edilebildiği için, PPP tekniğinin en önemli dezavantajı olan yakınsama süresi, çoklu-GNSS PPP'de anlamlı bir düzeyde kısaltılabilmektedir (Chen vd., 2021; Duong vd., 2020). Ayrıca IGS ve/veya IGS Analiz Merkezleri tarafından üretilen hassas uydu yörünge ve saat düzeltmelerine ek olarak kod ve faz sapma (bias) değerlerinin de üretilmesiyle birlikte PPP çözümündeki başlangıç tam sayı belirsizlikleri tam sayı olarak çözülebilmüş, bu durumda konum doğruluğu artmış ve ayrıca yakınsama süresi de kısaltılabilmektedir (Vaclavovic ve Nesvadba, 2020). PPP tekniğinde başka bir referans istasyonu verisine ihtiyaç duyulmadan, statik ve kinematik olarak yüksek doğruluklarda küresel bir koordinat sisteminde 3B konum belirleme imkânı sunulması, bu yöntemi klasik rölatif konum belirleme yöntemlerine karşı önemli bir alternatif haline getirmiştir.

IGS Analiz Merkezleri tarafından yayınlanan hassas uydu yörünge ve saat ürünleri genellikle sahada gerçekleştirilen ölçmeler sonrası üretildikleri için, PPP tekniği ilk zamanlarda esas olarak ölçme sonrası konumlandırma ve veri işlemede kullanılmıştır. Fakat IGS, Gerçek-Zamanlı Hassas Nokta Konumlama (RT-PPP) uygulamalarının taleplerini karşılamak için, IGS-Gerçek-Zamanlı Servis (IGS-RTS) Projesini Nisan 2013'te resmi olarak kullanıma sunmuştur. RT-PPP için gerekli olan IGS-RTS ürünleri, yayın efemerisine ek olarak uydu yörünge ve saat düzeltmeleri ile kod ve faz sapma değerlerini içermektedir. Bu yaklaşımda, IGS Analiz Merkezleri tarafından hesaplanan GNSS uydu yörüngesi ve saat düzeltmelerinden oluşan IGS RTS ürünleri, RTCM State Space Representation (SSR) standardına göre formatlanır ve NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) ile internet üzerinden anlık olarak yayınlanır. Gerçek-zamanlı olarak yayınlanan SSR formatındaki

IGS-RTS ürünlerinin içerisinde, uydu yayın yörünge bilgilerinden türetilen ECEF koordinat sistemindeki uydu koordinatlarına eklenecek radyal, boyuna ve çapraz yörünge düzeltmeleri ve yayın yörünge bilgilerindeki uydu saat hatalarına eklenecek uydu saat düzeltmeleri bulunmaktadır. Bu yörünge ve saat düzeltmelerini, yayın efemerisinden türetilen uydu yörüngelerine ve saatlerine uyguladıktan sonra, PPP için kesin uydu yörüngeleri ve saatleri hesaplanmış olmaktadır. IGS'in ilk SSR ürünleri sadece GPS ve GPS+GLONASS uydu sistemlerini desteklemekte iken, 2021 yılı itibari ile IGS kendi SSR ürünlerinde; GPS, GLONASS, Galileo ve BDS uydu sistemlerini desteklemeye başlamıştır. IGS'e ek olarak BKG, CAS, CNES, DLR, GFZ, GMV ve WHU isimli IGS Analiz Merkezleri de 2017 yılından bu yana çoklu-GNSS RT-PPP için SSR formatında gerçek-zamanlı ürünler sunmaktadırlar. IGS ve IGS-Analiz Merkezlerinin dışında, Galileo operasyonlarından sorumlu ana yüklenici olan Spaceopal GmbH şirketi, 2018 yılının Ekim ayında NAVCAST olarak bilinen, dünya çapında yeni bir gerçek-zamanlı düzeltme servisini kullanıma açmıştır. Bu servis, Alman Havacılık ve Uzay Merkezi (DLR) tarafından geliştirilen RETICLE algoritmasına dayalı olarak Galileo+GPS sistemlerini destekleyen gerçek-zamanlı hassas uydu yörünge ve saat düzeltmelerini içermektedir. Ayrıca, Japonya Havacılık ve Uzay Araştırma Ajansı (JAXA) 2014 yılında GPS, GLONASS ve QZSS sistemlerini destekleyen MADOCA (Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis) isimli gerçek-zamanlı uydu yörünge ve saat düzeltme hizmetini kullanıma sunmuştur. Görüldüğü üzere, bu tür servislere yenileri eklenmekte, bu alan hızlı bir gelişmeye sahne olmaktadır.

RT-PPP tekniğinin uygulanmasında, NTRIP protokolü kullanılarak gerçek-zamanlı IGS-

RTS SSR ürünlerinin ve GNSS ham verilerinin alınabilmesi için kullanıcıların "Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) NTRIP Client (BNC)", "Real-time Kinematic Library (RTKLIB)", "Precise Point Positioning With Integer and Zero-difference Ambiguity Resolution Demonstrator (PPP-Wizard)" vb. programların yüklü olduğu sürekli internet bağlantısı olan bir bilgisayara ihtiyaçları vardır. Ancak internet kesintisi veya diğer nedenlerle ortaya çıkan iletişim kopukluğunda gerçek-zamanlı ürünlerin alınmasında aksaklıklar meydana gelmekte, bu da gerçek-zamanlı konum belirlemeyi kısıtlamakta veya yapılamamasına neden olmaktadır.

GNSS konusunda çalışmalar yapan araştırmacılar oldukça yeni sayılabilecek RT-PPP tekniğini farklı alanlarda uygulamakta ve oldukça ümit verici sonuçlar elde etmektedirler. Konuyla ilgili temel bilgiler ve uygulama sonuçları Wang vd. (2018); Li vd. (2019); Monico vd. (2019); Wang vd. (2019); Yang vd. (2019); Di vd. (2020) ve Alcaay ve Turgut (2021)'de verilmektedir.

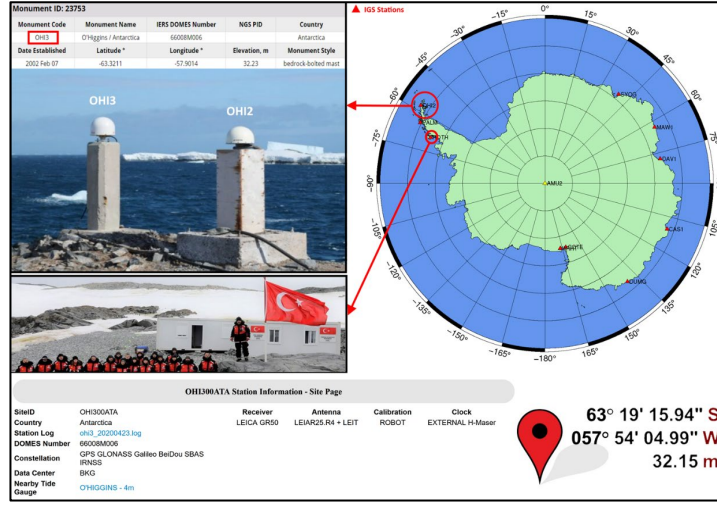
UYGULAMA

Çalışmada Antarktika kıtasında RT-PPP tekniğinin kullanılabilirliği incelenmiştir. Bu kapsamda IGS-MGEX RTS projesi kapsamında dörtlü uydu sistemi (GREC) için hizmet veren 6 farklı analiz merkezinden ikisi olan DLR ve CNES kurumlarının çoklu-GNSS gerçek-zamanlı hassas SSR düzeltmelerinin farklı uydu kombinasyonları kullanılarak, RT-PPP tekniğinin farklı analiz merkezlerinin SSR ürünlerine ve farklı uydu konfigürasyonlarına bağlı olarak doğruluk ve yakınsama süresi performansları araştırılmıştır. Bu çerçevede gerçekleştirilen çalışmalar, elde edilen sonuçlar ile birlikte izleyen bölümlerde verilmiştir.

