

Antarktika Kıtasında Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning-PPP) Tekniğinin Performansının İncelenmesi

Serdar EROL^{1*}, Bilal MUTLU¹, Bihter EROL¹, Serkan KATIGÖZ¹, Reha Metin ALKAN¹

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

Sorumlu yazar e-posta: erol@itu.edu.tr
e-posta: mutlubil@itu.edu.tr
e-posta: bihter@itu.edu.tr
e-posta: katigoz15@itu.edu.tr
e-posta: alkanr@itu.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7100-8267>
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9763-0345>
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0854-788X>
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2070-1491>
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1981-9783>

Geliş Tarihi: 01.07.2020

Kabul Tarihi: 12.10.2020

Öz

Küresel ısınmanın etkisi ile kutup bölgelerinde meydana gelen iklim değişikliklerinin takibi, atmosfer fiziğinin daha iyi ortaya konulabilmesi, buzullardaki deformasyonların ve tektonik hareketlerin sürekli olarak izlenmesi büyük bir öneme sahiptir. Bu kapsamda GNSS (Global Navigation Satellite System-Küresel Navigasyon Uydu Sistemi) ve uzaktan algılama uyduları küresel çaptaki afetlerin izlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. GNSS'i oluşturan uydu sistemlerinin en temel parçası olan GPS uydularının yörüngelerinin ekvatora göre 55° eğime sahip olmasından dolayı kutup bölgelerinde başucu doğrultusu çevresinde uydu gözlemleri kısıtlı olmaktadır. Ayrıca, kutup bölgelerinde yaz ve kış aylarında gün ışığı süresi ve hava koşulları büyük farklılıklar göstermektedir. Bu nedenlerden dolayı kutup bölgelerinde yapılacak GPS ölçmelerine etki eden atmosfer kaynaklı hataların giderilmesi daha fazla önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında PPP tekniğinin Antarktika Kıtasındaki performansı araştırılmıştır. Bu amaçla, Antarktika Kıtasında UNAVCO'ya ait sürekli gözlem yapan HUGO ve HOWE sabit GPS istasyonlarına ait farklı mevsimlerdeki 30 saniye aralıklı günlük gözlem verileri statik ve kinematik PPP yöntemiyle değerlendirilmiştir. Çalışmada, günümüzün en yaygın kullanılan online GNSS değerlendirme servislerinden birisi olan Canadian Spatial Reference System-Precise Point Positioning (CSRS-PPP) servisi ve açık kaynak kodlu akademik bir yazılım olan RTKLIB kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonuçlarına göre PPP tekniği ile elde edilen koordinatların, AUSPOS online rölatif konumlandırma servisi ile elde edilen ve bilinen olarak kabul edilen koordinatlarla statik çözümlerde milimetre, kinematik çözümlerde ise santimetre mertebesinde farklara sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler

Antarktika; GNSS;
Hassas Nokta
Konumlama; PPP;
Troposfer; İyonosfer

Performance Analysis of Precise Point Positioning (PPP) Technique in Antarctica Continent

Abstract

It is of great importance to observe the climate changes that occur in the polar regions with the effect of global warming, to better reveal the atmospheric physics, and to continuously monitor the deformations and tectonic movements in the glaciers. In this context, GNSS (Global Navigation Satellite System) and remote sensing satellites are widely used in the monitoring of global disasters. As one of the most fundamental components of GNSS, GPS satellites have inclined orbits 55° with respect to the equator, therefore around the zenith direction the satellite observations are limited in the polar regions. Also, the daylight duration and weather conditions vary greatly in the polar regions in summer and winter times. For these reasons, eliminating the effects of atmospheric errors on GPS measurements in polar regions is much more crucial. In this study, the performance of PPP technique in Antarctica Continent was investigated. For this purpose, the daily observations with 30-second sampling rates from different seasons belong to HUGO and HOWE continuous GPS stations of UNAVCO in the Continent, were processed with static and kinematic PPP methods. In the study, Canadian Spatial Reference System-Precise Point Positioning (CSRS-PPP) online service, and RTKLIB, an open source academic software, were used. In results of the study, it is seen that the coordinates obtained with PPP technique have differences with the known coordinates of the points obtained from the AUSPOS online relative positioning service are in millimeter for static solutions and in centimeter for kinematic solutions, respectively.

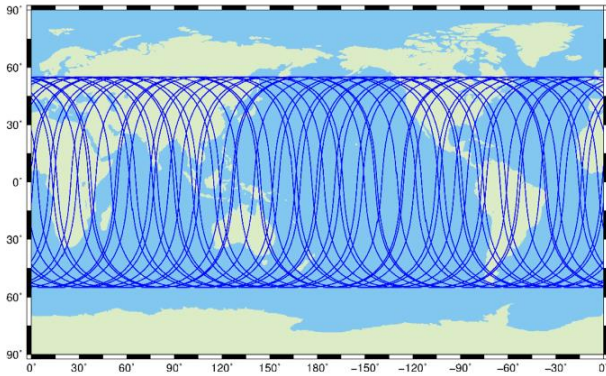
Keywords

Antarctica; GNSS;
Precise Point
Positioning; PPP;
Troposphere;
Ionosphere

1. Giriş

Uydu konumlandırma sistemlerindeki gelişmeler küresel çaptaki ve sürekli gözlem gerektiren afetlerin takibini kolaylaştırmaktadır. GNSS (Global Navigation Satellite System-Küresel Navigasyon Uydu Sistemi) ölçmeleri ile statik veya kinematik olarak oldukça yüksek doğrulukla konum, hız ve zaman belirlenebilmektedir. GNSS ayrıca, atmosferin yapısı, küresel ısınma, meteorolojik tahminler, deniz seviyesi değişimleri ve ayrıca buzulların erimesinin izlenmesi ve değişimlerin belirlenmesi çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Yuan vd., 1993). Ancak GNSS yöntemi ile elde edilecek konum doğruluğu, uygulanacak ölçme ve değerlendirme yöntemine ve ayrıca ölçmelerde kullanılan donanımlara bağlıdır. Günümüzde GNSS ile konum belirleme yöntemlerinden PPP (Precise Point Positioning-Hassas Nokta Konumlama) tekniği, sahip olduğu pek çok önemli avantajıyla klasik rölatif konum belirleme yöntemlerine karşı güçlü bir alternatif oluşturmuştur (Krasuski vd., 2018; DeSanto vd., 2019).

GNSS sisteminin bir parçası olan GPS uydularının yörüngeleri ekvator ile 55° eğim yapan eliptik bir şekle sahiptir. Bu nedenle kutup bölgelerine yaklaştıkça GPS uydularından ancak belirli bir ufuk yüksekliğine kadar ölçme yapılabilmektedir. Bir başka ifadeyle kullanıcının başucu doğrultusu ve çevresinde GPS uyduları gözlemlenememektedir (Şekil 1). Bu durum kutuplarda belirli bir boşluk oluşturarak, bu bölgelerde yapılacak konum belirleme çalışmalarının performansını olumsuz olarak etkilemektedir.



Şekil 1. GPS uydularının yeryüzü izleri (Li vd., 2019)

Ayrıca, kutup bölgelerinde, gün ışığı süresi ve mevsime göre iklim değişikliği çarpıcı bir şekilde hissedilmektedir. Güney kutup noktası ile yaklaşık 67° güney enlemi arasında kalan bölgelerde her yıl, yılın belirli günlerinde güneş hiç batmamaktadır ve aynı zamanda güneşin asla doğmadığı günler de bulunmaktadır. Fakat tamamen karanlık ve aydınlık yani güneşin hiç doğmadığı ve batmadığı günler yalnızca 72° güney enlemi ile güney kutup noktası arasında kalan alanda mümkündür (Int Kyn. 1).

Atmosferin İyonosfer tabakasındaki gecikme GNSS ile konum belirlemede hataya neden olmaktadır. İyonosfer, uydu ile alıcı arasındaki görüş-hattı (line-of-sight) boyunca toplam elektron sayısı olan Toplam Elektron İçeriği (Total Electron Content-TEC) tarafından miktarı belirlenmiş serbest yüklü elektronların bulunduğu bir bölgedir. Toplam elektron içeriği, günlük, aylık, sezonluk ve tahmini 11 yıllık güneş döngüsünün varyasyonlarını içerir (Huang ve Roussel-Dupré, 2005). Aynı zamanda bu gecikme coğrafi konuma göre değişir. GPS ile konum belirlemede ölçmeleri etkileyen İyonosferik ve Troposferik gecikmeler farklı yaklaşımlarla modellenir veya kestirilir.

