

Türkiye ve Yakın Çevresi İçin Çoklu-GNSS Kombinasyonlarının PPP Performansına Etkisi

(The Impact of Multi-GNSS Combinations on PPP Performance for Turkey and Its Surroundings)

Berkay BAHADUR, Metin NOHUTCU

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

ÖZ

Hassas Nokta Konumlama (PPP), uygulama kolaylığı, düşük maliyeti ve referans istasyon ihtiyacını ortadan kaldırması gibi faydalarından dolayı son on yıldır Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (GNSS) kullanıcıları arasında ilgi çekici bir konu olmuştur. Ancak yüksek konum doğruluğuna ulaşmak için gerekli yakınsama süresi hala PPP yönteminin en büyük dezavantajıdır. Son yıllarda, GLONASS uydu takımının tamamlanması ve Galileo, BeiDou gibi yeni navigasyon sistemlerinin ortaya çıkması PPP performansını iyileştirmek ve yakınsama süresinin azaltılması için önemli fırsatlar sunmaktadır. Birden fazla navigasyon sisteminin ortak kullanımı (çoklu-GNSS) konum, zaman ve navigasyon uygulamaları için ilave uydu kaynağı ve yeni frekanslar sunmaktadır. Bu sayede çoklu-GNSS, PPP için görünür uyduların sayı ve geometrisinin iyileşmesini sağlar. Bu çalışmanın amacı Türkiye ve yakın çevresi için çoklu-GNSS kombinasyonlarının PPP performansına olan etkisini değerlendirmektir. Bu amaçla, 5-11 Kasım 2017 tarihleri arasında bir hafta boyunca Türkiye ve yakın çevresinde bulunan dört IGS istasyonunda toplanan günlük gözlem dosyaları dokuz farklı PPP senaryosu altında yazarlar tarafından geliştirilen PPP yazılımında işlenmiştir. Sonuçlar, yalnızca GPS gözlemlerini kullanan standart PPP çözümü ile kıyaslandığında çoklu-GNSS kombinasyonlarının PPP performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Hassas Nokta Konumlama, Çoklu-GNSS, PPP, MGEX, PPPH.

ABSTRACT

In the last decade, Precise Point Positioning (PPP) has been a popular topic within the Global Navigation Satellite System (GNSS) community because of its benefits such as operational simplicity, cost-effectiveness and elimination of base station requirement. Nevertheless, relatively long convergence time which is required to achieve high positioning accuracy is still the main restriction of PPP. In recent years, the completion of GLONASS constellation and emergence of new satellite systems, such as Galileo and BeiDou have offered significant prospect to improve the PPP performance and to shorten the convergence time. The integration of navigation systems (Multi-GNSS) offers additional satellite resources and new frequencies for positioning, timing, and navigation applications. By this means, multi-GNSS provides improvement for number and geometry of visible satellites for PPP. The aim of this study is to evaluate

the impact of multi-GNSS combinations on PPP performance for Turkey and its surroundings. For this purpose, 24h observation data sets collected at four IGS stations located at Turkey and its surroundings during the week between 5-11 November 2017 were processed under nine different PPP scenarios using PPPH software which is developed by the authors. The results show that the combinations of multi-GNSS have significantly improved PPP performance compared with the standard PPP solution which utilizes GPS observations only.

Keywords: Precise Point Positioning, Multi-GNSS, PPP, MGEX, PPPH.

1. GİRİŞ

Uzun bir süredir yüksek doğruluk gerektiren Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (GNSS) uygulamalarında diferansiyel ve/veya rölatif konum belirleme teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tekniklerde koordinatı bilinen referans istasyonlar sayesinde GNSS hata kaynaklarının büyük bir kısmı ortadan kaldırılır ve böylece yüksek konum doğruluğuna sahip çözümler üretilir. Doğal olarak diferansiyel ve/veya rölatif konum belirleme tekniklerinde en az iki GNSS alıcısına ihtiyaç duyulur. Bu durum mutlak konumlamaya kıyasla işlem maliyetini ve uygulama zorluğunu artırır. Diğer taraftan bu tekniklerde elde edilecek konum doğruluğu ile referans istasyondan olan mesafe yakından ilişkilidir, yani referans istasyondan uzaklaştıkça değişen çevre ve atmosferik koşullar konum doğruluğunu düşürür (Rizos vd., 2012). Son yıllarda bu tekniklere bir alternatif olarak Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning - PPP) ön plana çıkmıştır. PPP küresel ölçekte yalnızca tek bir GNSS alıcısı ile santimetre veya milimetre seviyesinde doğruluk sağlayabilen bir konum belirleme tekniğidir. PPP'nin en temel özelliği küresel bir ağdan elde edilmiş hassas uydu yörünge ve saat ürünlerini kullanarak uydu kaynaklı yörünge ve saat hatalarını çok önemli ölçüde azaltmasıdır. Bu sayede PPP tekniğiyle herhangi bir referans noktaya ihtiyaç duymadan yüksek konum doğruluğu elde edilebilir (Zumberge, vd., 1997; Kouba ve Heroux, 2001).

PPP tekniği, referans istasyon ihtiyacını ortadan kaldırması, işlem maliyetini düşürmesi ve uygulamada getirdiği kolaylıklar sebebiyle son on yıldır GNSS kullanıcıları arasında oldukça ilgi çekici bir konu olmuştur. Günümüzde PPP, atmosferin izlenmesi ve modellenmesi, yer kaynaklı tehlikelerin belirlenmesi, yapı sağlığının izlenmesi, havai nirengi uygulamaları vb. birçok GNSS uygulamasında kullanılmaktadır (Tu, vd., 2013; Lu, vd., 2015; Wright, vd., 2012; Li, vd., 2013; Yiğit ve Gürlek, 2017; Yuan, vd., 2009). Ancak santimetre veya daha iyi konum doğruluğuna ulaşabilmek için gerekli yakınsama süresi hala PPP'nin en büyük dezavantajıdır. Genel olarak, PPP tekniğinde 5 cm veya daha iyi yatay konum doğruluğuna ulaşabilmek için en azından 1 saat gözlem yapılmış olması gerekir (Choy, vd., 2017). Diğer tekniklere kıyasla uzun yakınsama süresi PPP tekniğinin daha geniş uygulama alanlarına ulaşmasında önemli bir engel teşkil etmektedir. Çevre koşulları ve alıcının coğrafi konumunun yanı sıra yakınsama süresini belirleyen en önemli etken görünür uyduların sayısı ve geometrisidir. Bu nedenle görünür uydu sayısının ve geometrisinin iyileştirilmesi yakınsama süresini olumlu yönde etkileyecektir.

