

AKÜ FEMÜBİD 18 (2018) 017101 (343--356)

AKU J. Sci. Eng. 18 (2018) 017101 (343--356)

DOI: 10.5578/fmbd.66259

PPP ve IGS Gerçek Zaman Servisi ile Su Buharı Hareketlerinin İzlenmesi**Engin Tunalı¹**¹ Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Ankara.

e-posta: etunali@hacettepe.edu.tr

Geliş Tarihi:26.07.2017

; Kabul Tarihi:11.12.2017

Özet

Bu çalışmada; Uluslararası Küresel Navigasyon ve Uydu Sistemleri (Global Navigation Satellite Systems - GNSS) Servisi (International GNSS Service - IGS) bünyesinde hizmet veren Gerçek Zaman Servisi (Real Time Service - RTS) aracılığıyla sağlanan uydu yörünge ve saat düzeltmelerini kullanan Gerçek Zamanlı Hassas Konum Belirleme (Real Time Precise Point Positioning – RT PPP) oturumlarının, atmosferdeki su buharı hareketlerini izlemek için yeterli hassasiyette sahip olup olmadığı araştırılmıştır. Bu amaçla, 5 IGS istasyonuna ait gözlemler ve IGS RTS düzeltmeleri kullanılarak troposferde modellenmesi zor zenit ıslak gecikmesi (Zenith Wet Delay - ZWD) değerleri gerçek zamanlı kestirilmiştir. Kestirimlerden türetilen yoğunlaşabilir su buharı (Precipitable Water Vapor - PWV) değerleri, aynı veya yakın konumlu Radyosonda okumaları ve aynı istasyonların art-ışlem (Post Process - PP) PPP kestirimleri ile karşılaştırılmıştır. RT çözümlerde, farklı öncül troposfer modelleri ve izdüşüm fonksiyonları kullanılarak, hangi modelin kestirim sonuçlarına nasıl etki ettiği incelenmiştir. RT PPP gözlemlerinde kullanılan gerçek zamanlı uydu bilgisi ürünlerinin, atmosferi modellemek ve su buharı hareketlerini izlemek için IGS Ultra-Rapid (URP - kestirilen) ürünlere göre daha hassas sonuçlar verdiği görülmüştür. RT PPP çözümlerinde, Viyana İzdüşüm Fonksiyonu1 (Vienna Mapping Function1 – VMF1) gibi sayısal hava modellerinden türetilen troposfer model yaklaşımlarının, Küresel Basınç ve Sıcaklık / Küresel İzdüşüm Fonksiyonu (Global Pressure and Temperature - GPT / Global Mapping Function - GMF) ve New Brunswick Üniversitesi / Niell İzdüşüm Fonksiyonu (University of New Brunswick - UNB / Niell Mapping Function – NMF) gibi analitik modellere göre Radyosonda sonuçları ile daha uyumlu olduğu tespit edilmiş, PP PPP ile RT PPP oturumları arasındaki kestirim farklarının 2 mm'nin altında olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler

IGS RTS; PPP; GNSS
Meteoroloji;
Yoğunlaşabilir Su Buharı

Monitoring Water Vapor Variations with PPP and IGS Real Time Service**Abstract**

In this study, the performance of Precise Point Positioning (PPP) sessions, which processing real time satellite orbit and clock corrections provided by the International GNSS Service Real Time Service (IGS RTS), were evaluated in terms of monitoring atmospheric water vapor variations. Observation data of 5 IGS stations and streamed real time correction messages were processed together in order to estimate highly spatiotemporal and hard to model variable zenith wet delay (ZWD) parameters in the real time (RT). Precipitable water vapor (PWV) values that derived from the ZWD parameters were compared with the water vapor values obtained from co-located Radiosonde readings and with the results of the post-process (PP) PPP estimates of the same IGS sites. Different a priori troposphere models and mapping functions were applied to solutions for observing their effects on the estimates. Real-time (RT) PPP campaigns, which processing real time satellite orbits and clocks, were proved to provide much more accurate estimates rather than predicted part of IGS Ultra-Rapid products (URP) during modeling the atmosphere and monitoring water vapor variations. RT PPP solutions, which using numerical weather models (NMW) derived Vienna Mapping Function 1 (VMF1) to estimate the PWV, showed better agreement with the Radiosonde readings than other RT PPP estimates processing empirical models such as Global Pressure and Temperature / Global Mapping Function (GPT / GMF) and University of New Brunswick / Niell Mapping Function (UNB / NMF). It has also been observed that differences between PP PPP and RT PPP campaigns' estimates remain within 2 mm.