Ulusal literatürde, PPP tekniğinin Antarktika Kıtasındaki statik ve kinematik performansını inceleyen oldukça kısıtlı çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan Alkan ve Erol (2019)'da, zorlu atmosferik ve topografik koşullara sahip olan Antarktika Kıtasında PPP yönteminin statik GNSS uygulamalarında kullanılabilirliği ve yöntem ile ulaşılabilen doğruluklar araştırılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, tek bir alıcı ile toplanan verilerin PPP yöntemi ile değerlendirilmesiyle santimetre mertebesindeki doğruluklarla 3B konum belirlemenin mümkün olduğu ifade edilmiştir. Diğer bir çalışma da Bezcioglu vd. (2019) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, Antarktika Kıtasında kinematik olarak denizde toplanan iki farklı gündeki GNSS verilerinin klasik PPP ve PPP-AR (PPP-Ambiguity Resolution) sonuçları rölatif yöntemden elde edilen koordinatlarla karşılaştırılmıştır. Bu çalışma sonuçlarına göre PPP-AR sonuçlarının klasik PPP sonuçlarına göre rölatif koordinatlarla daha tutarlı olduğu ifade edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında GPS uydu sistemi ile Antarktika Kıtasında Hassas Nokta Konumlama (PPP) Yönteminin performansının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla 72° güney enleminden daha küçük ve daha büyük enlemlerde olmak üzere iki farklı GPS istasyonunun farklı mevsimde ve farklı gün ışığına sahip günlerdeki verileri kullanılmıştır. Veriler, online GNSS değerlendirme servisi olan CSRS-PPP servisi ve açık kaynak kodlu GNSS değerlendirme yazılımı olan RTKLIB yazılımı kullanılarak, PPP tekniği ile farklı çözüm stratejileriyle değerlendirilmiştir. Elde edilen PPP koordinatları, online GPS rölatif konumlandırma servisi olan AUSPOS servisinden elde edilen koordinatlarla karşılaştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

PPP yöntemi ile hassas konum belirleme yapılabilmesi için yalnızca tek bir GNSS alıcısı ile toplanan verilere ve başta International GNSS Service (IGS) olmak üzere farklı analiz merkezleri tarafından üretilen hassas uydu yörünge ve saat ürünlerine ihtiyaç bulunmaktadır. Rölatif konumlandırmanın aksine PPP başka bir GNSS alıcısı verisine (örneğin bir referans istasyon gözlemlerine) ihtiyaç duymadığı için iş gücünü ve ölçme maliyetlerini anlamlı bir şekilde azaltmaktadır. Yöntem her ne kadar 1970'li yıllarda R.J. Anderle (Anderle, 1976) tarafından gündeme getirilmiş olsa da, günümüzdeki anlamıyla ilk kez Zumberge ve diğ. (1997) tarafından uygulanmıştır. Anılan çalışmada çift frekanslı GPS alıcıları ile toplanan pseudorange kod ve taşıyıcı faz ölçmeleri kullanılmış ve PPP tekniği ile oldukça yüksek doğrulukta konum belirlenebildiği ortaya konulmuştur. Sadece GPS uydu sistemi kullanılarak yöntemin santimetre düzeyinde konumlandırma doğruluğu sunduğu pek çok akademik çalışmada belirtilmiştir (Choy vd., 2017). Kullanıcıların talepleri doğrultusunda PPP zamanla gelişerek tek ve üçlü frekans sistemleri ile de çalışabilir hale getirilmiştir. PPP tekniği artık jeodezik çalışmalar, mühendislik ölçme uygulamaları, hassas tarım, deniz konumlandırma, afet izleme, havadan ve yerden mobil haritalama, otonom araç navigasyonu vb. birçok uygulamada

oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır (Alkan vd., 2020). Ayrıca, daha yüksek doğruluk, kullanılabilirlik ve güvenilirliğe sahip olmak için, günümüzde çoklu GNSS-PPP konsepti uygulanmaktadır. Uydu yörüngeleri ve saat hataları, atmosferik etkiler ve alıcıyla ilgili hatalar ve diğer tüm hata kaynakları PPP tekniğinin doğruluğunu etkilemektedir. Yüksek konumlandırma doğruluğu sağlamak için, PPP çözümlerinde tüm potansiyel hataların ve sistematik etkilerin modellenerek giderilmesi gerekmektedir (Kouba ve Héroux, 2001). Hatalar dahil edilmiş temel PPP ölçme eşitlikleri aşağıda verilmiştir.

$$P_i = \rho + d_{yör} + c(d_{t^r} - d_{t^s}) + T + I_i + d_{röl} + d_{afm} + d_k + b_{P_i^r} - b_{P_i^s} + \varepsilon(P_i) \quad (1)$$

$$L_i = \rho + d_{yör} + c(d_{t^r} - d_{t^s}) + T - I_i + \lambda_i N_i + d_{röl} + d_{afm} + d_k + d_{pw/L_i} + b_{L_i^r} - b_{L_i^s} + \varepsilon L_i \quad (2)$$

Yukarıdaki eşitliklerde i frekans indeksini, P_i kod ölçmelerini (m), L_i faz ölçmelerini (m), ρ uydu ve alıcı arasındaki geometrik uzaklığı (m), $d_{yör}$ uydu yörünge hatasını (m), c ışık hızını (m/sn), d_{t^r} alıcı saat hatasını (sn), d_{t^s} uydu saat hatasını (sn), T troposferik gecikmeyi (m), I_i söz konusu frekanstaki dalganın iyonosferik gecikmesini (m), λ_i taşıyıcı dalganın dalga boyunu (m), N_i söz konusu frekanstaki dalgaya ait başlangıç faz bilinmeyenini, $d_{röl}$ özel ve genel görellilik ve Sagnac etkilerini içeren rölativistik etkiyi (m), d_{afm} anten faz merkezi hatalarını (m), d_k okyanus, kara ve atmosfer gelgit yükleme hatalarını (m), d_{pw/L_i} söz konusu frekansın faz dönmesi (wind-up) etkisini (m), $b_{L_i^r}$ ve $b_{L_i^s}$ söz konusu frekanstaki alıcı ve uydu faz sapma değerlerini (m) ve $\varepsilon(P_i)$ ve $\varepsilon(L_i)$ multipath etkisi dâhil diğer ölçme hatalarını (m) ifade eder (Gao, 2015).

Sahada toplanan verilerin PPP tekniği ile değerlendirilmesinde mutlaka bir GNSS yazılımına ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için pek çok bilimsel ve ticari yazılım mevcut olmakla birlikte, bu yazılımlarla GNSS verilerinin değerlendirilebilmesi için belirli bir düzeyde teorik GNSS bilgisine gereksinim duyulmaktadır. Ayrıca bu yazılımların çoğunda lisans ücreti ödenmesi de gerekmektedir. Diğer yandan anılan bu dezavantajlar olmaksızın,

çok daha kolay bir şekilde verilerin değerlendirilmesine imkân tanıyan web-tabanlı online (çevrimiçi) GNSS değerlendirme servisleri de kullanıma sunulmuştur. İzleyen kısımda, bu konuda temel bazı bilgiler verilmiştir.