Son zamanlarda GLONASS'ın tam kapasite ile faaliyete geçmesinin yanında Galileo ve BeiDou gibi yeni uydu sistemlerinin ortaya çıkması PPP açısından ilave uydu kaynağı ve yeni frekanslar sağlamıştır. GPS'e ek olarak diğer uydu sistemlerinin PPP çözümüne dâhil edilmesi görünür uydu sayısını arttırdığı gibi uydu geometrisini de ciddi anlamda güçlendirmektedir. Bu nedenle birden fazla sistemin ortak olarak kullanıldığı çözümler (çoklu-GNSS) PPP performansını konum doğruluğu ve yakınsama süresi açısından iyileştirmek için önemli fırsatlar sunmaktadır. Bu konuda yapılan ilk çalışmalar çoklu-GNSS çözümlerinin PPP performansını özellikle yakınsama süresi bakımından önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymuştur (Cai ve Gao, 2013; Yiğit, vd., 2014; Li ve Zhang, 2014, Togedor, vd., 2014). GPS ve GLONASS gibi mevcut uydu sistemlerinin modernizasyonuna yönelik çalışmalar ve gelişmekte olan diğer uydu sistemlerinin yakın zamanda tam kapasite ile faaliyete geçeceği düşünüldüğünde çoklu-GNSS gelecekte önemli bir araştırma konusu olmaya devam edecektir.

Bilindiği üzere PPP tekniğinin temel gücü yayın efemerisi yerine küresel bir ağdan elde edilmiş yüksek doğruluğa sahip uydu yörünge ve saat ürünlerinin kullanılmasındır. Çoklu-GNSS kombinasyonlarını PPP çözümüne uygulayabilmek için GPS'e ek olarak diğer

sistemlerin de uydu yörünge ve saat bilgilerini içeren hassas ürünlere ihtiyaç vardır. IGS (International GNSS Service) 2011 yılında var olan tüm GNSS uydularını gözlemlemek, bunlardan veri toplamak ve değerlendirmek için MGEX (Multi-GNSS Experiment) çalışmasını başlatmıştır. Bu proje kapsamında sadece GPS yörünge ve saat bilgilerini içeren standart IGS ürünlerinin yanında diğer navigasyon sistemlerine ait bilgileri de içeren IGS-MGEX ürünleri kullanıcılara sunulmuştur. Bu ürünler aynı yersel referans ve zaman sistemine sahip olduğu için herhangi bir dönüşüme gerek kalmadan çoklu-GNSS PPP çözümünü gerçekleştirme imkânı sağlamıştır (Montenbruck, vd., 2017).

Çoklu-GNSS kombinasyonları PPP performansının iyileştirilmesi açısından önemli fırsatlar sunmakla birlikte sadece GPS gözlemlerini içeren standart PPP çözümüne göre daha karmaşık model ve algoritmalar gerektirir. Bu nedenle çoklu-GNSS PPP çözümünü gerçekleştirmek için özel GNSS veri analiz ve değerlendirme yazılımına ihtiyaç vardır. Geleneksel olarak Bernese, GAMIT/GLOBK ve GIPSY/OASIS gibi yazılımlar GNSS kullanıcıları tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yazılımlar içerdikleri birçok GNSS fonksiyonunun yanında PPP çözümü de gerçekleştirebilir. Bu yazılımların bir kısmı ücretsiz olarak elde edilebilir fakat bazıları araştırma amaçlı kullanımlarda dahi ücret talep etmektedir. Ayrıca, bazı durumlarda karmaşık yapıları nedeniyle standart bir kullanıcı için bu yazılımları kullanmak oldukça zorlayıcı olabilir. Öte yandan son yıllarda bazı üniversite ve araştırma enstitüleri tarafından internet aracılığıyla PPP çözümü gerçekleştiren servisler (APPS, GAPS, CSRS-PPP, Magic-PPP, vb.) geliştirilmiştir (Guo, 2015). Bu servisler standart PPP çözümü için sıklıkla kullanılmasına rağmen çok azı çoklu-GNSS verisi işleme yeteneğine sahiptir. Tüm bunlar göz önüne alınarak yazarlar tarafından çoklu-GNSS PPP çözümünü gerçekleştirmek için PPPH adında MATLAB tabanlı bir yazılım geliştirilmiştir. PPPH yazılımı GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou verilerini işleyebilmekte ve bu sistemleri içeren farklı çoklu-GNSS PPP çözümlerini gerçekleştirebilmektedir (Bahadur, 2017).

Ülkemiz açısından değerlendirildiğinde çoklu-GNSS PPP oldukça yeni sayılabilecek ve üzerinde araştırma yapılması gereken bir konudur. Bu kapsamda yazarlar tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada IGS ağında yer alan ANKR ve ISTA istasyonlarına ait gözlem verileri üç farklı PPP senaryosu (GPS, GPS/GLONASS ve GPS/GLONASS/Galileo/

BeiDou) altında işlenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar birden çok navigasyon sisteminin dâhil edildiği çözümlerin PPP performansını iyileştirdiğini göstermiştir (Bahadur ve Nohutcu, 2017). İlk sonuçlar umut verici olsa da çalışmanın dar kapsamı nedeniyle Türkiye’de çoklu-GNSS PPP performansının farklı kombinasyonlar açısından kapsamlı bir şekilde irdelenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada Türkiye ve yakın çevresi için çoklu-GNSS kombinasyonlarının PPP performansına olan etkisinin detaylı bir biçimde araştırılması hedeflenmektedir. Bu amaçla öncelikle IGS-MGEX projesinin içeriği ve bu proje kapsamında üretilen hassas ürünler hakkında bilgi verilecektir. Ardından çoklu-GNSS modeli ve içerdiği matematiksel eşitlikler ortaya konacaktır. Daha sonra Türkiye ve yakın çevresinde yer alan dört istasyonun verileri kullanılarak dokuz farklı PPP senaryosu altında çoklu-GNSS kombinasyonlarının PPP performansına olan etkisini araştırmak için gerçekleştirilen uygulama ve elde edilen sonuçlar sunulacaktır. Son olarak bu çalışmadan elde edilen çıkarımlar ve gelecek çalışmalar için öneriler verilecektir.

2. IGS MGEX PROJESİ

IGS birçok üniversite, araştırma enstitüsü, jeodezi ve uzay ajansının katkı sunduğu ve yüksek kalitede GNSS verisini ücretsiz olarak kullanıma açmayı amaçlayan gönüllü bir organizasyondur.