Çalışma Alanı ve Ölçmeler

Çalışmanın amacına uygun olarak, uygulamada, Türk Antartik Bilim Üssünün kurulacağı Horseshoe adasına en yakın sürekli gözlem yapan ve ölçülerini gerçek-zamanlı olarak internetten yayınlayan OHI300ATA istasyonu (kısaltılmış şekliyle OHI3) seçilmiştir

(Şekil 2). Şekilde ayrıca Ülkemize ait Antartika Bilim Üssünün kurulacağı bölgenin bir görseli de verilmiştir. Seçilen referans istasyonu IGS-MGEX-RTS ağına ait bir nokta olup, $63^{\circ} 19' 15.941''$ G (S); $57^{\circ} 54' 04.987''$ B(W); $h=32.15$ m (ITRF) yaklaşık koordinatlarına sahiptir.



Şekil 2. Uygulamada Kullanılan IGS-MGEX RTS Ağının OHI300ATA İstasyonu (fotoğrafta soldaki pilye) (sol) ve Antartika Kıtasındaki Konumu (sağ)

Figure 2. OHI300ATA Reference Station (left in photo) of IGS-MGEX RTS Network Used in Study (left) and Location in Antarctica Continent (right)

OHI3 istasyonunda Leica GR50 GNSS alıcısı ile LEIAR25.R4+LEIT anteni bulunmakta olup, GPS, GLONASS, Galileo, BDS ve SBAS uyduları gözlemlenmektedir. İstasyon ile ilgili diğer teknik detaylar IGS (2021)'de yer almaktadır.

Çalışmada, 13 Eylül 2020 tarihinde (GPS Günü/Haftası: 257/2123) ve 15 Eylül 2020 tarihinde (GPS Günü/Haftası: 259/2123) olmak üzere iki farklı günde iki uygulama yapılmıştır. İlk uygulamada 16.5, ikinci uygulamada 14.5 saat süreyle gerçek-zamanlı çoklu-GNSS PPP çözümü ile her bir saniye için RT-PPP koordinatları elde edilmiştir. RT-PPP tekniğiyle konum belirleyebilmek için, her iki gün için de OHI3 istasyonundan alınan gerçek-zamanlı çoklu-GNSS ham gözlem verileri, IGS-RTS'in gerçek-zamanlı ürünü olan RTCM3EPH-MGEX yayın (broadcast) bilgileri ve ilgili gerçek-zamanlı IGS-MGEX SSR düzeltme ürünleri kullanılmıştır. Çoklu-GNSS gerçek-zamanlı PPP çözümlerinde kullanılan yayın efemeris ve SSR düzeltme bilgileri; ürün ismi, RTCM mesaj numaraları ve intervalleri, mesaj içerikleri, ürünü üreten kurum ve bağlı olduğu ülke, ürünün üretildiği yazılım bilgileri ile birlikte Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Çoklu-GNSS Gerçek-zamanlı PPP için Kullanılan MGEX Ürünler**Table 1.** MGEX Products Used for Multi-GNSS Real-time PPP

Ürün/Akış İsmi	GNSS	RTCM Mesaj Numarası ve İntervalı (saniye)	Mesaj İçeriği	Kurum	Yazılım
RTCM3EPH-MGEX	GREC	1019(5), 1020(5), 1045(5)+1046(5), 1042(5)	Yayın Yörünge	BKG/DEU	BNC
SSRA00CNE0	GREC	1060(5), 1066(5), 1243(5), 1261(5), 1059(5), 1065(5), 1242(5), 1260(5), 1265(5), 1266(5), 1267(5), 1270(5)	Bütünleşik Düz. Kod-sapmaları Faz-Sapmaları	CNES/FRA	PPP-WIZARD
SSRA00DLR0	GREC	1057(30), 1063(30), 1240(30), 1258(30), 1058(5), 1064(5), 1241(5), 1259(5), 1059(30), 1065(30), 1242(30), 1260(30), 1265(30), 1266(30), 1267(30), 1270(30)	Yörünge Düz. Saat Düz. Kod-sapmaları Faz-Sapmaları	DLR/DEU	RETICLE

Yukarıda da ifade edildiği üzere farklı düzeltme ürünlerinin ve farklı uydu sistemlerinin gerçek-zamanlı PPP konum belirleme performansına etkisini belirleyebilmek için; ilk uygulamada Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), ikinci uygulamada ise Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) tarafından üretilen sırasıyla 'SSRA00DLR0' ve 'SSRA00CNE0' kodlu RTCM formatındaki SSR ürünleri NTRIP protokolü yardımıyla alınarak aşağıda belirtilen 4 farklı uydu konfigürasyonu senaryosu altında OHI3 istasyonunun 1 sn'de bir RT-PPP koordinatları elde edilmiştir:

Senaryo 1- Sadece GPS (G) gözlemleri,

Senaryo 2- GPS+GLONASS (G+R) gözlemleri,

Senaryo 3- GPS+GLONASS+Galileo (G+R+E) gözlemleri,

Senaryo 4- GPS+GLONASS+Galileo+BDS (G+R+E+C) gözlemleri.

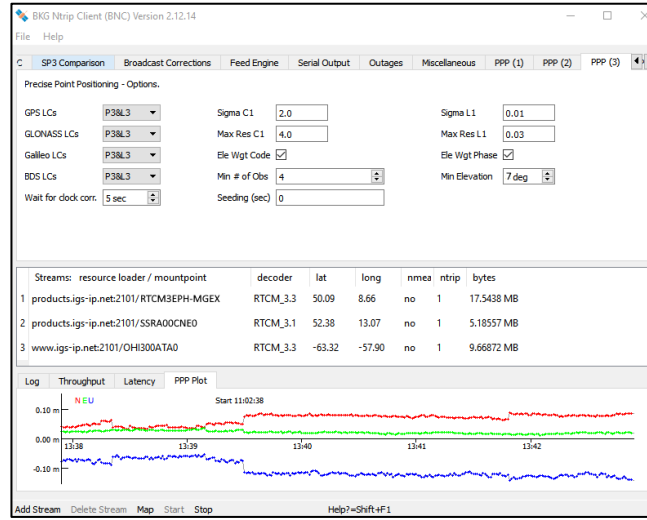
Noktanın gerçek-zamanlı PPP koordinatları Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) tarafından hazırlanıp kullanıma sunulan BKG Ntrip Client (BNC) v.2.12 yazılımı ile hesaplanmıştır (Şekil 3). Burada hatırlatılmasında yarar olan bir husus, IGS-RTS servisinde yararlanabilmek için IGS'e

ücretsiz bir üyelik kaydının yapılarak kullanıcı adı ve şifresinin alınması gerektiğidir.