2.1 Web-Tabanlı GNSS Veri Değerlendirme Servisleri

Günümüzde farklı kurum, üniversite ve araştırma merkezleri tarafından geliştirilip kullanıma sunulan, sahada toplanan tek veya çok-frekanslı statik/kinematik GNSS verilerini PPP veya rölatif yöntem ile değerlendirebilen, noktaların koordinatlarının hesaplanmasına imkan tanıyan, kullanıcılarına sınırsız olarak hizmet veren web-tabanlı çevrimiçi GNSS değerlendirme servisleri bulunmaktadır. Web-tabanlı bu servislerin temel avantajları, ücretsiz, hızlı ve kolay kullanıma sahip olmalarıdır (Bahadur ve Üstün, 2014). Kullanıcılarının (çoğunlukla) yapması gereken, topladıkları verileri ilgili servisin ara yüzlerini kullanarak veya e-posta/FTP aracılığıyla göndermekten ibarettir. İnternete bağlı bir bilgisayar ve geçerli bir e-posta adresinin yeterli olduğu bu tür servisleri kullanılabilmek için çok temel düzeyde GNSS bilgisi yeterli olmaktadır. Zira kullanıcıların değerlendirme stratejisini seçmeleri (statik/kinematik), anten tipi/yüksekliğini girmeleri, hız modelini seçmeleri gibi temel birkaç seçeneği belirtmeleri yeterli olmaktadır. Veriler gönderildikten hemen sonra servisler değerlendirmeye başlamakta, internet hızına ve sunucu yoğunluğuna bağlı olarak değişmekle birlikte genellikle oldukça kısa bir süre içerisinde (tipik olarak birkaç dakika) değerlendirme işlemi tamamlanmaktadır. Değerlendirme sonuçları ve bu sürece ilişkin pek çok bilgiyi, grafiği ve tabloyu içeren raporlar, kullanıcının sisteme tanıttığı e-posta adresine gönderilmektedir.

Halen yaygın olarak kullanılan değerlendirme servislerinin hangi yöntemle nokta konumlarını hesapladıkları, Çizelge 1' de verilmiştir.

Bu çalışmada noktaların PPP yöntemi ile koordinatlarının belirlenmesinde Canadian Spatial Reference System-Precise Point Positioning (CSRS-

PPP) servisi ve ayrıca açık kaynak kodlu RTKLIB yazılımı kullanılmıştır.

Çizelge 1. İnternet tabanlı GNSS veri değerlendirme servisleri.

Konumlandırma:	Rölatif Yöntem		PPP	
	Statik	Hızlı Statik	Statik	Kinematik
AUSPOS	✓	-	-	-
OPUS	✓	✓	-	-
SCOUT	✓	-	-	-
CSRS-PPP	-	-	✓	✓
Trimble RTX-PP	-	-	✓	-
APPS	-	-	✓	✓
Magic GNSS	-	-	✓	✓
GAPS	-	-	✓	✓

Diğer yandan literatürde yüksek doğrulukla rölatif konumlama yaptığı ifade edilen (Bahadur ve Üstün, 2014) güvenilir bir servis olan AUSPOS, PPP yönteminden elde edilen koordinatların doğruluklarının analizi için gereken referans koordinatların elde edilmesinde kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan söz konusu bu iki çevrimiçi servis (CSRS-PPP ve AUSPOS) ile ilgili temel bilgiler, izleyen kısımlarda verilmiştir.

CSRS-PPP

Canadian Spatial Reference System-Precise Point Positioning (CSRS-PPP) Servisi, Natural Resources Canada kuruluşunun 2003 yılından beridir çevrimiçi olarak kullanıma sunduğu bir PPP konum belirleme servsidir. Bu servis tek veya çift frekanslı alıcılarda statik veya kinematik olarak toplanan GNSS verilerini kabul etmektedir. Hâlihazırda CSRS-PPP, yüksek veri toplama sıklığında (<1 sn ölçme intervalinde) toplanmış verilerin değerlendirmesini yapabilen güncel tek servistir. Ayrıca, GPS uydu sisteminin yanında GLONASS verilerini de değerlendirme kabiliyetine de sahiptir. Servisin yakın bir zamanda başlangıç faz bilinmeyenini tamsayı olarak çözen PPP-AR servisini başlatacağı ifade edilmektedir. CSRS-PPP değerlendirme servisi hakkında daha detaylı bilgiler Donahue vd. (2018) ve servisin web sayfasında yer almaktadır (Int Kyn. 2).

AUSPOS (Australian Online GPS Processing Service)

AUSPOS, Geoscience Australia tarafından geliştirilen web-tabanlı rölatif yöntemle konum belirleyen,

ücretsiz bir değerlendirme servisedir. Değerlendirme için kullanıcıların statik olarak gözlemlenen çift frekanslı en az 1 saatlik (tavsiye edilen iki saat) GPS RINEX verilerini, anten tipi ve anten yüksekliği bilgilerinde girip, web sayfası arayüzünden yüklemeleri yeterli olmaktadır. AUSPOS, ilgili RINEX dosyasını değerlendirip, Avustralya 2020 Yermerkezli (Geocentric) Datumu (GDA2020), Avustralya 1994 Yermerkezli (Geocentric) Datumu (GDA94) ve Uluslararası Yersel Referans Çerçevesi (ITRF) datumundaki koordinatları içeren raporları hazırlar ve kullanıcıların e-posta adreslerine gönderir. AUSPOS sadece çift frekanslı, 30 saniye aralıklı GPS gözlemlerini değerlendirmektedir. Servis, ölçme yapılan noktaya en yakın maksimum 15 IGS ve/veya Asya-Pasifik Referans Ağı (APREF) istasyonunu ve mevcut en iyi IGS ürünlerini kullanarak rölatif yöntemle noktaların konumlarını akademik bir yazılım olan Bernese ile hesaplamaktadır. <http://www.ga.gov.au/bin/gps.pl> adresinden ulaşılan AUSPOS değerlendirme servisi hakkında daha detaylı bilgiler servisin web sayfasında yer almaktadır (Int Kyn. 3).

2.2 RTKLIB Yazılımı

RTKLIB, GNSS ölçüleri ile rölatif ve mutlak konumlandırma yapabilen açık kaynak kodlu bir masaüstü yazılım paketidir. Yazılım Tokyo Üniversitesi Deniz Bilimi ve Teknolojisi bölümü tarafından geliştirilmiş olup GPS, GLONASS, Galileo, QZSS, BeiDou ve SBAS gibi uydu sistemlerinin verilerini değerlendirebilmektedir. RTKLIB, sahada toplanan veriler için ölçme-sonrası (post-process) değerlendirme imkânı sunmakla birlikte, gerçek zamanlı çalışmalarda da kullanılabilir. Yazılım çoklu-GNSS verilerini statik ve kinematik olarak değerlendirebilme kabiliyetine sahiptir (Int Kyn. 4).

3. Uygulama

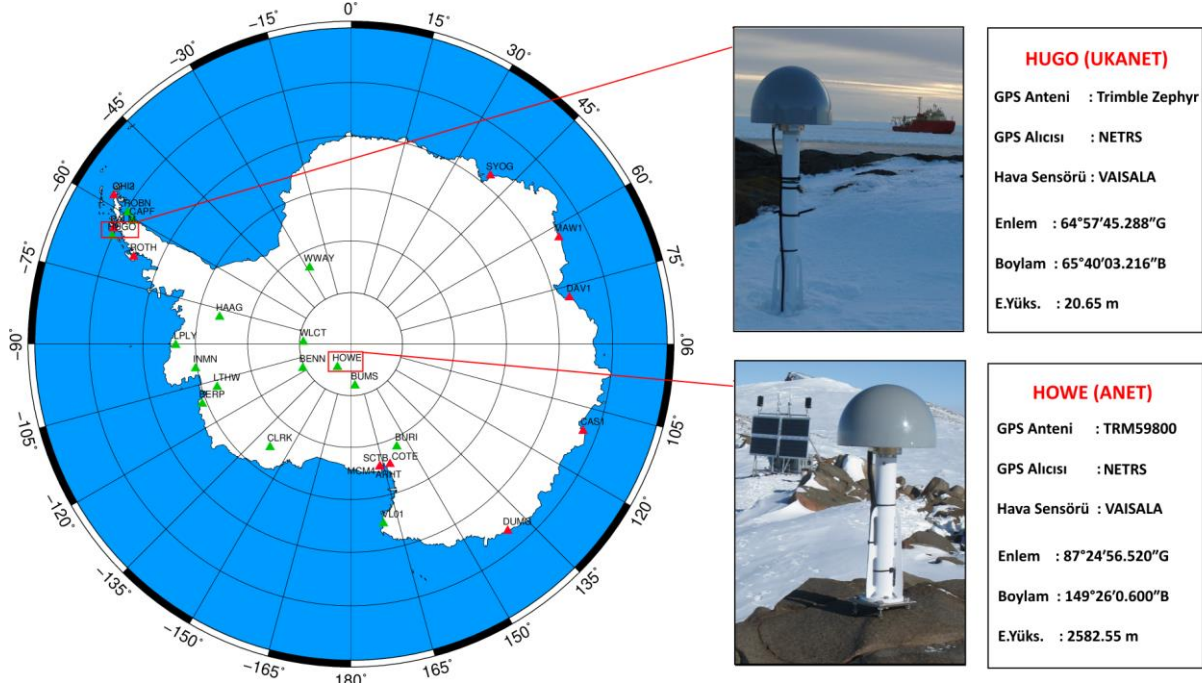
3.1 Çalışma Alanı, Seçilen İstasyonlar ve Veriler