Dünya geneline yayılmış 500’ün üzerinde istasyondan oluşan ağı sayesinde IGS, GNSS uydularını gözlemleyerek, topladığı verileri ve oluşturduğu hassas ürünleri sürekli olarak kullanıcılara sunmaktadır (<http://www.igs.org/>). Başlangıçta sadece GPS özelinde yürütülen IGS çalışmaları daha sonraları GLONASS’ı da kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Günümüzde ise ülkelerin kendi bağımsız navigasyon sistemlerine sahip olma konusunda artan isteği yeni küresel ve bölgesel navigasyon sistemlerinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. GPS ve GLONASS’ın yanı sıra Avrupa Birliği tarafından geliştirilen Galileo, Çin’in ürettiği BeiDou, Japonya’nın yürüttüğü QZSS ve Hindistan’ın geliştirdiği IRNSS yakın gelecekte tam olarak faaliyete geçecektir. Mevcut navigasyon sistemlerinin uydu tipleri, sinyal çeşitleri ve uydu sayıları Tablo 1’de sunulmaktadır. Gerek bu yeni sistemler gerekse GPS ve GLONASS’a ait modernizasyon planları düşünüldüğünde uydu navigasyonu için yeni bir dönemin başladığı söylenebilir. Ortaya çıkan yeni uydular ve navigasyon sinyalleri GNSS uygulamalarını ileriye götürmek açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Bu doğrultuda IGS mevcut navigasyon sistemlerinden en iyi şekilde yararlanmak ve GNSS kullanıcılarını geleceğe hazırlamak için 2011 yılında MGEX (Multi-GNSS Experiment) projesini başlatmıştır.

Tablo 1. Navigasyon sistemlerinin mevcut durumu (Montenbruck, vd., 2017).

SİSTEM	UYDU TİPİ	SİNYAL	UYDU SAYISI
GPS	IIR	L1 C/A, L1/L2 P(Y)	12
	IIR-M	L1 C/A, L1/L2 P(Y), L2C, L1/L2 M	7
	IIF	L1 C/A, L1/L2 P(Y), L2C, L1/L2 M, L5	12
GLONASS	M	L1/L2 C/A & P	23
	M+	L1/L2 C/A & P, L3	1
	K	L1/L2 C/A & P, L3	1
BeiDou	GEO	B1-2, B2, B3	5
	IGSO	B1-2, B2, B3	8
	MEO	B1-2, B2, B3	7
Galileo	IOV	E1, E6, E5a/b/ab	4
	FOC	E1, E6, E5a/b/ab	6
QZSS	IGSO	L1 C/A, L1C, L1SAIF, L2C, L6 LEX, L5	1
IRNSS	IGSO	L5/S SPS & RS	4
	GEO	L5/S SPS & RS	3

MGEX projesi kapsamında öncelikle var olan tüm GNSS uydularını gözlemlemek, veri toplamak ve değerlendirmek için mevcut IGS ağından faydalanarak yeni bir çoklu-GNSS ağı kurulmuştur. İlk başta 40 istasyondan oluşan çoklu-GNSS ağı günümüzde mevcut tüm IGS istasyonlarının neredeyse üçte birini oluşturmaktadır (Montenbruck, vd., 2017). Bu ağdan toplanan veriler kullanılarak GPS ve GLONASS'ın yanında BeiDou, Galileo ve QZSS uydularına ait uydu yörünge ve saat bilgilerini de içeren hassas ürünler oluşturulmuş ve kullanıcılara sunulmuştur. Bu ürünler sayesinde çoklu-GNSS kombinasyonlarını PPP çözümüne uygulamak mümkün olmuştur. Düzenli olarak çoklu-GNSS ürünleri sağlayan altı IGS analiz merkezi aşağıda sıralanmıştır.

- CNES/CLS (Centre National d'Etudes Spatiales and Collecte Localisation Satellites)
- CODE (Center for Orbit Determination in Europe)
- GFZ (Deutsches GeoForschungsZentrum)
- TUM (Technische Universität München)
- WU (Wuhan University)
- JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)

MGEX analiz merkezleri tarafından sunulan hassas ürünlere ait IGS tarafından kabul edilen kısaltmalar, yörünge ve saat bilgilerinin zaman aralıkları ve ilgili ürünlerin içerdiği uydu sistemleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. MGEX ürünlerine genel bakış.

Analiz merkezi	Kısaltma	Yörünge	Saat	Sistem
CNES/CLS	grm	15 dk	30 s	GRE
CODE	com	15 dk	5 dk	GRECJ
GFZ	gfm, gfb	15/5 dk	30 s	GRECJ
TUM	tum	5 dk	5 dk	EJ
WU	wum	15 dk	5 dk	GRECJ
JAXA	qzf, jaxa	5 dk	5 dk	GRJ

G:GPS, R:GLONASS, E:Galileo, C:BeiDou, J:QZSS

3. ÇOKLU-GNSS MODELİ

Navigasyon sistemleri arasındaki referans tanımı, zaman sistemi ve sinyal yapısı farklılıkları çoklu-GNSS PPP modelinde dikkate alınmalıdır.

Genellikle, sistemlerin birlikte çalışmasını sağlamak için koordinat ve zaman sistemi dönüşümleri gerçekleştirilir. Ancak, IGS gibi aynı referans ve zaman sisteminde oluşturulan hassas ürünler kullanıldığında referans ve zaman sistemi farklılıkları ortadan kalktığı için bu dönüşümlere gerek kalmaz. Yine de, donanım-kaynaklı hataların ve GLONASS uyduları arasındaki frekanslar-arası hataların göz önünde bulundurulması gereklidir (Cai ve Gao, 2013). Çoklu-GNSS PPP modeli için kod ve faz gözlem eşitlikleri şu şekilde yazılabilir:

$$P_{i,r}^{s,j} = \rho_r^{s,j} + cdt_r^s - cdT^{s,j} + T_r^{s,j} + I_i^{s,j} + b_{i,r}^s - b_i^{s,j} + \varepsilon(P_{i,r}^{s,j}) \quad (1)$$

$$L_{i,r}^{s,j} = \rho_r^{s,j} + cdt_r^s - cdT^{s,j} + T_r^{s,j} - I_i^{s,j} + \lambda_i^s N_i^{s,j} + B_{i,r}^s - B_i^{s,j} + \varepsilon(L_{i,r}^{s,j}). \quad (2)$$

Burada r ve i sırasıyla alıcı ve sinyalin frekans indeksini, s ve j ise GNSS indeksini (G:GPS, R:GLONASS, E:Galileo ve C:BeiDou) ve uydu numarasını gösterir. Ayrıca, $P_{i,r}^{s,j}$ kod gözlemi, $L_{i,r}^{s,j}$ faz gözlemi, $\rho_r^{s,j}$ geometrik mesafeyi, c ışık hızını, cdt_r^s alıcı saat hatasını, $cdT^{s,j}$ uydu saat hatasını, $T_r^{s,j}$ troposferik gecikmeyi, $I_i^{s,j}$ ilgili frekanstaki iyonosferik gecikmeyi, $b_{i,r}^s$ ilgili frekanstaki alıcı donanım-kaynaklı kod hatasını, $b_i^{s,j}$ ilgili frekanstaki uydu donanım-kaynaklı kod hatasını, $N_i^{s,j}$ tam sayı belirsizliğini, λ_i^s ilgili frekansın dalga boyunu, $B_{i,r}^s$ ilgili frekanstaki alıcı donanım-kaynaklı faz hatasını, $B_i^{s,j}$ ilgili frekanstaki uydu donanım-kaynaklı faz hatasını ve ε gürültüyü ifade eder.