BNC yazılımı RT-PPP çözümü için üç tür veri kümesine ihtiyaç duymaktadır. Bunlar; GNSS gözlemleri, GNSS yayın efemerisleri (broadcast ephemerides) ve gerçek-zamanlı SSR düzeltmeleridir. BNC yazılımı ile ilgili detaylı bilgiler Weber vd. (2016)'da yer almaktadır.

Uygulamadaki iki farklı gün için gerçekleştirilen 4 farklı uydu konfigürasyonuna (G, GR, GRE ve GREC) ait gerçek-zamanlı PPP çözümleri eş zamanlı olarak, tamamen aynı ölçme ve iletişim (internet) koşullarında elde edilmiştir. Ölçmeler süresince, analiz merkezlerinden SSR düzeltmelerinin alınamamasına neden olacak erişim sorunu ile karşılaşılması gibi internet bağlantısından kaynaklı bir kesinti vb. gibi olumsuzluklar da yaşanmamıştır. Sonuç olarak OHI3 istasyonunun iki uygulama günündeki koordinatları yukarıdaki her bir senaryo için BNC yazılımı ile float olarak (başlangıcı faz belirsizliği tamsayı olmadan) ITRF2014 datumunda epok-epok elde edilmiştir.

BNC yazılımı ile RT-PPP çözümü yapılırken dikkate alınan bazı değerlendirme parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 3. Uygulamada Kullanılan BNC Yazılımının Arayüzü

Figure 3. Interface of BNC Software Used in the Study

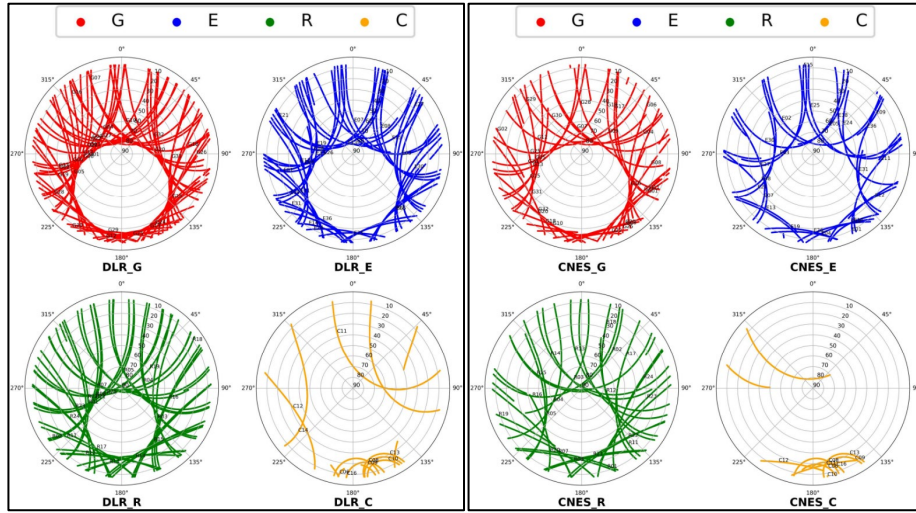
Tablo 2. RT-PPP Çözümü için BNC Yazılımında Kullanılan Temel Bazı Parametreler

Table 2. Some Main Parameters Used in BNC Software for RT-PPP Solution

Parametre	Tanımı
Yazılım&Sürümü	BKG Ntrip Client (BNC) v.2.12
Çözüm Stratejisi	RT-PPP (Float)
Gözlemler	Fark-alınmamış iyonosfer-bağımsız kod ve faz ölçmeleri
Uydu Sistemleri	G, GR, GRE, GREC
Eğim Açısı	7 derece
Çözüm intervali	1 saniye (1 Hz)
Başlangıç Doğrulukları	Kod ölçüleri için 2m; Faz ölçüleri için 1cm
Ağırlıklandırma	Eğim açısına (E) bağlı olarak $1/\sin^2(E)$
Düzeltilme Ürünleri	SSRA00DLR0, SSRA00CNE0
Yayın Yörüngesi	RTCM3EPH-MGEX
Öncül Troposferik Model	Saastamoinen
Troposferik Gecikme	Kestirildi
İzdüşüm Fonksiyonu	Başucu açısına (z) bağlı olarak $1/\cos(z)$
Faz Dönmesi Düzeltmesi	Uygulandı
Katı Yer Gelgit Düzeltmesi	Uygulandı
Anten Faz Merkezi	Uydular için APC tabanlı SSR, alıcı için igs14.atx
Referans Çerçevesi	ITRF2014

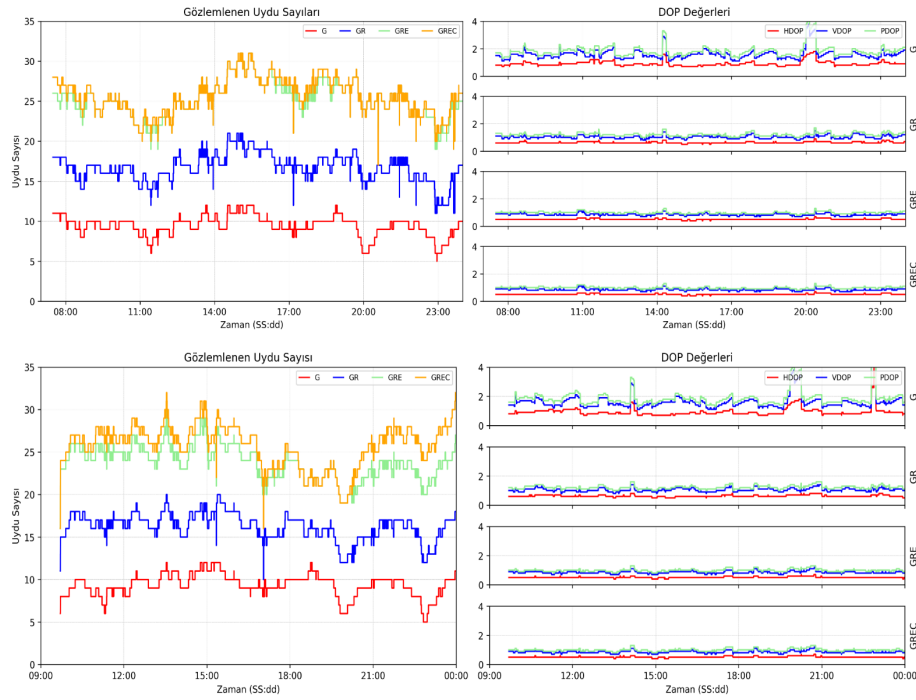
Çözümlerde kullanılan uyduların 7° eğim açısının üstündeki “uydu görünürlük grafikleri” Şekil 4’de verilmiştir (şekillerde yer alan dairelerin merkezi OHI3 istasyonunu temsil

etmektedir). Gözlemlenen uydu sayıları ile DOP (Dilution of Precision-Duyarlılık Kaybı) değerleri de Şekil 5 ile Tablo 3’de verilmiştir.