Australian Antarctic Division'ın verilerine göre, Antarktika kıtası 4 km kalınlığa kadar buzla kaplı bir kara küttüsidir. En yüksek noktası yaklaşık olarak deniz seviyesinden 4 km yukarıdadır. Antarktika dünyanın en yüksek, en kurak, en rüzgârlı ve en

soğuk kıtasıdır. Antarktika Yarımadası 2500 metre ortalama yüksekliği ile tüm kıtaların en yüksek unvanına sahiptir. Sıcaklığın düşük seviyede olmasından dolayı kutup bölgelerinde nem oranları düşüktür ve neredeyse dünyanın en sıcak çöllerinde karşılaşılabilen nem oranlarına sahiptir. Böylesi iklimsel ve atmosferik özelliklerinden dolayı Antarktika yaşam için dünyanın en zorlu koşullarına sahip olan bölgelerinden biridir ve aynı zamanda yine bu koşullar GPS ölçmeleri için de çeşitli kısıtlamalara sebep olmaktadır. Mevsimsel etkilerin yanı sıra Antarktika yaz ve kış aylarında gün ışığı süresi yönünden aşırı farklılık göstermektedir. Antarktika'nın yazları tüm gün aydınlık, kışları ise tüm gün karanlık geçen bölgeleri vardır.

UNAVCO Kutup Hizmetleri, POLENET olarak adlandırılan Antarktika (ANET) ve Grönland (GNET) ağları ve benzeri birçok Jeodezik Kutup Gözlem Ağının kurulmasını, devamlılığını ve yönetimini yürütmektedir. Bu GNSS ağları, kutup bölgelerinde yapılan yer bilimleri çalışmaları için konum bilgisi üretiminde kullanılmakla beraber aynı zamanda küresel jeodezik ve jeofizik çalışmalarına da katkı sağlamaktadır. Antarktika'da UNAVCO istasyonları haricinde IGS ağına ait istasyonlar da mevcuttur. Bu istasyonların dağılımı, bu çalışmada kullanılan HUGO ve HOWE noktaları ile birlikte Şekil 2'de verilmiştir. HUGO ve HOWE istasyonları, Antarktika Kıtasındaki sırasıyla UNAVCO UKANET ve ANET ağının sürekli gözlem yapan GPS istasyonlarındandır.

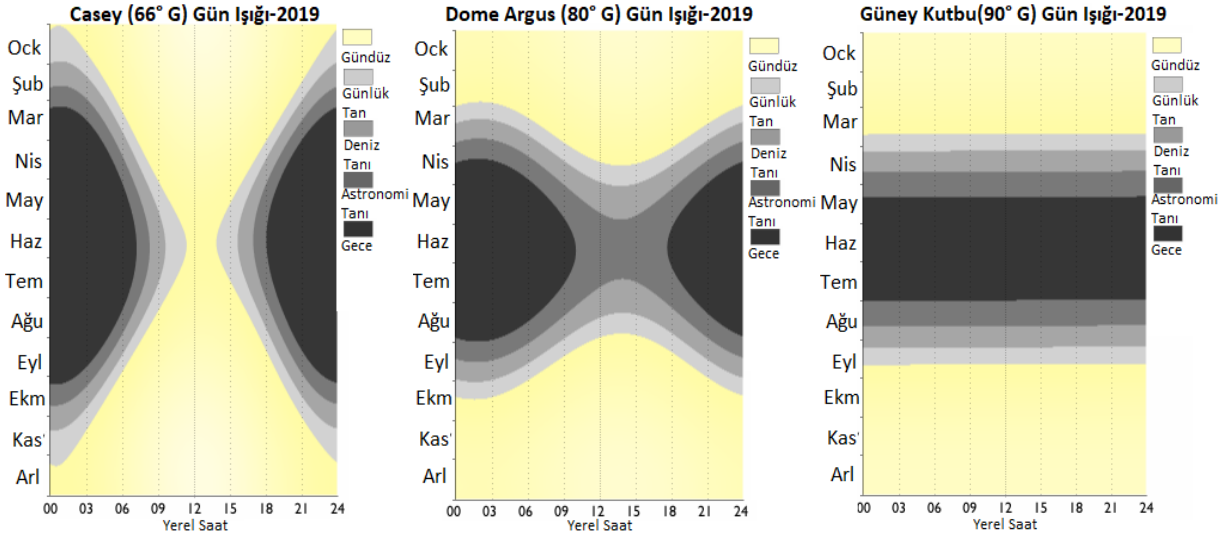
Şekil 2'de verilen yeşil renkli noktalar UNAVCO' nun ANET istasyonlarını, kırmızı renkli noktalar ise IGS istasyonlarını göstermektedir. Şekilde UKANET ağının HUGO istasyonu da yeşil renkte gösterilmiştir. Çalışma kapsamında seçilen, farklı enlemlerde bulunan, sadece GPS verisi ve ayrıca meteorolojik veri toplayan UNAVCO ANET istasyonu olan HOWE, güney kutup noktasına en yakın; HUGO UKANET istasyonu ise en uzak istasyondur. Antarktika'daki Hugo Adası'nda bulunan HUGO istasyonu UNAVCO Kutup Projeleri kapsamında 02.04.2009 tarihinde tesis edilmiştir. Howe Dağı'nda bulunan HOWE istasyonu ise yine aynı proje kapsamında 21.12.2009 tarihinde tesis edilmiştir.



Şekil 2. Antarktika IGS ve UNAVCO istasyonları ve çalışma için seçilen istasyonlar

Bu çalışma kapsamında, GPS istasyonlarında gece ve gündüz sürelerinin maksimum olduğu kış (hep karanlık) ve yaz (hep aydınlık) gündönümü tarihlerine yakın olan 03.06.2018 (GPS Günü 154) ve 20.12.2018 (GPS Günü 354) tarihlerindeki 24 saatlik 30 saniye aralıklı RINEX gözlem verileri değerlendirilmiştir. Böylelikle, farklı mevsimlerde ve

farklı günışığına sahip zamanlarda seçilen bu verilerle, hava şartlarının ve gün ışığının iyonosferik ve troposferik modellere etkisinin ve dolayısıyla PPP çözümlerine etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Antarktika'da farklı enlemlerdeki gün ışığı süreleri Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Antarktika'da farklı enlemlerde günışığı süreleri (Int Kyn. 1)

İstasyonlardan elde edilen meteorolojik verilere göre, iki farklı mevsimdeki hava durumu verileri

(basınç, kuru sıcaklık ve bağıl nem) günlük ortalama olarak Çizelge 2'de verilmiştir.