IGS analiz merkezlerince üretilen uydu saat düzeltmeleri donanım-kaynaklı kod hatalarını da içerir. Bu nedenle uydu donanım-kaynaklı kod hatası uydu saat hatasına yüklenir ve hassas ürünler ile düzeltilir. Donanım-kaynaklı faz hatası ise yüksek konum doğruluğu gerektirmeyen durumlarda göz ardı edilebilir ya da belirsizlikler çözülmeyecekse tam sayı belirsizliği parametresine yüklenebilir. İkinci seçenekte belirsizlik parametresi tam sayı özelliğini kaybeder (Defraigne ve Baire, 2011). Yukarıdaki eşitlikler buna göre düzenlenirse

$$P_{i,r}^{s,j} = \rho_r^{s,j} + \widetilde{cdt}_r^s - \widetilde{cdT}^{s,j} + T_r^{s,j} + I_i^{s,j} + \varepsilon(P_{i,r}^{s,j}) \quad (3)$$

$$L_{i,r}^{s,j} = \rho_r^{s,j} + \widetilde{cdt}_r^s - \widetilde{cdT}^{s,j} + T_r^{s,j} - I_i^{s,j} + \lambda_i^s \widetilde{N}_i^{s,j} + \varepsilon(L_{i,r}^{s,j}) \quad (4)$$

eşitlikleri elde edilir. Burada \widetilde{cdt}_r^s , $\widetilde{cdT}^{s,j}$ ve $\widetilde{N}_i^{s,j}$ sırasıyla düzenlenmiş alıcı saat hatasını, uydu saat hatasını ve tam sayı belirsizliği parametresini temsil eder. Bu parametreler aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\widetilde{cdt}_r^s = (cdt_r^s + b_{i,r}^s) \quad (5)$$

$$\widetilde{cdT}^{s,j} = (cdT^{s,j} + b_i^{s,j}) \quad (6)$$

$$\widetilde{N}_i^{s,j} = N_i^{s,j} + (B_{i,r}^s - b_{i,r}^s) - (B_i^{s,j} - b_i^{s,j}) \quad (7)$$

GLONASS diğer sistemlerden farklı olarak her bir uydunun farklı frekans kanalına sahip olduğu FDMA (Frequency Multiple Division Access) yapısını kullanır (Wanninger, 2011). Dolayısıyla, GLONASS gözlemlerinde uydu tabanlı frekanslar arası hatalar (IFBs) bulunur ve bu hatalar bir ortalama terim ile frekansa bağlı terimin toplamı şeklinde ifade edilebilir.

$$b_{i,r}^R = b_{avg,r}^R + \delta b_{i,r}^R, \quad (8)$$

$$B_{i,r}^R = B_{avg,r}^R + \delta B_{i,r}^R$$

Burada $b_{avg,r}^R$ ve $B_{avg,r}^R$ sırasıyla alıcı donanım-kaynaklı kod ve faz hatası için ortalama terimleri $\delta b_{i,r}^R$ ve $\delta B_{i,r}^R$ ise frekansa bağlı terimleri ifade eder. Buna göre GLONASS uyduları için düzenlenmiş alıcı saat hatası ve belirsizlik parametreleri şu şekilde oluşur:

$$\widetilde{cdt}_r^R = (cdt_r^R + b_{avg,r}^R) \quad (9)$$

$$\widetilde{N}_i^{R,j} = N_i^{R,j} + (B_{avg,r}^R + \delta B_{i,r}^R - b_{avg,r}^R) - (B_i^{R,j} - b_i^{R,j}) \quad (10)$$

GLONASS uyduları için faz gözlemlerinde bulunan IFB ($\delta B_{i,r}^R$) terimleri belirsizlik parametresine yüklenirken kod gözlemlerinde IFB terimleri ($\delta b_{i,r}^R$) bilinmeyen olarak kalır. Kod gözlemlerinde bulunan IFB terimleri ayrı ayrı kestirilebilir ancak bu durum bilinmeyen sayısını arttıracığı ve dolayısıyla modeli zayıflatacağı için tercih edilen bir yol değildir. Bunun yerine parametre kestirimi aşamasında GLONASS kod gözlemlerine faz gözlemlerine kıyasla daha düşük bir ağırlık atanır. Bu sayede IFB terimleri göz ardı edilmiş olur ve etkisi parametre kestirimi sonrası GLONASS kod gözlemlerine ait düzeltmelerde görünür (Cai ve Gao, 2013).

Uydu yörünge ve saat hatalarını gidermek için hassas ürünler uygulandıktan sonra GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou için kod ve faz gözlemlerinin iyonosferden bağımsız gözlem eşitlikleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$P_{IF,r}^{G,j} = \rho_r^{G,j} + \widetilde{cdt}_r^G + T_r^{G,j} + \varepsilon(P_{IF,r}^{G,j}) \quad (11)$$

$$L_{IF,r}^{G,j} = \rho_r^{G,j} + \widetilde{cdt}_r^G + T_r^{G,j} + \lambda_{IF}^G \widetilde{N}_{IF}^{G,j} + \varepsilon(L_{IF,r}^{G,j}) \quad (12)$$

$$P_{IF,r}^{R,j} = \rho_r^{R,j} + \widetilde{cdt}_r^R + T_r^{R,j} + \varepsilon(P_{IF,r}^{R,j}) \quad (13)$$

$$L_{IF,r}^{R,j} = \rho_r^{R,j} + \widetilde{cdt}_r^R + T_r^{R,j} + \lambda_{IF}^R \widetilde{N}_{IF}^{R,j} + \varepsilon(L_{IF,r}^{R,j}) \quad (14)$$

$$P_{IF,r}^{E,j} = \rho_r^{E,j} + \widetilde{cdt}_r^E + T_r^{E,j} + \varepsilon(P_{IF,r}^{E,j}) \quad (15)$$

$$L_{IF,r}^{E,j} = \rho_r^{E,j} + \widetilde{cdt}_r^E + T_r^{E,j} + \lambda_{IF}^E \widetilde{N}_{IF}^{E,j} + \varepsilon(L_{IF,r}^{E,j}) \quad (16)$$

$$P_{IF,r}^{C,j} = \rho_r^{C,j} + \widetilde{cdt}_r^C + T_r^{C,j} + \varepsilon(P_{IF,r}^{C,j}) \quad (17)$$

$$L_{IF,r}^{C,j} = \rho_r^{C,j} + \widetilde{cdt}_r^C + T_r^{C,j} + \lambda_{IF}^C \widetilde{N}_{IF}^{C,j} + \varepsilon(L_{IF,r}^{C,j}) \quad (18)$$