Şekil 4. OHI3 İstasyonuna ait Uydu Görünürlük Grafikleri (sol: ilk ölçmeler; sağ: ikinci ölçmeler)

Figure 4. Satellite Visibility Graphs of Station OHI3 (left: first measurements; right: second measurements)



Şekil 5. OHI3 İstasyonuna ait Uydu Sayısı ve DOP Değerleri (üst: ilk ölçmeler; alt: ikinci ölçmeler)

Figure 5. Number of Satellites and DOP Values of OHI3 Station (top: first measurements; bottom: second measurements)

Tablo 3. Çözümlerdeki Minimum, Maksimum, Ortalama Uydu Sayıları ve DOP Değerleri**Table 3.** Minimum, Maximum, Average Number of Satellites and DOP Values in Solutions

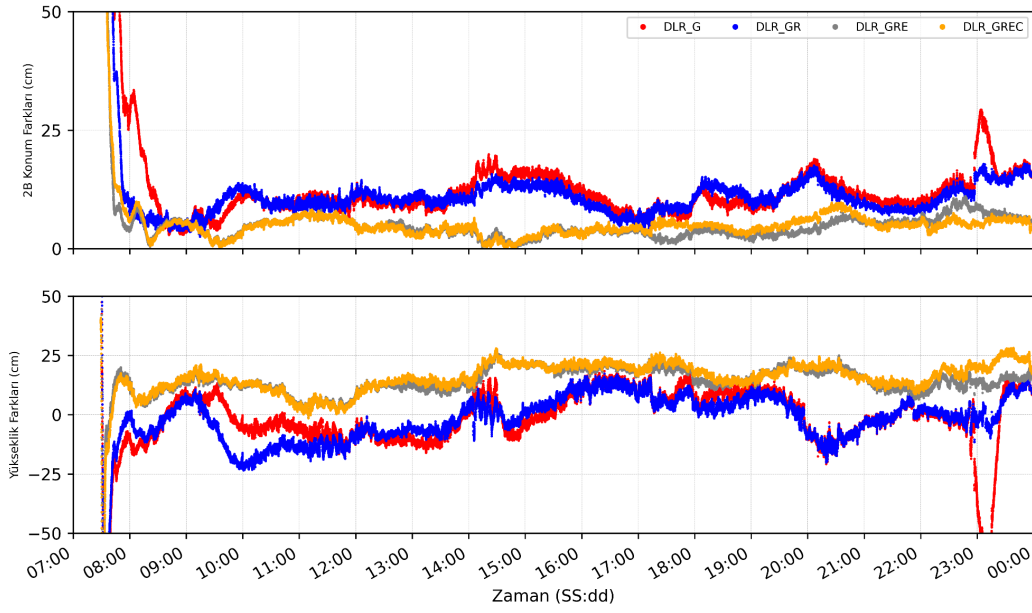
Parametre	İstatistik	DLR SSR Çözümü				CNES SSR Çözümü			
		G	GR	GRE	GREC	G	GR	GRE	GREC
HDOP	Min.	0.7	0.5	0.4	0.4	0.7	0.5	0.4	0.4
	Maks.	1.8	0.9	0.7	0.7	1.8	0.8	0.7	0.7
	Ort.	0.9	0.6	0.5	0.5	0.9	0.6	0.5	0.5
VDOP	Min.	1.1	0.8	0.7	0.7	1.1	0.8	0.7	0.7
	Maks.	3.8	1.5	1.1	1.1	24.2	1.4	1.2	1.2
	Ort.	1.6	1.0	0.1	0.8	1.7	1.0	0.8	0.8
PDOP	Min.	1.3	1.0	0.8	0.8	1.3	1.0	0.8	0.8
	Maks.	4.1	1.7	1.3	1.3	25.4	1.6	1.3	1.3
	Ort.	1.8	1.2	1.0	1.0	2.0	1.2	1.0	1.0
Toplam	Min.	5	11	17	17	5	10	16	16
Uydu	Maks.	12	21	31	31	12	20	30	32
Sayısı	Ort.	9	16	25	25	9	16	23	25

Verilerin Değerlendirilmesi ve Sayısal Sonuçlar

İki farklı IGS Analiz Merkezinin SSR düzeltmeleri yardımıyla 4 farklı uydu konfigürasyonu için gerçekleştirilmiş olan RT-PPP çözümlerinin yatay ve düşey konum doğruluklarını belirleyebilmek için, OHI3 istasyonunun yüksek doğrulukla hesaplanmış referans (ITRF2014) koordinatları, her bir çözümün her bir ölçme epoğu için elde edilmiş 2B konum ve yükseklik değerleri ile ayrı ayrı

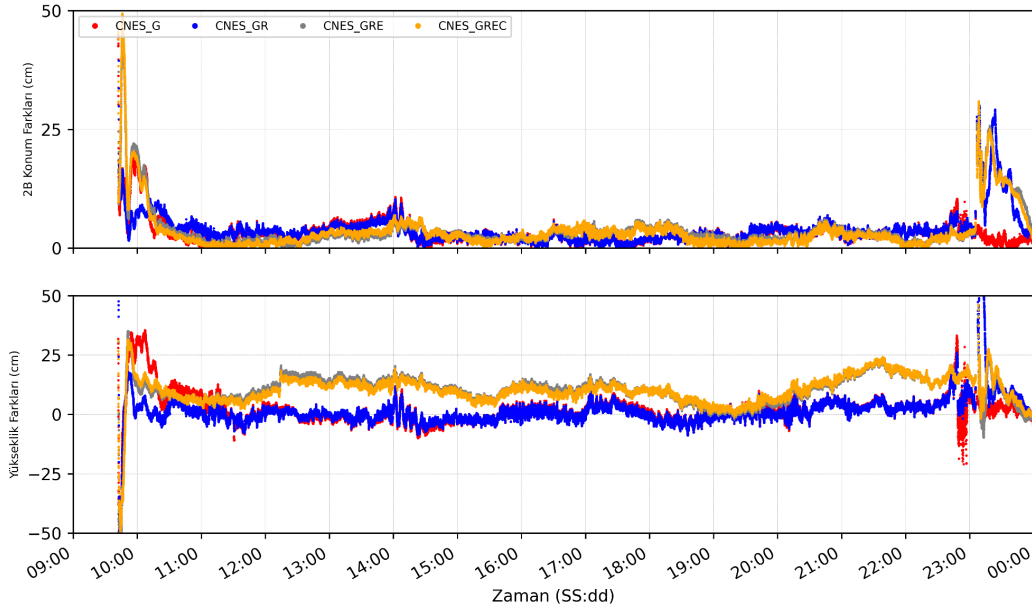
karşılaştırılmıştır. Her iki uygulama günü ve her bir senaryo için elde edilen farklara ait zaman serileri, ilk ölçmeler için Şekil 6'da, ikinci ölçmeler için de Şekil 7'de verilmiştir.

Diğer yandan, yakınsama süresi sonrası, her iki ölçme günü ve her bir senaryo için elde edilen doğu (e) ve kuzey (n) bileşeni farklarının dağılımları iki boyutlu olarak çizdirilmiş ve Şekil 8'de verilmiştir.