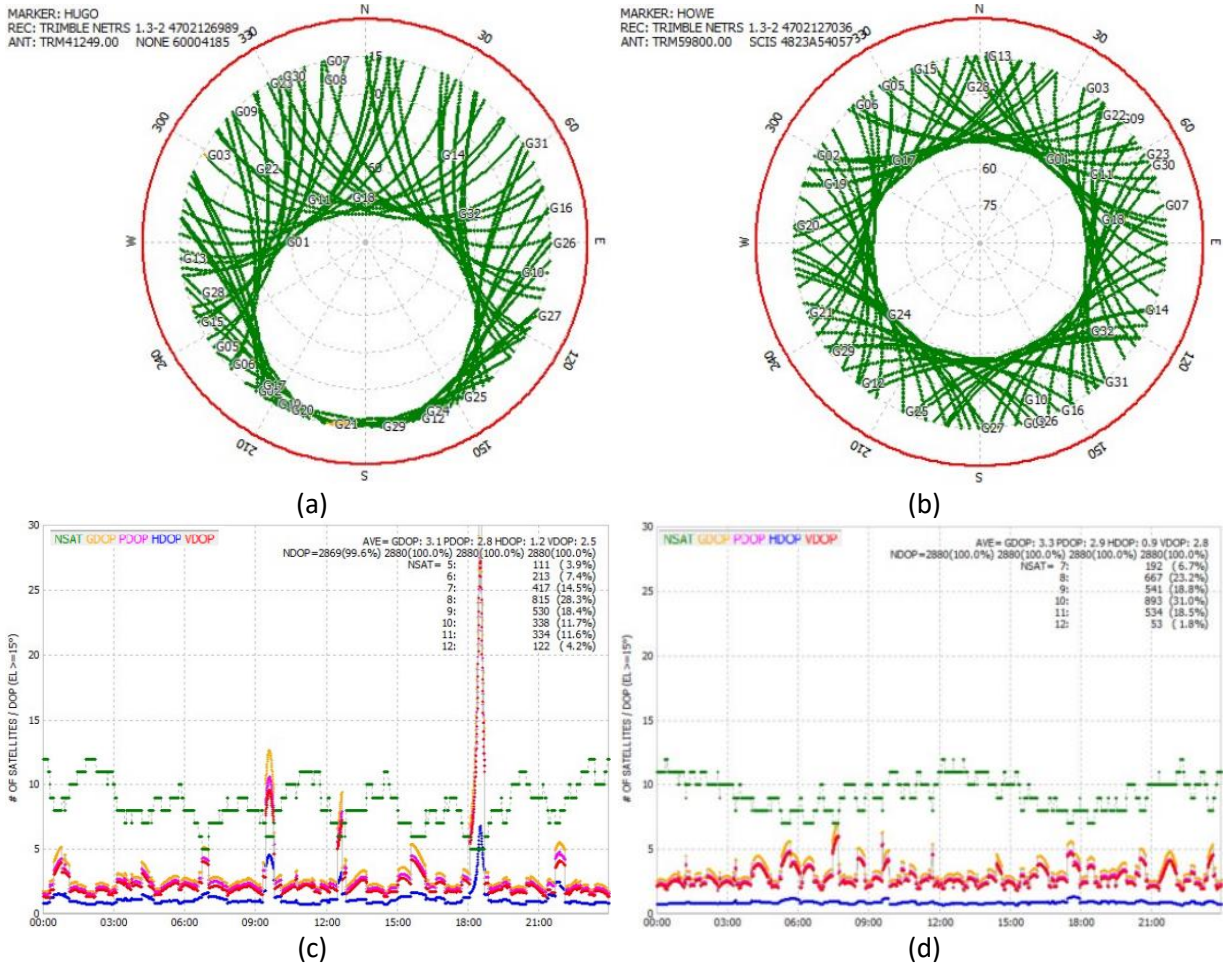
Çizelge 2. GPS istasyonlarındaki atmosferik koşullar.

İstasyon (GPS Günü)	Basınç (mbar)	Kuru Sıcaklık (°C)	Bağıl Nem (%)	Mevsim
HUGO (154)	994.60	-0.72	97.61	Kış
HUGO (354)	984.86	-0.48	86.49	Yaz
HOWE (154)	684.61	-40.54	72.71	Kış
HOWE(354)	718.94	-13.84	84.80	Yaz

Çizelge 2 incelendiğinde, Güney Kutup noktasına daha yakın olan HOWE istasyonundaki iklimsel

koşulların, HUGO istasyonuna göre çok daha zorlu olduğu kolayca görülmektedir.

Çalışmada kullanılan GPS istasyonları farklı enlemlerde bulunduğundan, gökyüzünde görülebilen uyduların dağılımı farklıdır. Şekil 4a ve 4b, herhangi bir günde HUGO ve HOWE istasyonunda 15° eğim açısının üstündeki uyduların 24 saatlik dağılımını göstermektedir.



Şekil 4. HUGO (sol) ve HOWE (sağ) istasyonlarına ait günlük izlenen uyduların durumu (üstte), sayısı ve DOP değerleri (altta)

Şekil 4a'daki çizimin merkezi HUGO istasyonunun konumunu ifade etmektedir. İstasyonun kuzeyindeki uydular daha yüksek eğimlere (80°) çıkmakta ve daha fazla izlenebilmektedir. Güneyinde gözlenen uyduların ise görüş süreleri daha azdır, çünkü GPS uydusu sisteminin yörünge eğimi 55° olduğu için buradaki GPS uydularının eğim açısı maksimum 20° olabilmektedir.

HUGO istasyonundaki DOP (Dilution of Precision-Duyarlılık Kaybı) değerlerinin ve uydularının

zamana göre değişimleri Şekil 4c'de verilmiştir. Ayrıca DOP ve uyduların sayılarının istatistikleri grafiğin sağ üst köşesinde gösterilmektedir. Burada HUGO noktası için, 24 saatlik zaman dilimindeki ortalama uydular sayısının 8, uydular geometrisinin hesaplanan yatay ve dikey koordinatlara etkisini gösteren PDOP değerinin de 2.8 olduğu görülmektedir.

HOWE istasyonu güney kutup noktasına çok daha yakın olduğundan HUGO istasyonuna göre 50° eğim

açısının altında daha homojen bir uydu dağılımına sahiptir (Şekil 4b). Fakat bu noktada her yönde GPS uyduları maksimum 50° eğim açısına kadar yükselebilmektedir. Bir gün boyunca HOWE istasyonunda izlenen ortalama toplam uydu sayısı 10, PDOP değeri ise 2.9 dur (Şekil 4d). HOWE istasyonunda gözlemlenen uydu sayısının gün içerisindeki değişimi (minimum ve maksimum uydu sayısı arasındaki fark) HUGO istasyonundan daha azdır. HOWE istasyonunda daha fazla uydu izlenmiş gibi görünse de HUGO istasyonundaki DOP değerleri daha iyidir.

3.2. Verilerin Değerlendirilmesi

Çalışmada kullanılan istasyonlara ait farklı mevsimlerdeki RINEX verilerinin değerlendirilmesi aşağıda açıklanan şekilde gerçekleştirilmiştir.

CSRS-PPP Çözümleri

Veriler, her istasyon ve her iki zaman için, web-tabanlı CSRS-PPP servisi kullanılarak PPP-Statik ve PPP-Kinematik olarak değerlendirilmiştir. Toplanan veriler statik moda olmasına karşın, kinematik değerlendirme seçeneği seçilerek, her bir ölçme epöğünün PPP tekniği ile koordinatları (PPP-Kinematik) belirlenmiştir. Verilerin PPP tekniği ile değerlendirilmesi sırasında CSRS-PPP servisinin kullandığı parametreler Çizelge 3’de verilmiştir.

RTKLIB Çözümleri

CSRS-PPP çözümlerine benzer olarak, kutup noktasına yakın olduğu için, sadece HOWE istasyonunun yaz ve kış mevsimlerindeki verilerinin 30 saniye aralıklı günlük PPP-Statik çözümleri RTKLIB yazılımı kullanılarak elde edilmiştir.

RTKLIB masaüstü yazılımı kullanıcıya değerlendirme parametreleri seçiminde müdahale imkânı verdiği için bu çözümlerde farklı atmosferik modeller denenmiş ve farklı alternatiflerle çözümler gerçekleştirilmiştir. İyonosferik Gecikme için İyonosfer-Bağımsız Kombinasyonu (Iono-Free LC) ve İyonosfer-Kestirimli (Estimate TEC) modeller kullanılmıştır. Troposferik gecikme için ise Troposfer-Kestirimli (Estimate+ZTD) modeli ve Saastamoinen modeli kullanılmıştır.

Farklı İyonosferik modellerin karşılaştırılması amacı ile, İyonosfer-Bağımsız Kombinasyonu ve İyonosfer-Kestirimli modellerin arasındaki farkı görmek için Troposferik düzeltme modeli olarak Troposfer-Kestirimli model sabit seçilip iki farklı zaman için çözümler gerçekleştirilmiştir. Troposfer model testi için ise İyonosfer-Bağımsız Kombinasyon sabit seçilip, troposfer modeli olarak Troposfer-Kestirimli ve Saastamoinen modelleri seçilip iki farklı zaman için ayrıca yeni çözümler oluşturulmuştur.