Burada $P_{IF,r}^{s,j}$ ve $L_{IF,r}^{s,j}$ sırasıyla iyonosferden bağımsız kod ve faz gözlemlerini; $\widetilde{N}_{IF}^{s,j}$ ise iyonosferden bağımsız faz gözlemi için belirsizlik parametresini ifade eder.

Yukarıda belirtilen eşitlikler doğrudan uygulanırsa, her bir sistem için ayrı bir alıcı saat hatası oluşacaktır. Bu noktada her bir sistem için ayrı birer alıcı saat hatası belirtmek yerine GPS'e göre olan farkı yansıtan sistemler-arası fark parametrelerini (cdt_{sys}^E , cdt_{sys}^R and cdt_{sys}^C) modele dâhil etmek daha uygun bir yoldur (Cai and Gao, 2013). Bu durum göz önüne alındığında, GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou için kod ve faz gözlemlerinin iyonosferden bağımsız gözlem eşitlikleri aşağıdaki gibi yazılır.

$$P_{IF,r}^{G,j} = \rho_r^{G,j} + \widetilde{cdt}_r^G + T_r^{G,j} + \varepsilon(P_{IF,r}^{G,j}) \quad (19)$$

$$L_{IF,r}^{G,j} = \rho_r^{G,j} + \widetilde{cdt}_r^G + T_r^{G,j} + \lambda_{IF}^G \widetilde{N}_{IF}^{G,j} + \varepsilon(L_{IF,r}^{G,j}) \quad (20)$$

$$P_{IF,r}^{R,j} = \rho_r^{R,j} + \widetilde{cdt}_r^G + cdt_{sys}^R + T_r^{R,j} + \varepsilon(P_{IF,r}^{R,j}) \quad (21)$$

$$L_{IF,r}^{R,j} = \rho_r^{R,j} + \widetilde{cdt}_r^G + cdt_{sys}^R + T_r^{R,j} + \lambda_{IF}^R \widetilde{N}_{IF}^{R,j} + \varepsilon(L_{IF,r}^{R,j}) \quad (22)$$

$$P_{IF,r}^{E,j} = \rho_r^{E,j} + \widetilde{cdt}_r^G + cdt_{sys}^E + T_r^{E,j} + \varepsilon(P_{IF,r}^{E,j}) \quad (23)$$

$$L_{IF,r}^{E,j} = \rho_r^{E,j} + \widetilde{cdt}_r^G + cdt_{sys}^E + T_r^{E,j} + \lambda_{IF}^E \widetilde{N}_{IF}^{E,j} + \varepsilon(L_{IF,r}^{E,j}) \quad (24)$$

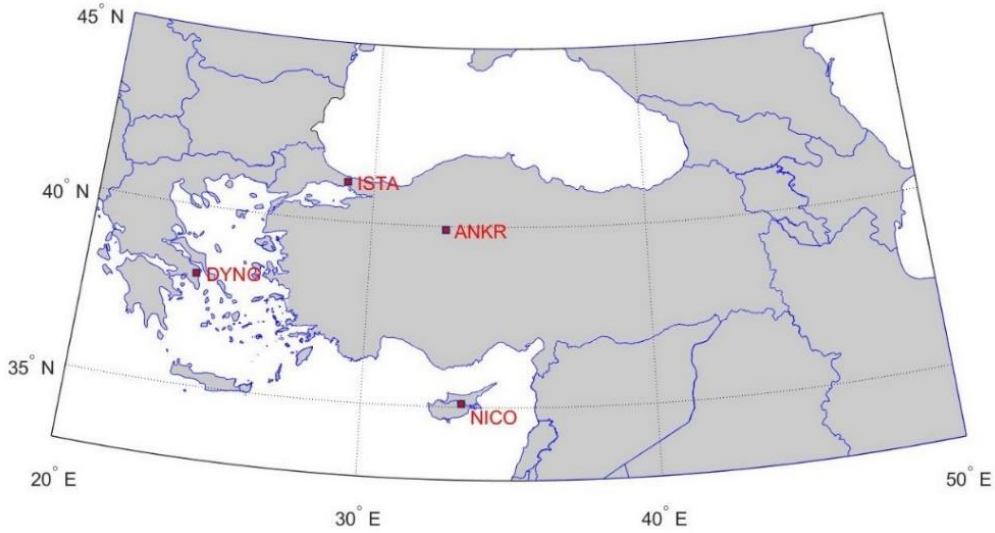
$$P_{IF,r}^{c,j} = \rho_r^{c,j} + \widetilde{c}dt_r^c + cdt_{sys}^c + T_r^{c,j} + \varepsilon(P_{IF,r}^{c,j}) \quad (25)$$

$$L_{IF,r}^{c,j} = \rho_r^{c,j} + \widetilde{c}dt_r^c + cdt_{sys}^c + T_r^{c,j} + \lambda_{IF}^c \widetilde{N}_{IF}^{c,j} + \varepsilon(L_{IF,r}^{c,j}) \quad (26)$$