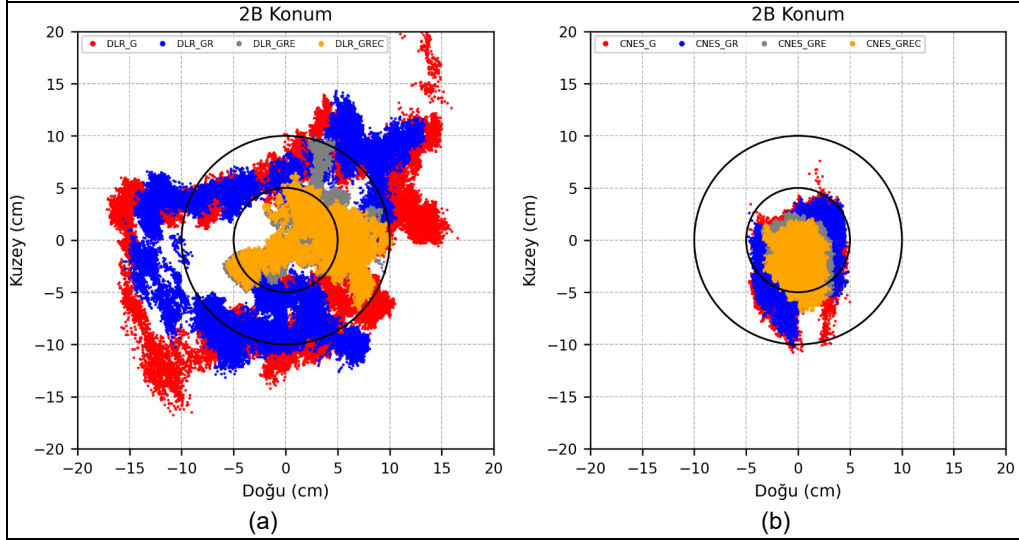
Şekil 6. OHI3 İstasyonunun Bilinen Koordinatları ile Gerçek-zamanlı PPP (RT-PPP) Koordinatları Arasındaki Farklar (DLR Çözümleri)

Figure 6. Differences between Known Coordinates of OHI3 Station and Real-time PPP (RT-PPP) Coordinates (for DLR Solutions)



Şekil 7. OHI3 İstasyonunun Bilinen Koordinatları ile Gerçek-zamanlı PPP (RT-PPP) Koordinatları Arasındaki Farklar (CNES Çözümleri)

Figure 7. Differences Between Known Coordinates of OHI3 Station and Real-time PPP (RT-PPP) Coordinates (for CNES Solutions)



Şekil 8. Yakınsama Süresi Sonrası İstasyonun Bilinen Koordinatları ile Gerçek-zamanlı PPP (RT-PPP) Koordinatları Arasındaki 2B Konum Dağılımı (a) DLR Çözümü, (b) CNES Çözümü

Figure 8. 2D Position Distribution Between Known Coordinates of Station and Real-time PPP (RT-PPP) Coordinates After Convergence Time (a) DLR Solution, (b) CNES Solution

Burada önemle vurgulanması gereken bir husus, çalışmada yakınsama süresinin, ölçmelerin başladığı ilk ölçme epoğundan itibaren, RT-PPP koordinatı ile bilinen nokta koordinatı arasındaki 2B konum farkının 10 cm ve daha az olması için geçen zaman aralığı olarak tanımlanmış olduğudur. Bir başka ifadeyle ölçmelerin başlamasından itibaren 2 boyuttaki konum farkının 10 cm'ye ulaştığı

zamana kadar geçen süre, yakınsama süresi olarak alınmıştır.

Çalışmada ele alınan tüm senaryolar için elde edilen RT-PPP çözümlerinden hesaplanan farklara ilişkin bazı istatistiksel bilgiler (minimum, maksimum ve ortalama farklarla, Karesel Ortalama Hata-KOH) Tablo 4'de verilmiştir. Tabloda ayrıca her bir çözüme ait yakınsama süreleri de yer almaktadır.

Tablo 4. Farklara Ait İstatistiksel Bilgiler

Table 4. Statistical Information of Differences

Çözüm Senaryosu	Yakınsama Süresi (dakika)	2B Konum (cm)				Yükseklik (cm)			
		Min.	Maks.	Ort.	KOH	Min.	Maks.	Ort.	KOH
DLR (G)	60	3	29	11	± 12	-32	20	0	± 11
DLR (GR)	30	3	18	10	± 11	-23	17	-2	± 9
DLR (GRE)	15	0	11	4	± 5	-1	27	15	± 15
DLR (GREC)	15	0	10	5	± 5	-1	28	16	± 17
CNES (G)	30	0	10	3	± 3	-21	33	2	± 5
CNES (GR)	10	0	10	3	± 4	-9	37	1	± 4
CNES (GRE)	25	0	10	3	± 3	-5	24	11	± 12
CNES (GREC)	25	0	10	3	± 3	-2	24	10	± 11

BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmada elde edilen sonuçlar, farklı unsurlar dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Bunlardan ilki, çözümlerde kullanılan uyduların görünürlükleri hususudur. Şekil 4'de verilen uydu görünürlük grafiklerine bakıldığında, OHI3 istasyonunun başucu (zenit) doğrultusunda GPS, Galileo ve BDS uydularının gözlemlenemediği görülmektedir. Ancak GLONASS uydularında bu durum olmamış, 90° yükseklikte de gözlem yapılabilmektedir. GPS, Galileo ve BDS uydularının yörüngelerinin Ekvator düzlemi ile yaptığı açılar (yörünge eğimi) sırasıyla 55° , 56° ve 55° olup, bu değerler ölçme yapılan OHI3 istasyonunun enlem değerinden ($\sim 63.3^\circ G (S)$) daha düşüktür. Buna bağlı olarak da bu istasyonda başucu doğrultusunda yalnızca GLONASS uydularına gözlem yapmak mümkün olabilmektedir. Zira GLONASS uydularının yörüngelerinin diğer uydu sistemlerinin yörüngelerine göre Ekvatorla yaptığı açı daha fazladır (64.8°). Bir gözlem istasyonunda uyduların yüksek eğim açılarında gözlemlenememesi yükseklik bileşeninin doğruluğunu düşük enlem bölgelerine kıyasla daha fazla etkilemektedir. Şekillerde bir başka göze çarpan husus da OHI3 istasyonun güneyinde gözlemlenen uyduların daha kısa süreli ve daha düşük eğim açılarında gözlemlenebilmesi olmuştur. Noktanın güneyinde yer alan bu uydular ancak 20 derecelik eğim açısına kadar yükselebilmekte ve daha kısa süreli ufkun üstünde görünmektedirler.