Öncelikle, İyonosfer-Bağımsız Kombinasyonu ve Troposfer-Kestirimli modelleri içeren kış ve yaz dönemine ait PPP-Statik çözümleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra İyonosfer-Kestirimli ve Troposfer-Kestirimli modelleri içeren kış ve yaz dönemine ait PPP-Statik çözümleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak ise İyonosfer-Bağımsız Kombinasyonu ve Saastamoinen modelleri içeren kış ve yaz dönemine ait PPP-Statik çözümleri gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3. AUSPOS ve CSRS-PPP servislerinin bu çalışmadaki verileri değerlendirirken kullandıkları parametreler.

Özellikler:	AUSPOS	CSRS-PPP
Kullanılan Yazılım	Bernese Versiyon 5.2	SPARK v.2
Değerlendirme Metotları	Rölatif-Statik	PPP-Statik/Kinematik
Uydu Sistemleri	GPS	GPS
Gözlem Türleri	Kod&Faz	Kod&Faz
Gözlem Aralığı	30 sn	30 sn
Eğim açısı	7 derece	7.5 derece
Uydu Yörünge ve Saat	IGS Final Precise	IGS Final Precise
Faz Merkezi Değişimleri	IGS (ATX)	IGS (ATX)
İyonosferik Model	L1&L2 (L3) modeli	L1&L2 (L3) modeli
Troposferik Model	DRY-GMF	GPT-GMF
Troposferik Başucu Gecikmesi	Tahmin (Kestirim)	Tahmin (Kestirim)
Taşıyıcı Faz Tam Sayı Belirsizliği	Baza göre integer çözüm	Integer olmayan çözüm
Referans Sistemi	ITRF	ITRF

AUSPOS Rölatif Statik Koordinat Çözümleri

Çalışmanın amacı Antarktika Kıtasında PPP tekniğinin farklı iklim koşullarında, farklı günüşi sürelerinde ve farklı atmosferik modellerle performansının analizi olduğu için, elde edilen PPP koordinatlarının karşılaştırılacağı, bilinen nokta koordinatlarına ihtiyaç bulunmaktadır. Bu nedenle değerlendirmenin son aşamasında web-tabanlı AUSPOS (Australian Online GPS Processing Service) değerlendirme servisi kullanılarak rölatif statik yöntemle noktaların yaz ve kış mevsimindeki günlere ait (bilinen olarak kabul edilecek) koordinatları elde edilmiştir. Verilerin değerlendirilmesi sırasında AUSPOS servisinin kullandığı parametreler Çizelge 3’de verilmektedir.

3.3. Sonuçların Karşılaştırılması

PPP-Statik

CSRS-PPP Statik yöntem ile farklı mevsimler için elde edilen sabit istasyonların koordinatları öncelikle birbirleriyle karşılaştırılmış, yatay konumda (2B) ve yükseklikte mm düzeyinde farklar elde edilmiştir (Çizelge 4). Buradan, PPP-statik ile konumlamada mevsimsel koşulların veya gün ışığı süresinin iki boyutlu konuma ve yükseklik bileşenine etkisinin mm mertebesinde ve anlamsız olduğu söylenebilir.

Çizelge 4. İki istasyon için iki farklı mevsimdeki CSRS-PPP Statik çözüm farkları.

İstasyon İsmi	Δ Sağa (mm)	Δ Yukarı (mm)	Δ 2B (mm)	Δ h (mm)
HUGO	4.0	2.0	4.5	1.0
HOWE	5.0	1.0	5.1	5.0

Diğer yandan CSRS-PPP servisi kullanılarak elde edilen PPP-Statik koordinatları, AUSPOS servisi ile elde edilen noktanın bilinen koordinatlarıyla konum ve yükseklik için ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Elde edilen farklar Çizelge 5’de verilmiştir.

Çizelge 5. CSRS-PPP-Statik ile AUSPOS bilinen (referans) koordinatlar arasındaki farklar.

Mevsim	İstasyon İsmi	Δ Sağa (mm)	Δ Yukarı (mm)	Δ 2B (mm)	Δ h (mm)
KIŞ	HUGO	9.0	2.0	9.2	3.0
	HOWE	0.0	0.0	0.0	15.0
YAZ	HUGO	6.0	1.0	6.1	9.0
	HOWE	1.0	2.0	2.2	6.0

Çizelge 5’de verilen sonuçlara bakıldığında, 24

saatlik PPP-Statik çözümlerin rölatif (bilinen) koordinatlarla milimetre mertebesinde farklara sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuç, PPP-Statik yöntem ile milimetreler mertebesindeki doğruluklarla konumlamanın yapılabileceğini göstermektedir.

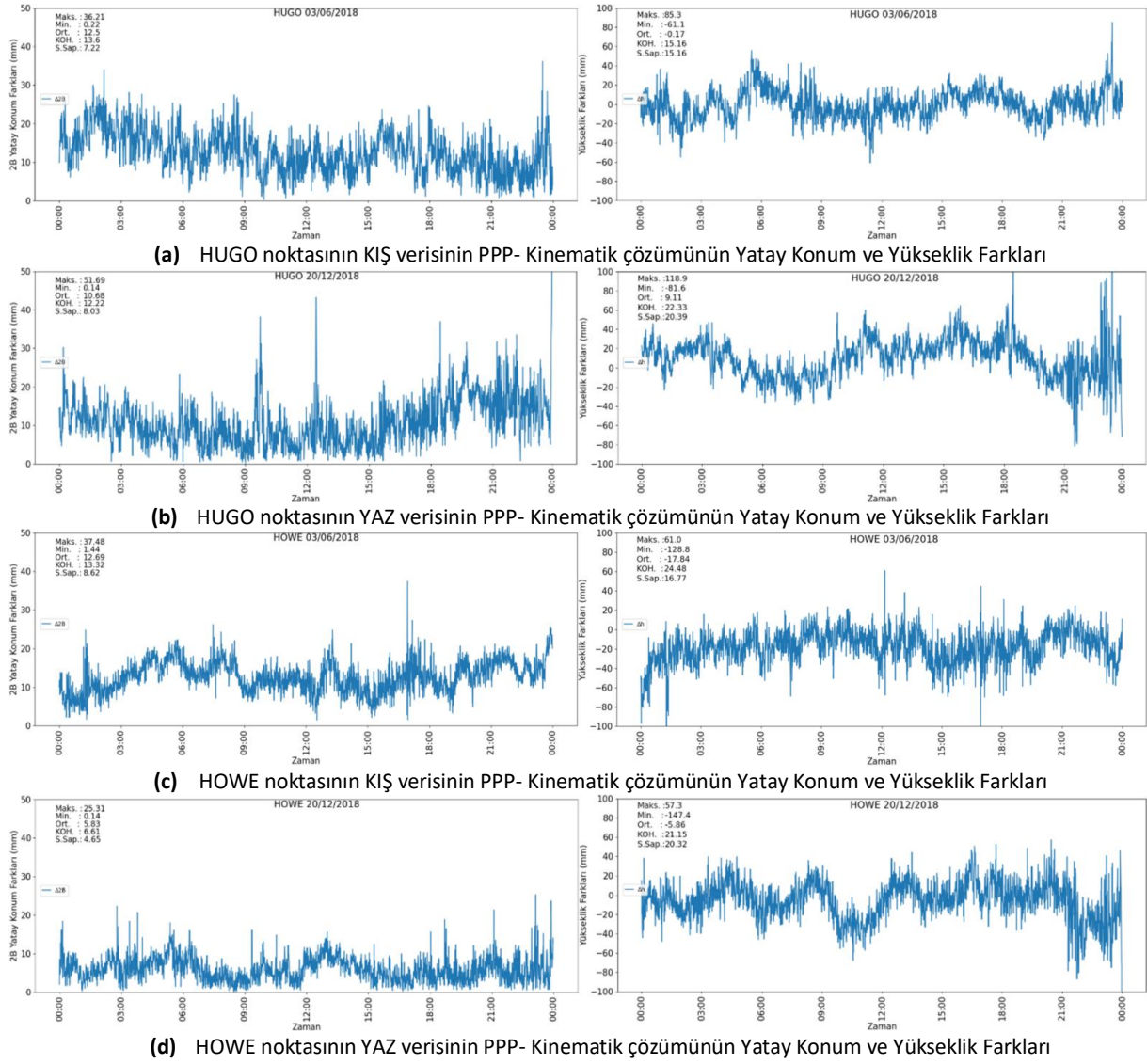
PPP-Kinematik

HUGO ve HOWE istasyonlarının yaz (hep aydınlık) ve kış (hep karanlık) mevsimlerindeki CSRS-PPP Kinematik çözümleri iki boyutlu (2B) konum ve yükseklik bileşeni olarak AUSPOS servisinden elde edilen referans koordinatlarla her bir ölçme epogu için ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, Şekil 5’te ve Çizelge 6’da verilmektedir.