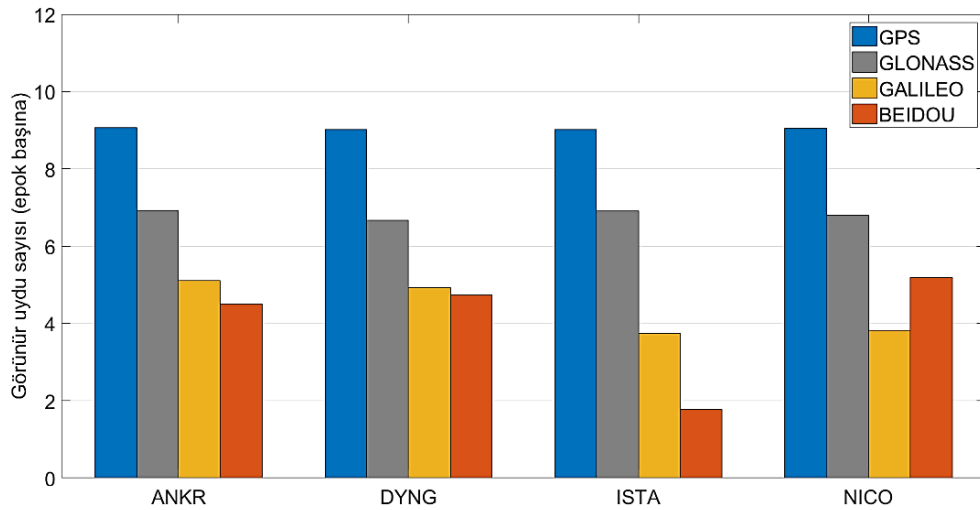
Son eşitlikler çoklu-GNSS PPP modelini oluşturur ve bilinmeyen olarak pozisyon bileşenlerinin yanı sıra bir alıcı saat hatasını, üç sistemler-arası fark parametresini, bir troposferik gecikmeyi ve gözlenen her uydu için belirsizlik parametrelerini içerir.

4. UYGULAMA

Çoklu-GNSS kombinasyonlarının Türkiye'deki PPP performansına olan etkisini araştırmak için Türkiye ve yakın çevresinde yer alan 4 IGS istasyonu uygulamada kullanılmak üzere seçilmiştir. ANKR, DYNG, ISTA ve NICO isimli bu istasyonların coğrafi konumları Şekil 1'de verilmiştir. 5-11 Kasım 2017 tarihleri arasında ilgili istasyonlardan toplanmış GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou uydularını içeren 30 saniye aralıklı ve RINEX3 formatındaki günlük gözlem dosyaları IGS veri merkezleri aracılığıyla elde edilmiştir. Gözlem verilerinden, ilgili hafta boyunca epok başına düşen ortalama görünür GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou uydu sayıları her istasyon için ayrı ayrı hesaplanmış ve Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 1. Uygulamada kullanılan istasyonların coğrafi konumları.



Şekil 2. İstasyonlarda epok başına düşen ortalama görünür GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou uydu sayıları.

Sadece GPS gözlemlerini içeren standart PPP çözümüne (G) ek olarak aşağıda verilen sekiz farklı PPP işlem senaryosu oluşturulmuştur.

- GLONASS (R),
- GPS/GLONASS (GR),
- GPS/Galileo (GE),
- GPS/BeiDou (GC),
- GPS/GLONASS/Galileo (GRE),
- GPS/GLONASS/BeiDou (GRC),
- GPS/Galileo/BeiDou (GCE)
- GPS/GLONASS/Galileo/BeiDou (GRCE)

Burada, Galileo ve BeiDou sistemleri için tekli PPP işlem senaryoları oluşturulmamıştır. Bunun nedeni, bu sistemlerin henüz tam kapasiteye

ulaşamadıkları için tek başlarına PPP çözümünü gerçekleştirmeye yetecek kadar görünür uydu sağlayamamasıdır.

Dört IGS istasyonuna ait bir haftalık gözlem dosyaları toplamda dokuz farklı PPP senaryosu altında GFZ tarafından oluşturulmuş hassas uydu yörünge ve saat ürünleri kullanılarak ayrı ayrı işlenmiştir. İşlemler sırasında filtre her üç saatte bir sıfırlanarak çözümün yeniden yakınsaması sağlanmıştır. Böylelikle her bir istasyon için günde 8, haftada ise 56 periyot elde edilmiştir. Uygulamada PPP çözümlerini gerçekleştirmek için yazarlar tarafından geliştirilen PPPH adlı yazılım kullanılmıştır. PPPH GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou gözlemlerini işleyebilen ve bu sistemlerin farklı kombinasyonlarının dâhil edildiği PPP çözümlerini gerçekleştirebilen MATLAB tabanlı bir yazılımdır (Bahadur, 2017). PPPH yazılımı PPP çözümünü bir önceki bölümde açıklanan çoklu-GNSS PPP modelini temel alarak gerçekleştirir. Bu yazılımda kullanılan modeller ve uygulanan işlem stratejisi Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. PPPH yazılımında kullanılan modeller ve uygulanan işlem stratejisi.

Dâhil edilen sistemler	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou
İşleme modu	Sabit
Uydu saat ve yörünge bilgisi	GFZ
Uydu ve alıcı anten faz merkezi düzeltmesi	IGS Antex
Gözlemler	Fark alınmamış iyonosferden bağımsız faz ve kod gözlemleri
Gözlem ağırlıkları	Yükselme açısına bağlı
Gözlemlerin standart sapması	Faz gözlemi: 0.003 m, Kod gözlemi: 3 m
Troposfer	
Kuru kısım için model	Saastamoinen (Saastamoinen, 1972)
Meteorolojik veriler	GPT2 (Global Pressure and Temperature Model 2, Lagler, vd., 2013)
Islak kısım	Bilinmeyen olarak kestiriliyor.
İzdüşüm fonksiyonu	GMF (Global Mapping Function, Boehm, vd., 2006)
Relativistik düzeltmeler	Uygulandı (Kouba, 2015)
Faz dönüklüğü düzeltmesi	Uygulandı (Wu, vd., 1993)
Katı yer gelgiti ve okyanus yüklemesi	Uygulandı (Petit ve Luzum, 2010)
Dengeleme yöntemi	Genişletilmiş Kalman filtresi

Tablo 4. Her istasyon için farklı PPP çözümlerinden elde edilen ortalama konum hatası, karesel ortalama hata (KOH) ve yakınsama süresi değerleri.