Çözümlerde kullanılan uydu sayıları ile DOP değerlerinin verildiği Şekil 5 ve Tablo 3 incelendiğinde, DLR analiz merkezinden alınan SSR ürününün kullanıldığı ilk uygulama çözümlerinde, GPS uydularının sayısının 5 ile 12 arasında değiştiği (ortalama 9), GLONASS uydularının eklenmesi ile bu sayının 11 ile 21

arasında olduğu (ortalama 16) görülmektedir. Bu iki sisteme Galileo ve BDS uydularının eklenmesi halinde ise bu sayı her iki durumda da 17 ile 31 arasında (ortalama 25) değişmiştir. İlgili şekil ve tablodan anlaşılacağı üzere, dörtlü sistem RT-PPP çözümlerinde çok az sayıda BDS uydusu kullanılabilmiştir. Bu durumun sebebinin, BDS uydularından elde edilen ölçmelerin çift frekanslı olmaması veya RT-PPP çözümü sırasında BDS ölçmelerinin uyumsuz ölçü olarak çözümden çıkartılmış olması olduğu değerlendirilmiştir. İkinci uygulama çözümünde ise, kullanılan GPS uydularının sayısı ortalama 9, GPS+GLONASS uydularının sayısı ortalama 16, GPS+GLONASS+Galileo uydularının sayısı ortalama 23 ve nihayet dörtlü sistemdeki, GPS+GLONASS+Galileo+BDS, uyduların sayısı da ortalama 25 olmuştur. Bu çözümde az da olsa BDS uydu gözlemi (ortalama 2 uydu) çözümde kullanılmıştır.

Benzer durum DOP değerleri için de geçerlidir. DOP değerlerine bakıldığında, yalnızca GPS çözümü için minimum, maksimum ve ortalama HDOP (Horizontal Dilution of Precision) değerlerinin sırasıyla 0.7, 1.8 ve 0.9 olduğu; dörtlü sistem için ise bu değerlerin sırasıyla 0.4, 0.7 ve 0.5'e indiği görülmüştür. Hatırlanacağı üzere çözümde kullanılan uydu geometrisinin hesaplanan noktanın yatay konumuna (enlem ve boylama) etkisi HDOP ile gösterilmektedir. Çözümde kullanılan uydu geometrisinin hesaplanan noktanın yüksekliğine etkisini gösteren VDOP (Vertical Dilution of Precision) değerlerine bakıldığında ise, ilk ölçmelerde yalnızca GPS için minimum, maksimum ve ortalama değerler sırasıyla 1.1, 3.8 ve 1.6; dörtlü sistemde ise sırasıyla 0.7, 1.1 ve 0.8 olarak elde edilmiştir. İkinci ölçmelerde VDOP değeri için oldukça yüksek değerlerin elde edildiği uydu konfigürasyonlarında gözlemlerin yapıldığı zaman dilimleri olsa da genel olarak

ilk ölçmelerdekine benzer değerler elde edilmiştir.

Bu sonuçlara göre, çoklu-GNSS (multi-GNSS) gözlemlerinin kullanımının RT-PPP çözümünde kullanılan uydu sayısını artırdığı, dolayısıyla bu durumun DOP değerlerini de anlamlı düzeyde iyileştirdiğini görmek mümkün olmuştur. Bu durumun, yani çoklu-GNSS (multi-GNSS) gözlemlerinin kullanımının, uyduların düşük yüksekliklerde ve kısa sürelerle gözlem yapılabildiği Antarktika bölgesinde (genelde kutup bölgelerinde) konum belirleme performansı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu değerlendirilmiştir.

PPP tekniğinin en önemli kısıtlarından birisi hiç şüphesiz çözümlerin yakınsama süresidir. Bu çalışmada yakınsama süresi -yukarıda da ifade edildiği üzere- 2B konum konum farklarının (RT-PPP koordinatları ile bilinen nokta koordinatı arasındaki fark) 10 cm veya daha azına ulaşması için ilk ölçmeden itibaren geçen süre olarak kabul edilmiştir. Tablo 4'de verilen her bir çözüme ait yakınsama sürelerine bakıldığında; DLR'nin SSR ürünlerinden GPS, GPS+GLONASS, GPS+GLONASS+Galileo ve GPS+GLONASS+Galileo+BDS uydu konfigürasyonları için sırasıyla 60, 30, 15 ve 15 dakika değerleri elde edilmiştir. Diğer yandan CNES'in SSR ürünlerinin kullanıldığı ölçmelerde bu değerler aynı sıraya göre 30, 10, 25 ve 25 dakika olarak elde edilmiştir. Buradan elde edilen ilk sonuç, çözümde kullanılan uydu sistemlerinin sayısındaki artışın yakınsama süresinin kısaltılmasına genel olarak anlamlı katkı sağladığı olmaktadır. Buna ilave olarak yakınsama süresinin, çözümde kullanılan farklı analiz merkezine ait düzeltme ürünlerine bağlı olarak da değiştiği görülmüştür.

Şekil 6, Şekil 8 ve Tablo 4'de verilen bilgilere göre, DLR Analiz Merkezinin ürünlerinin kullanıldığı RT-PPP çözüm sonuçları

incelendiğinde, sadece GPS uydularının kullanılması durumunda 60 dakikalık yakınsama süresi sonrasında 2B konum için farklar, 3 cm ile 29 cm arasında (± 12 cm KOH ile) elde edilmiştir. Yükseklik bileşeninde ise bu değerler benzer şekilde -32 cm ile 20 cm arasında (± 11 cm KOH ile) bulunmuştur. GPS ile GLONASS gözlemlerinin çözümde birlikte kullanılması halinde (GR çözüm), 30 dakikalık yakınsama süresi sonrasında 2B konum için farklar 3 cm ile 18 cm arasında (± 11 cm KOH ile), yükseklik bileşeninde ise -23 cm ile 17 cm arasında (± 9 cm KOH ile) elde edilmiştir. Üçlü-konfigürasyonda ise (GRE çözüm) yakınsama süresinde %75'lik bir iyileşme olmuş ve 15 dakika gibi oldukça iyi bir değere inmiştir. Ayrıca farklarda da anlamlı bir iyileşme gözlemlenmiştir. Yakınsama süresi sonrasında, 2B konum için 11 cm'nin altında (± 5 cm KOH ile), yükseklik için de -1 cm ile 27 cm arasında (± 15 cm KOH ile) farklar elde edilmiştir. Ancak üçlü uydu sistemi (GRE) ile dördü uydu sistemi (GREC) çözümleri arasında anlamlı bir fark görülmemiştir. Bu durumun nedeni, yukarıda ifade edildiği üzere, çözümde kullanılan BDS ölçmelerinin az sayıda olması, ölçülerin tek frekanslı veya uyumsuz olması olarak değerlendirilmiştir. Genel olarak DLR sonuçlarından çoklu-GNSS gözlemlerinin kullanımının, tekli-GPS sistemine göre hem yakınsama süresini hem de doğruluğu iyileştirdiği anlaşılmıştır.