Çizelge 6. HUGO ve HOWE istasyonlarının kış ve yaz verilerinin CSRS-PPP Kinematik çözümlerinin AUSPOS rölatif statik koordinatları ile karşılaştırılması.

İstatistik	Δ Sağa (mm)	Δ Yukarı (mm)	Δ 2B (mm)	Δ h (mm)
HUGO - 03/06/2018 - KIŞ				
Ortalama	9.6	6.3	12.5	-0.2
KOH	± 11.1	± 7.8	± 13.6	± 15.2
HUGO - 20/12/2018 - YAZ				
Ortalama	7.4	6.3	10.7	9.1
KOH	± 8.9	± 8.4	± 12.2	± 22.3
HOWE - 03/06/2018 - KIŞ				
Ortalama	8.3	7.8	12.7	-17.8
KOH	± 9.6	± 9.3	± 13.3	± 24.5
HOWE - 20/12/2018 - YAZ				
Ortalama	3.9	3.6	5.8	-5.9
KOH	± 4.9	± 4.4	± 6.6	± 21.2

Çizelge 6’dan görüldüğü gibi, her iki nokta için, iki mevsimde de elde edilen farklara ait Karesel Ortalama Hata (KOH) değerlerinin ortalaması benzerdir. Bu değerler, yatayda ± 1 cm ve düşeyde ± 2 cm olarak elde edilmiştir. HUGO noktasının yükseklik bileşeninin doğruluğu kış mevsiminde daha yüksektir. Kışın hep karanlık olmasının ve iyonosferik etkinin minimum olmasının bu durumun en önemli sebebi olabileceği değerlendirilmiştir. HOWE noktasının yükseklik ve yatay konum doğruluğu ise kış mevsiminde daha kötüdür. HOWE noktası kutup noktasına oldukça yakın olduğu için yoğun kış koşullarından olumsuz etkilenmiş, bu nedenle kış çözümünün kar yağışı nedeniyle çok-yolluluk (multipath) hatasına maruz kalmış olabileceği değerlendirilmiştir.



Şekil 5. HUGO ve HOWE noktalarının yaz ve kış verilerinin CSRS-PPP-Kinematik çözümlerinin bilinen koordinatlar ile Yatay Konum ve Yükseklik farkları

RTKLIB

HOWE istasyonunun kış ve yaz dönemine ait verilerinin, 'İyonosfer-Bağımsız Kombinasyonu' ve 'Troposfer-Kestirimli' modelleri içeren PPP-Statik çözümleri Rölatif-Statik çözüm ile karşılaştırılmış, elde edilen farklar Çizelge 7a'da verilmiştir. Benzer şekilde, aynı verilerin, 'İyonosfer-Kestirimli' ve 'Troposfer-Kestirimli' modelleri kullanılarak elde edilen çözümleri de Rölatif-Statik çözüm ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen farklar Çizelge 7b'de özet olarak verilmiştir.

Çizelge 7. Farklı Troposfer ve İyonosfer Modelleri yardımıyla HOWE noktasının yaz ve kış verilerinin RTKLIB PPP-Statik Çözümlerinin referans koordinatlarla karşılaştırılması

Mevsim	İstasyon	Δ Sağa (mm)	Δ Yukarı (mm)	Δ ZB (mm)	Δ h (mm)
(a) İyonosfer-Bağımsız ve Troposfer-Kestirimli Çözüm					
KIŞ	HOWE	3.2	6.9	8.2	3.2
YAZ	HOWE	4.1	0.3	4.2	2.2
(b) İyonosfer ve Troposfer Kestirimli Çözüm					
KIŞ	HOWE	11.8	19.5	22.8	150.5
YAZ	HOWE	12.8	17.3	21.5	116.9
(c) İyonosfer Bağımsız ve Saastamoinen Çözüm					
KIŞ	HOWE	30.6	39.9	48.0	735.5
YAZ	HOWE	31.4	6.2	32.1	332.0

Sonuç olarak 'İyonosfer-Bağımsız Kombinasyon' ile 'Troposfer Kestirimli' çözümün hem yaz hem kış için, İyonosfer ve Troposfer Kestirimli çözüme göre, bilinen koordinatlarla daha küçük farklar verdiği görülmüştür.

Çizelge 7a ve 7b'ye göre 'İyonosfer-Bağımsız' çözüm 'İyonosfer-Kestirimli' çözüme göre daha tutarlı olduğu için, 'İyonosfer-Bağımsız' model sabit tutulup 'Saastamoinen Modeli' ile kış ve yaz dönemine ait PPP-Statik çözümleri gerçekleştirilmiş ve Rölatif-Statik çözüm ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen farklar Çizelge 7c'de verilmiştir.

Çizelge 7a ve 7c incelendiğinde, 'Saastamoinen Modelinin' tutarsız sonuçlar verdiği görülmektedir. 'Troposfer-Kestirimli' çözümlerin referans koordinatlardan olan farkları milimetre mertebesinde iken 'Saastamoinen Modeli' kullanılarak elde edilen çözümlerin farklarının yatayda cm ve düşeyde dm mertebesinde olduğu görülmektedir. Buradan hareketle kutup bölgelerinde GPS uydularının belli bir eğim açısının üzerine çıkamaması nedeniyle, GPS verilerinin değerlendirilmesinde 'Troposfer-Kestirim' modelinin kullanılmasının daha iyi sonuçlar vereceği söylenebilmektedir. Çizelge 7a incelendiğinde, iki farklı mevsimdeki HOWE istasyon koordinatlarının referans koordinatlara göre yatayda ve yükseklikte milimetre mertebesinde farklar verdiği görülmektedir. Bununla birlikte, Çizelge 7a (İyonosfer-Bağımsız ve Troposfer-Kestirimli) çözümüne göre, HOWE istasyonunun farklı mevsimdeki RTKLIB-PPP Statik çözümleri arasındaki fark, aynı istasyonun Çizelge 4'te verilen CSRS-PPP Statik çözümündeki farklara benzer olarak, yatay konumda 4 mm, yükseklikte ise 5 mm elde edilmiştir.

AUSPOS

Her iki istasyonun için, AUSPOS servisinden elde edilen iki farklı zamandaki Rölatif Statik koordinatlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen farklar, Çizelge 8'de verilmiştir.

Çizelge 8. İki istasyon için iki farklı mevsimdeki AUSPOS çözümleri arasındaki koordinat farkları

İstasyon İsmi	Δ Sağa (mm)	Δ Yukarı (mm)	Δ 2B (mm)	Δ h (mm)
HUGO	1.0	1.0	1.4	3.0
HOWE	4.0	1.0	4.1	5.0

Çizelge 8'den anlaşılacağı üzere HUGO istasyonu için mevsimsel çözümler arasındaki koordinat değişimi HOWE istasyonuna göre daha azdır. Fakat genel olarak mutlak konumlandırmaya benzer olarak rölatif konumlandırmada da mevsimsel farklar yatay konumda ve yükseklikte milimetre mertebesinde olup anlamlı değildir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada oldukça zorlu atmosferik ve topografik koşullara sahip, özellikle GPS uydularının kısıtlı ve ancak düşük eğimlerde gözlemlenebildiği Antarktika Kıtasında PPP yönteminin kullanılabilirliği ve doğruluk performansı araştırılmıştır. Bu kapsamda birisi Güney Kutup noktasına oldukça yakın, diğer de yine aynı kıtada yer alan iki adet sabit GPS istasyonunun iki farklı mevsimdeki verisi kullanılmıştır.