İstasyon	Kombinasyon	Konum Hatası (mm)				KOH (mm)			Yakınsama Süresi (dakika)
		K	D	Y	3B	K	D	Y	
ANKR	G	16	17	22	37	17	31	27	33.2
	R	18	38	37	60	23	45	43	41.6
	GR	7	19	15	28	12	29	26	22.8
	GC	17	20	23	39	19	32	28	28.6
	GE	14	15	21	34	17	27	26	25.5
	GRE	7	18	13	27	11	28	25	22.2
	GRC	8	19	15	28	12	28	26	22.6
	GCE	14	16	22	35	18	27	27	22.8
	GRCE	8	18	14	27	11	27	25	21.7
DYNG	G	12	25	43	54	19	32	47	25.8
	R	21	42	47	75	25	46	56	44.5
	GR	6	20	36	44	11	27	41	23.7
	GC	12	28	40	55	19	23	45	25.5
	GE	10	20	41	50	17	25	42	18.3
	GRE	6	19	36	43	11	26	41	19.9
	GRC	6	19	35	42	11	25	40	22.1
	GCE	11	21	40	51	17	25	42	20.0
	GRCE	6	18	35	42	10	25	40	19.1
ISTA	G	14	22	33	46	19	31	39	38.3
	R	26	37	41	66	31	45	47	51.5
	GR	8	19	29	38	13	31	39	29.1
	GC	14	24	32	46	19	34	37	37.8
	GE	12	17	29	39	17	30	36	29.3
	GRE	8	17	27	36	12	30	37	27.5
	GRC	8	19	28	38	13	31	39	28.7
	GCE	12	19	29	40	17	31	35	31.5
	GRCE	7	17	27	36	12	30	37	27.2
NICO	G	18	25	36	52	20	31	41	44.6
	R	19	37	37	61	25	45	43	49.0
	GR	12	30	26	45	14	38	35	33.2
	GC	18	24	33	48	21	31	38	41.7
	GE	16	22	32	45	18	29	37	34.2
	GRE	11	30	26	45	14	37	35	29.9
	GRC	12	28	25	44	15	36	33	32.3
	GCE	16	20	30	43	19	29	36	31.6
	GRCE	11	27	24	42	14	35	33	29.3

Çalışmada çoklu-GNSS kombinasyonlarının PPP çözümüne olan etkisini araştırmak için elde edilen sonuçlar konum doğruluğu ve yakınsama süresi açısından incelenmiştir. Konum doğruluğunu ölçebilmek için istasyonların PPP çözümlerinde 3 saat sonunda kestirilen koordinatları ile IGS haftalık çözümlerinden alınmış yüksek doğruluğa sahip koordinatları karşılaştırılmıştır. Her iki çözüm arasındaki koordinat farkları alınarak lokal sisteme

dönüştürülmüş ve kuzey (K), doğu (D) ve yukarı (Y) yönlerdeki konum hatası hesaplanmıştır. Diğer taraftan yakınsama süresi üç boyutlu konum hatasının 10 cm altına düştüğü ve sonraki 15 dakika boyunca 10 cm üstüne çıkmadığı an olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, yakınsama anından sonraki bütün epoklarda elde edilen sonuçlar hesaba katılarak yine lokal sistemde karesel ortalama hatalar hesaplanmıştır. Her istasyonun sonuçları konum hatası, karesel ortalama hata ve

yakınsama süresi açısından değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar farklı PPP kombinasyonları için 56 periyodun ortalaması şeklinde Tablo 4'de verilmiştir. Sadece GLONASS uydularının kullanıldığı durumda görünür uydu sayısının azaldığı (özellikle 5 uydunun altına düştüğü) periyotlarda PPP çözümü yakınsamamıştır. ANKR, DYNG, ISTA ve NICO istasyonlarında 56 periyottan sırasıyla 12, 13, 15 ve 16'sında PPP çözümü yakınsamamıştır. Dolayısıyla GLONASS PPP çözümü için verilen ortalamalar yakınsayan periyotların ortalamasıdır.

Tablo 4'de sunulan sonuçlar incelendiğinde tüm istasyonlar için en kötü performansın GLONASS PPP çözümüne (R) ait olduğu görülmektedir. GPS PPP (G) çözümü ile kıyaslandığında GLONASS PPP çözümü üç boyutlu konum hatası açısından ortalama %40, yakınsama süresi açısından ise %35 daha kötü performans göstermiştir. Bunun temel nedeni olarak GLONASS uydu sayısının ve uydu ve saat ürünlerinin GPS'e göre daha yetersiz olması gösterilebilir. Diğer taraftan ikili kombinasyonların kullanıldığı PPP çözümleri GPS PPP performansını oldukça iyileştirmiştir. Özellikle GPS/GLONASS kombinasyonu GPS PPP çözümünü tüm istasyonlar için konum hatası açısından ortalama %18, yakınsama süresi açısından da ortalama %22 oranda iyileştirmiştir. Üçlü kombinasyonların PPP çözümüne etkisi incelendiğinde GPS/GLONASS PPP'ye göre küçük oranlarda iyileştirmeler görülmektedir. Beklendiği gibi en iyi PPP performansı dört sistemin ortak olarak kullanıldığı çoklu-GNSS (GRCE) PPP çözümüne aittir. Çoklu-GNSS PPP çözümünün performansı GPS PPP'ye kıyasla üç boyutlu konu hatası anlamında ortalama %25, yakınsama süresi anlamında ise ortalama %30 oranda daha iyidir. Son olarak ISTA istasyonunda görünür uydu sayısının sınırlı kalmasından dolayı BeiDou'nun PPP çözümüne eklenmesi sonuçlara önemli oranda etki etmemiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Türkiye ve yakın çevresi için çoklu-GNSS kombinasyonlarının PPP performansına olan etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla dört adet IGS istasyonunda bir hafta boyunca toplanmış günlük gözlem verileri GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou'yu içeren toplamda 9 farklı PPP senaryosu altında ayrı ayrı işlenmiştir. PPP çözümleri gerçekleştirilirken yazarlar tarafından geliştirilmiş PPPH adlı yazılım kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar konum hatası, karesel ortalama hata ve yakınsama süresi açısından incelenmiştir. Sonuçta, GPS'in yanı sıra

diğer navigasyon sistemlerinin de kullanıldığı durumlarda PPP performansının önemli ölçüde iyileştiği görülmüştür. En iyi PPP performansı dört sistemin ortak kullanıldığı çoklu-GNSS çözümünden elde edilmiştir. Bu durum bize artan uydu sayısı ve ürün kalitesinin PPP performansında önemli gelişmelere neden olduğunu göstermektedir. Öte yandan yalnızca GLONASS uydularının dâhil edildiği PPP çözümleri yetersiz uydu sayısı yüzünden bazı periyotlarda yakınsamamış ve yakınsadığı periyotlarda ise GPS PPP'ye göre daha kötü sonuçlar üretmiştir. Buradan GLONASS'ın tek başına PPP çözümü gerçekleştirecek yeterlilikte olmadığı sonucuna varılabilir. Diğer taraftan, temelde Asya-Pasifik bölgesine hizmet odaklı bir sistem olduğundan BeiDou görünür uydu sayısı coğrafi konuma bağlı olarak ciddi oranda değişimler göstermektedir. Bu nedenle, BeiDou'nun PPP çözümlerine dâhil edilmesi her noktada benzer sonuçlar doğurmaz. Özellikle diğer istasyonlara oranla daha kuzeyde yer alan ISTA istasyonunda görünür uydu sayısı çok kısıtlı kaldığından BeiDou'nun PPP çözümlerine dâhil edilmesi sonuçları neredeyse hiç etkilememiştir.