CNES Analiz Merkezinden alınan SSR düzeltmeleri ile gerçekleştirilen RT-PPP çözümlerine ait Şekil 7, Şekil 8 ve Tablo 4'de verilen değerlere bakıldığında DLR çözümlerine benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Yalnızca GPS uyduları kullanılarak elde edilen gerçek-zamanlı koordinatlarla bilinen koordinatlar arasındaki farkların, 30 dakikalık yakınsama süresi sonrasında, 2B konum için 10 cm'nin altında (± 3 cm KOH ile), yükseklik

için de -21 cm ile 33 cm arasında (± 5 cm KOH ile) değiştiği görülmüştür. GPS gözlemleri ile GLONASS gözlemlerinin birlikte kullanılması durumunda (GR çözüm) yakınsama süresi 10 dakika gibi oldukça iddialı bir değere ulaşmış, konum ve yükseklik doğrulukları da sadece GPS çözümlerine benzer şekilde elde edilmiştir. Diğer uydu sistemlerinin de eklenmesiyle elde edilen üçlü (GRE) ve dördü (GREC) çözümler incelendiğinde, yakınsama süresinin yalnızca GPS'e göre az da olsa iyileşmiş ve 25 dakikaya inmiştir. Bu çözümler için 2B konumdaki farklar hem GRE, hem de GREC çözüm için 10 cm'nin altında (± 3 cm KOH ile) elde edilmiştir. Yükseklikler için ise farkların sırasıyla -5 cm ile 24 cm arasında (± 12 cm KOH ile) ve -2 cm ile 24 cm arasında (± 11 cm KOH ile) değiştiği görülmüştür.

Şekil 6 ve Şekil 7'de verilen zaman serilerinden de görülebileceği üzere, her iki gündeki tüm çözüm senaryoları altında gerçekleştirilen RT-PPP çözümlerinde, yakınsamadan sonra ne analiz merkezlerinden düzeltmelerin alınmasında ne de internet bağlantısında bir sorun ile karşılaşılmanın, ölçmeler sürekli bir şekilde yaklaşık 16.5 ve 14.5 saat boyunca başarıyla yapılmıştır. Her iki analiz merkezinden alınan düzeltme verileri ile çoklu-uydu sistemleri kullanılarak yapılan RT-PPP çözümlerinin yalnızca GPS uydularının kullanılması ile elde edilen çözümlere göre 2B konum farklarını anlamlı şekilde iyileştirdiği (birkaç dm'den 10 cm seviyesine indirdiği) görülmüştür. Ek olarak CNES SSR ürününden elde edilen çözümler, 2B konum farkları ve doğruluklar açısından, DLR ürünlerinden çok daha iyi sonuçlar vermiştir. Ancak yükseklik için genel olarak tüm çözümlerde 2-3 dm mertebesinde farklar elde edilmiştir. Yükseklik doğruluklarına bakıldığında genel olarak 2B konumdan daha düşük KOH değerleri elde edilmiştir. Yükseklik bileşeni için çoklu-sistemlerin kullanılmasında

tekli-sisteme göre anlamlı bir KOH iyileşmesinin gerçekleşmediği görülmüştür. Özellikle, Galileo ve BDS sisteminin RT-PPP çözümüne eklenmesiyle, bilinen nokta yüksekliği ile çoklu-GNSS RT-PPP çözümleri arasında, DLR için yaklaşık 15 cm, CNES için ise yaklaşık 10 cm lik bias ortaya çıkmıştır. Aslında her iki uygulama günündeki GRE ve GREC konfigürasyonu için elde edilen çoklu-GNSS RT-PPP çözümlerinin yükseklik bileşenlerinin standart sapma değeri ± 5 cm'dir. Daha önce de belirtildiği üzere kutup bölgelerinde gözlemcinin başucu doğrultusunda gözlem yapılamaması ve uyduların düşük yükseklik açılarında ve kısa sürelerle gözlemlenmeleri, yükseklik doğruluğunu düşük ve orta enlem bölgelerinde elde edilen değerlere göre daha fazla (olumsuz olarak) etkilemektedir. Genel olarak tüm çözümlere bakıldığında, dördü-GNSS çözümlerinin tekli, ikili ve üçlü sistemlere göre yakınsama süresini iyileştirdiği, 2B konum doğruluğunu artırdığı, ancak yükseklik bileşeninde bu iyileşmenin aynı oranda olmadığı sonucuna varılmıştır.

Tüm bu bulgulardan hareketle, gerçek-zamanlı PPP konum belirleme performansının yalnızca kullanılan uydu sistemlerine ve ölçme koşullarına değil, aynı zamanda çözümler sırasında kullanılan gerçek-zamanlı SSR düzeltme ürünlerinin performansına (doğruluğuna ve kullanılabilirliğine) bağlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bilindiği üzere IGS çatısı altındaki birçok analiz merkezi, SSR düzeltmelerini, farklı sayıdaki ve dağılımdaki GNSS izleme istasyonu verilerini farklı yazılımlar ve farklı veri değerlendirme stratejileri kullanarak üretmektedir. Buna bağlı olarak her bir analiz merkezinin SSR ürünlerinin doğruluğu ve kalitesi de birbirine göre az veya çok farklılık gösterebilmektedir. Hiç şüphesiz RT-PPP'den elde edilen konum

doğrulukları da bu durumdan yakından etkilenmektedir.

SONUÇLAR

Çalışma kapsamında gerçek-zamanlı Hassas Nokta Konumlama (RT-PPP) tekniğinin, zorlu çevresel koşullara sahip Antarktika kıtasındaki performansı ve kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu çerçevede kıtada yer alan IGS-MGEX-RTS ağına ait noktalardan olan OHI300ATA noktasının RT-PPP koordinatları, iki farklı IGS analiz merkezince üretilen çoklu-GNSS SSR ürünleri kullanılarak farklı uydu konfigürasyonları (G, GR, GRE ve GREC) için gerçek-zamanlı olarak hesaplanmıştır. Böylelikle hem farklı gerçek-zamanlı düzeltme ürünlerinin hem de farklı uydu sistemlerinin RT-PPP çözümlerinin doğruluğuna ve yakınsama süresine olan etkisi araştırılmıştır.

Çalışma sonucunda; Antarktika Kıtasında, BNC yazılımı ile IGS-RTS ürünleri ve tek bir GNSS alıcısının verileri kullanılarak yaklaşık 20-30 dakikalık yakınsama süresi sonrasında, bilinen koordinatlarla cm-dm arasında değişen farklarla gerçek-zamanlı 2B konum belirlemenin mümkün olduğu görülmüştür. Aynı zamanda, çalışmadan elde edilen yatay ve düşey konum doğruluklarının çözümde kullanılan farklı IGS Analiz Merkezleri SSR düzeltme ürünlerine ve uydu konfigürasyonuna bağlı olduğu da anlaşılmıştır. Diğer yandan yükseklik bileşeninde elde edilen farkların her uydu konfigürasyonu ve analiz merkezi ürünleri için desimetreler mertebesinde olduğu, çoklu-sistemlerin kullanılmasında tekli-sisteme göre anlamlı bir KOH iyileşmesinin gerçekleşmediği hatta bazı durumlarda kötüleştiği sonucuna ulaşılmıştır.