Çalışmadan elde edilen sonuçlardan, 24 saatlik veri setlerinin online değerlendirme servisi olan CSRS-PPP ile yapılan PPP-Statik çözümlerinin, referans koordinatlardan 2B konum bileşeni için mm, yükseklik içinse en fazla 1.5 cm mertebesindeki farklara ulaştığı görülmüştür. Aynı verilerin epok-epok kinematik olarak yapılan değerlendirmesi sonucunda ise, 2B konum bileşeni için ortalama 12.7 mm, yükseklik için de ortalama 17.8 mm'lik farklar ve sırasıyla ortalama ± 1 cm ve ± 2 cm Karesel Ortalama Hata değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, web-tabanlı online GNSS değerlendirme servisleri kullanılarak, Antarktika Kıtasında PPP tekniği ile klasik rölatif yöntem alternatif olacak doğruluklarla (cm-mm mertebesinde) konum belirlenebileceğini göstermiştir. Hiç şüphesiz temel düzeyde GNSS bilgisi gerektiren online değerlendirme servislerinin en büyük avantajı kullanıcıların sadece internet bağlantısına sahip bir bilgisayara ve e-posta adresine sahip olmaları olsa da, elde edilen sonuçların oldukça dikkatli bir şekilde analiz edilmesi ve

yorumlanması gerekmektedir. Zira bu tür servisler alanındaki en profesyonel bilimsel/akademik GNSS değerlendirme yazılımlarını, literatürde genel kabul gören seçenekleri uygulayarak kullanmakta, kullanıcılarına çoğunlukla değerlendirme seçeneği sunmamakta veya oldukça kısıtlı bir şekilde sunmaktadır. Bu durum özellikle çalışmamızın yapıldığı Antarktika gibi atmosferin modellenmesinin çok daha kritik olduğu koşullarda daha önemli hale gelebilmektedir. Bu tür durumlar için açık kaynak kodlu pek çok akademik yazılımda mevcuttur. Bu çalışmada bunlardan birisi olan RTKLIB yazılımı kullanılmıştır. Söz konusu yazılım ile yapılan değerlendirmeler sonucunda, elde edilen PPP koordinatlarının doğruluğunun, değerlendirmede kullanılan parametrelerin seçimine, özellikle de iyonosfer ve troposfer modellerine yakından bağlı olduğu görülmüştür. RTKLIB yazılımı kullanılarak İyonosfer-Bağımsız ve Troposfer-Kestirimli PPP-Statik çözümü ile güney kutup noktasına yakın olan HOWE istasyonu için, CSRS-PPP çözümüne benzer olarak, yaz ve kış ayları için yatayda ve yükseklikte mm mertebesinde mutlak konum elde edilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan UNAVCO UKANET ve ANET ağlarına ait HUGO ve HOWE istasyonları sadece GPS uydularını izleyebilmektedir. Bu sebepten bu çalışma sadece GPS sisteminin Antarktika Kıtasındaki PPP performansına ait sonuçlarını vermektedir. Çalışmanın bir sonraki adımında GPS sistemiyle beraber GLONASS uydu sistemini de izleyebilen sürekli gözleme istasyonları seçilip, GLONASS sisteminin kutup bölgesinde PPP performansına katkısı irdelenecektir. GLONASS uyduları ekvatorla yaklaşık 65° eğim açısı yaptıkları için kutup bölgelerinde daha yüksek eğimlere ulaşabilmektedirler. Bu durumda GLONASS uydularının bu bölgelerde PPP performansını arttıracakları düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu makalenin yazarları, ANET ve UKANET ağı istasyon verileri için UNAVCO'ya, RTKLIB yazılımı için Tomoji Takasu'ya ve ayrıca AUSPOS, CSRS-PPP çevrimiçi GNSS veri değerlendirme servislerine teşekkür ederler.

5. Kaynaklar

- Alkan, R.M., Erol, S., İlçi, V., and Ozulu, I.M. (2020). Comparative Analysis of Real-time Kinematic and PPP techniques in Dynamic Environment. *Measurement*, Volume **163**, No. 107995; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107995>
- Alkan, R.M. ve Erol, S. (2019). Hassas Nokta Konumlama Yöntemi'nin Antarktika'da Kullanılabilirliği Üzerine Bir Araştırma. 3. Ulusal Kutup Bilimleri Çalıştayı, Ankara-Türkiye, 5 Eylül 2019, 37-38.
- Anderle, R.J. (1976). Satellite Doppler Positioning. International Geodetic Symposium, A77-47370 22-43, Las Cruces-New Mexico-ABD, 12-14 Ekim 1976, 47-75.
- Beziçioğlu, M., Yigit, C.Ö. and Bodur, M. (2019). Kinematik PPP-AR ve Geleneksel PPP Yöntemlerinin Performanslarının Değerlendirilmesi: Antarktika Yarımadası Örneği. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **19**(1), 162-169; <https://doi.org/10.35414/akufemubid.467336>.
- Bahadur, B., Üstün, A. (2014). İnternet Tabanlı GNSS Veri Değerlendirme Servisleri. *Harita Dergisi*, **152**, 40-50.
- Choy, S., Bisnath, S., and Rizos, C. (2017). Uncovering Common Misconceptions in GNSS Precise Point Positioning and its Future Prospect. *GPS Solution*, **21**(1), 13-22; <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0545-x>
- DeSanto, J.B., Chadwell, C.D., and Sandwell, D.T. (2019). Kinematic Post-Processing of Ship Navigation Data Using Precise Point Positioning. *Journal of Navigation*, **72**(3), 795-804; <https://doi.org/10.1017/S0373463318000887>
- Donahue, B., Hassen, E., and Banville, S. (2018). CSRS-PPP Transitioning to a Modernized Positioning Service in Canada. Canadian Geodetic Survey, Natural Resources Canada. ACLS Webinar, June 13, 2018. Available at: <http://www.acls-aatc.ca/wp-content/uploads/2018/06/CSRS-PPP-Transition-Plan-2018-ACLS-webinar.pptx> [15.06.2020].

- Gao, Y. (2015). Precise Point Positioning (PPP). In: Grafarend E. (eds) Encyclopedia of Geodesy. Springer, https://doi.org/10.1007/978-3-319-02370-0_13-1
- Huang, Z. and Roussel-Dupré R. (2005). Total Electron Content (TEC) Variability at Los Alamos, New Mexico: A Comparative Study: FORTE-derived TEC Analysis, Radio Science, **40**(6), RS6007, <https://doi.org/10.1029/2004RS003202>
- Kouba, J. and Héroux , P. (2001). GPS Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. *GPS Solutions*, **5**(2), 12-28; <https://doi.org/10.1007/PL00012883>
- Krasuski, K., Cwiklak, J., Jaferník, H. (2018). Aircraft Positioning Using PPP Method in GLONASS System. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, **90**(9), 1413–1420; <https://doi.org/10.1108/AEAT-06-2017-0147>
- Li, B., Ge, H., Ge, M., Nie, L., Shen, Y., and Schuh, H. (2019). LEO Enhanced Global Navigation Satellite System (LeGNSS) for Real-time Precise Positioning Services. *Advances in Space Research*, **63**(1), 73-93; <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.08.017>
- Yuan, L. L., Anthes, R. A., Ware, R. H., Rocken, C., Bonner, W. D., Bevis, M. G., and Businger, S. (1993). Sensing Climate Change Using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **98**(D8), 14925-14937; <https://doi.org/10.1029/93JD00948>
- 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>
- İnternet kaynakları**
- 1- Australian Antarctic Division, About Antarctica. <http://www.antarctica.gov.au/about-antarctica> (15.06.2020).
- 2- Natural Resources Canada, Precise Point Positioning. <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php> (15.06.2020).
- 3- AUSPOS - Online GPS Processing Service. <http://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/auspos> (15.06.2020).
- 4- RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning. <http://www.rtklib.com/> (15.06.2020)