Birden fazla navigasyon sisteminin dâhil edildiği çözümler PPP'nin en büyük dezavantajı olarak görülen uzun yakınsama süresini azaltmak için önemli fırsatlar sunmaktadır. Ancak navigasyon sistemlerinin ortak kullanılması noktasında hala model ve algoritmalar üzerine çalışmalar yapılmasına ihtiyaç vardır. Özellikle sürekli olarak artan uydu sayısı ve eklenen frekanslar yeni yaklaşımlar ve bunların uygulanacağı yazılım çözümleri gerektirmektedir. Diğer taraftan birden fazla navigasyon sisteminin PPP çözümünde kullanılmasını sağlayan MGEX hassas uydu yörünge ve saat ürünleri sürekli olarak geliştirilmektedir. PPP gibi doğrudan uydu yörünge ve saat verilerine güvenen teknikler için bu ürünlerin takip edilmesi ve performans açısından değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Ayrıca MGEX ürünleri sayesinde gerçek zamanlı PPP çözümleri de mümkün olmuştur. Gerçek zamanlı PPP uygulamalarının yakın gelecekte de önemli bir araştırma konusu olmaya devam etmesi beklenmektedir.

KAYNAKLAR

Bahadur, B., 2017, **Improving the performance of Precise Point Positioning with multi-GNSS**, Yüksek Lisans Tezi, Geomatik Müh. Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.

- Bahadır, B., Nohutcu, M., 2017, **Türkiye İçin Çoklu-GNSS PPP Performansının Değerlendirilmesi**, TUJK 2017 Yılı Bilimsel Toplantısı, İstanbul.
- Boehm, J., Niell, A., Tregoning, P., Schuh, H., 2006, **Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data**, Geophysical Research Letters 33:7.
- Cai, C., Gao, Y., 2013, **Modelling and assessment of combined GPS/GLONASS precise point positioning**, GPS Solutions 17:2, 223-236.
- Choy, S., Bisnath, S., Rizos, S., 2017, **Uncovering common misconceptions in GNSS Precise Point Positioning and its future prospect**, GPS Solutions 21:1, 13-22.
- Defraigne, P., Baire, Q., 2011, **Combining GPS and GLONASS for time and frequency transfer**, Advances in Space Research 47:2, 265–275.
- Guo, Q., 2015, **Precision comparison and analysis of four online free PPP services in static positioning and tropospheric delay estimation**. GPS Solutions 19:4, 537–544.
- Kouba, J., Héroux, P., 2001, **GPS precise point positioning using IGS orbit products**, GPS Solutions 5:2, 12-28.
- Kouba, J., 2015, **A Guide to Using the IGS Products. IGS Website.** <https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/201271873-A-Guide-to-Using-the-IGS-Products>. Son erişim tarihi 12 Aralık 2017.
- Lagler, K., Schindelegger, M., Böhm, J., Krásná, H., Nilsson, T., 2013, **GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques**, Geophysical Research Letters 40:6, 1069-1073.
- Li, X., Ge, M., Zhang, X., Zhang, Y., Guo, B., Wang, R., Klotz, J., Wickert, J., 2013, **Real-time high-rate co-seismic displacement from ambiguity-fixed precise point positioning: Application to earthquake early warning**, Geophysical Research Letters, 40, 295-300.
- Li, P., Zhang, X., 2014, **Integrating GPS and GLONASS to accelerate convergence and initialization times of precise point positioning**, GPS Solutions, 18(3), 461-471.
- Lu, C., Li, X., Nilsson, T., Heinkelmann, R., Ge, M., Glaser, S., Schuh, H., 2015, **Realtime retrieval of precipitable water vapor from GPS and BeiDou observations**, Journal of Geodesy, 89, 843-856.
- Montenbruck, O., Steigenberger, P., Prange, L., Deng, Z., Zhao, Q., Perosanz, F., Romero, I., Noll, C., Stürze, A., Weber, G., Schmid, R., MacLeod, K., Schaer, S., 2017, **The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS) – Achievements, prospects and challenges**, Advances in Space Research 59:7, 1671-1697.
- Petit, G., Luzum, B., 2010, **IERS Conventions 2010 (IERS Technical Note; 36)**, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 pp., ISBN 3-89888-989-6.
- Rizos, C., Janssen, V., Roberts, C., Grinter, T., 2012, **Precise point positioning: is the era of differential GNSS positioning drawing to an end?**, FIG Working Week 2012, Roma, İtalya.
- Saastamoinen, J., 1972, **Contributions to the theory of atmospheric refraction**, Bulletin Geodesique 105:1, 279–298.
- Togedor, J., Øvstedal, O., Vigen, E., 2014, **Precise orbit determination and point positioning using GPS, Glonass, Galileo and BeiDou**, Journal of Geodetic Science, 4, 65-73.
- Tu, R., Zhang, H., Ge, M., Huang, G., 2013, **A real-time ionospheric model based on GNSS Precise Point Positioning**, Advances in Space Research, 52, 1125-1134.
- Wanninger, L., 2011, **Carrier-phase inter-frequency biases of GLONASS receivers**, Journal of Geodesy 86:2, 139-148.
- Wright, T. J., Houlie, N., Hildyard, M., Iwabuchi, T., 2012, **Real-time, reliable magnitudes for large earthquakes from 1 Hz GPS precise point positioning: The 2011 Tohoku-Oki (Japan) earthquake**, Geophysical Research Letters, 39, L12302.
- Wu, J., Wu, S., Hajj, G., Bertiger, W., Liechten, S., 1993, **Effects of antenna orientation on GPS carrier phase**, Manuscripta Geodaetica 18:2, 91-98.

- Yuan, X., Fu, J., Sun, H., Toth, C., 2009, **The application of GPS precise point positioning technology in aerial triangulation**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64, 541-550.
- Yiğit, C. Ö., Gikas, V., Alçay, S., Ceylan, A., 2014, **Performance evaluation of short to long term GPS, GLONASS and GPS/GLONASS post-processed PPP**, Survey Review, 46(336), 155-166.
- Yiğit, C.Ö., Gürlek, E., 2017, **Experimental testing of high-rate GNSS precise point positioning (PPP) method for detecting dynamic vertical displacement response of engineering structures**, Geomatics Natural Hazards & Risk, 8:2,893-904.
- Zumberge, J.F., Heflin, M.B., Jefferson, D.C., Watkins, M.M., 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.