Genel olarak ifade edilecek olursa, çalışma, günümüzde çok farklı ölçme uygulamalarında gittikçe yaygınlaşarak kullanım alanı bulmaya

başlayan RT-PPP tekniğinin Antarktika Kıtasında klasik rölatif yöntem (RTK) ve klasik ölçme sonrası veri değerlendirme (post-process) PPP tekniğine karşı önemli bir alternatif olacak doğruluklarla 2B konum belirleme imkânı sağladığını göstermiştir. Yalnızca bir GNSS alıcısı ile toplanandan başka herhangi bir veriye gerek duyulmaksızın sadece gerçek-zamanlı hassas yörünge ve saat bilgileri kullanılarak konum belirlenebilmesi, yöntemi ekonomik ve uygulanması kolay bir alternatif haline getirmiştir. Ancak yöntemin başarısı düzeltmelerin alınabilmesi için güçlü bir internet bağlantısı ile yakından ilişkilidir. Herhangi bir sebeple veri alımında kesinti olması halinde (ister analiz merkezinden veri alımından ister internet bağlantısından kaynaklı) konum belirleme de kesintiye uğramaktadır. IGS-RTS kullanılarak RT-PPP yöntemiyle konum belirleme işleminin internete bağlı bir bilgisayarda gerçekleştirilmesinin yerine, uydu-bazlı RT-PPP sistemlerinde olduğu gibi, ölçme anında doğrudan GNSS alıcısında anlık olarak gerçekleştirilmesi ve GNSS hassas ürünlerinin alıcıya anlık olarak sadece internet aracılığıyla değil, uydu-bazlı sistemlerle (İridyum Uyduları gibi) iletilerek yapılması, iletişimden kaynaklı olumsuzluklarının ortadan kaldırılmasına katkı sağlayacaktır.

KATKI BELİRTME

Çalışmanın uygulama kısmında kullanılan GNSS verileri ve ürünlerine erişim imkânı verdikleri için IGS'e ve IGS Analiz Merkezlerine, RT-PPP çözümlerinde kullanılan BNC yazılımı için Bundesamt für Kartographie und Geodäsie'ye içtenlikle teşekkürlerimizi sunuyoruz. Çalışmadaki bazı şekiller, açık kaynak kodlu GNSSpy yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur (Işık vd., 2021). Son olarak, makalenin gözden geçirilmesi için katkıları ve

destekleri nedeniyle editör ve anonim hakemlere teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- AFI (Antarctic Facilities Information), 2021. The Council of Managers of National Antarctic Programs (COMNAP), DOI: <https://www.comnap.aq>, 22 Şubat 2022.
- Alcay, S. ve Turgut, M., 2021. Evaluation of the Positioning Performance of Multi-GNSS RT-PPP Method. *Arabian Journal of Geosciences*, 14:155. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06534-4>
- Anderle, R.J., 1976. Satellite Doppler Positioning. *International Geodetic Symposium, A77-47370* 22-43, Las Cruces-New Mexico-ABD, 47-75.
- Chen, J., Zhao, X., Liu, C., Zhu, S., Liu, Z. ve Yue, D., 2021. Evaluating the Latest Performance of Precise Point Positioning in Multi-GNSS/RNSS: GPS, GLONASS, BDS, Galileo and QZSS. *Journal of Navigation*, 74(1), 247-267. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0373463320000508>
- Di, M., Zhang, A., Guo, B., Zhang, J., Liu, R. ve Li, M., 2020. Evaluation of Real-Time PPP-Based Tide Measurement Using IGS Real-Time Service. *Sensors*, 20(10):2968. <https://doi.org/10.3390/s20102968>
- Duong, V., Harima, K., Choy, S., Laurichesse, D. ve Rizos, C., 2020. Assessing the Performance of Multi-frequency GPS, Galileo and BeiDou PPP Ambiguity Resolution. *Journal of Spatial Science*, 65(1), 61-78. DOI: <https://doi.org/10.1080/14498596.2019.1658652>
- Erol, S., Mutlu, B., Erol, B., Katıgöz, S. ve Alkan, R.M., 2020. Antarktika Kıtasında Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning-PPP) Tekniğinin Performansının İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(5), 844-856. DOI: <https://doi.org/10.35414/akufemubid.761692>
- IGS (International GNSS Service), 2021. OHI300ATA Site Information Form (site log), DOI: https://files.igs.org/pub/station/log_9char/ohi300ata_20211005.log 16 Aralık 2021.
- Işık, M. S., Özbey, V., Erol, S. ve Tarı, E., 2021. GNSSpy: Python Toolkit for GNSS Data, 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, 8550-8553. DOI: <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9553880>
- Jensen, A.B.O. ve Sicard, J-P., 2010. Challenges for Positioning and Navigation in the Arctic. *Coordinates*, 6(10), 10-13.
- Jong, K., Goode, M., Liu, X. ve Stone, M., 2014. Precise GNSS Positioning in Arctic Regions. *Arctic Technology Conference 2014*, Houston, Texas, USA. DOI: <https://doi.org/10.4043/24651-MS>
- Li, M., Xu, T., Flechtner, F., Förste, C., Lu, B. ve He, K., 2019. Improving the Performance of Multi-GNSS (Global Navigation Satellite System) Ambiguity Fixing for Airborne Kinematic Positioning over Antarctica. *Remote Sensing*, 11(8), 992. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11080992>
- Monico, J.F.G., Marques, H.A., Tsuchiya, Í., Oyama, R.T., de Queiroz, W.R.S., de Souza, M.C. ve Wentz, J.P., 2019. Real

- Time PPP Applied to Airplane Flight Tests. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 25(2). DOI: <https://doi.org/10.1590/s1982-21702019000200009>
- Vaclavovic, P. ve Nesvadba, O., 2020. Comparison and Assessment of Float, Fixed, and Smoothed Precise Point Positioning. *Acta Geodynamica Et Geomaterialia*, 17(3), 329-340. DOI: <https://doi.org/10.13168/AGG.2020.0024>
- Wang, L., Li, Z., Ge, M., Neitzel, F., Wang, X. ve Yuan, H., 2019. Investigation of the Performance of Real-time BDS-only Precise Point Positioning Using the IGS Real-time Service. *GPS Solutions*, 23(3), Article: 66, 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0856-9>
- Wang, Z., Li, Z., Wang, L., Wang, X. ve Yuan, H., 2018. Assessment of Multiple GNSS Real-Time SSR Products from Different Analysis Centers. *International Journal of Geo-Information*, 7(3), 85. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi7030085>
- Weber, G., Mervart, L., Stuerze, A., Rülke, A. ve Stöcker, D., 2016. BKG Ntrip Client (BNC) Version 2.12 User Manual. Federal Agency for Cartography and Geodesy (BKG), Frankfurt, Germany.
- Yang, F., Zhao, L., Li, L., Feng, S. ve Cheng, J., 2019. Performance Evaluation of Kinematic BDS/GNSS Real-Time Precise Point Positioning for Maritime Positioning. *The Journal of Navigation*, 72(1), 34-52. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0373463318000644>
- Yastrebova, A., Höyhtyä, M., Boumard, S., Lohan, E.S., ve Ometov, A., 2021. Positioning in the Arctic Region: State-of-the-Art and Future Perspectives. *IEEE Access*, 9, 53964-53978. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3069315>
- Zhang, Q., Chen, Z., Cui, Y., Zheng, X., Rong, F., Sun, Y. ve Gao, L. A. 2020. Refined Metric for Multi-GNSS Constellation Availability Assessment in Polar Regions. *Advances in Space Research*, 66, 655-670. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.04.033>
- 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*, 102 (B3), 5005-5017. DOI: <https://doi.org/10.1029/96JB03860>