Keywords

IGS RTS; PPP; GNSS
Meteorology;
Precipitable Water
Vapor

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

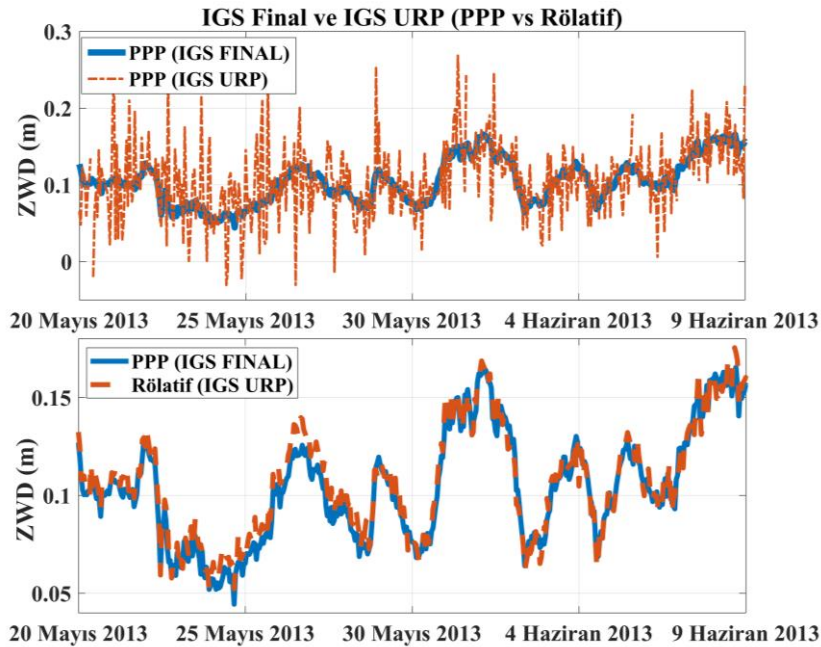
1. Giriş

PPP ölçme tekniği, GNSS tabanlı ölçme teknikleri arasında, sahip olduğu karakteristik özellikler ile farklılık göstermektedir. Sürekli Çalışan Referans

Sistemi (Continuously Operating Reference System - CORS) gibi çözümlerinin aksine, çözümler tek alıcı üzerinden, fark alma teknikleri kullanılmaksızın (undifferenced) kod ve taşıyıcı faz gözlemlerinin

değerlendirilmesi ile yapılmaktadır. Bu nedenle, gözlem denklemindeki her bir parametrenin bağımsız ele alınması, hataların, gözlemlerin lineer kombinasyonları ile elemine edilmesi veya modellenerek etkilerinin azaltılması gerekmektedir. PPP ile konum, alıcı saat hataları, troposfer gecikmeleri ve taşıyıcı faz belirsizlikleri kestirilebilmektedir. Parametre kestiriminin ne kadar güvenilir olduğu, modelde kullanılan diğer parametrelerin hassasiyeti ve güvenilirliği ile ilgilidir. PPP çözümünün, ağ (rölatif) çözümüne göre en büyük dezavantajı, tamsayı taşıyıcı faz belirsizliği nedeniyle anlamlı sonuçlar alınincaya kadar geçen yakınsama süresidir. Bu süre, uydu dizilişine ve veri kalitesine göre değişiklik göstermekte, 30 dakika ile saatler arasında zaman alabilmektedir (Bisnath and Gao 2008). RT PPP çözümlerinin gerçekleşmesinin önündeki en büyük engel olarak, yakınsama süresi gösterilebilir. Diğer önemli bir engel olarak; oturum anından sırasıyla, ~13 saat ve ~13 günlük bir gecikme ile yayınlanan IGS Rapid (IGR) ve IGS Final yörünge ve saat bilgisi ürünlerinin hassasiyetine yaklaşabilen gerçek zamanlı (RT) bir efemeris verisinin bulunmamasıdır. RT çözümlerde

yakın zamana kadar kullanılabilir tek hassas veri seti olan IGS URP (kestirilen) ürünleri, yörüngede ~5 santimetre (cm), uydu saatinde ise ~3 nanosaniye (ns) kadar bir doğruluk sağlamaktadır (Kouba 2009). Hassasiyeti daha yüksek olan IGS URP (hesaplanan) ise gözlem anından yaklaşık 3 ile 9 saat aralığında bir süre sonra yayınlandığı için RT çözümlerden çok yakın RT uygulamalarda kullanılmaktadır. PPP gözlem denklemlerinde, uydu konumlarından ve uydu saatlerinden kaynaklanan hatalar, ağ çözümünde olduğu gibi çoklu farklar yöntemi ile giderilemez, bu yüzden IGS URP ürünlerini kullanan PPP oturumlarında kestirilen parametrelerin hassasiyeti, ağ çözümünün hassasiyetine göre düşük olacaktır. Şekil 1'de üst grafik, Frankfurt – FFMJ IGS istasyonunda gerçekleştirilen 3 haftalık PPP oturumu boyunca kestirilen ZWD değerlerini göstermektedir. RT IGS URP (kestirilen) ve PP IGS Final ürünlerinin kullanıldığı iki ayrı PPP oturumuna ait troposfer kestirimlerinden de görüleceği üzere; IGS ürünlerini kullanan PP PPP çözümü ile RT PPP çözümünün kestirimleri arasında ortalama 10.0 cm'ye kadar ulaşan büyük farklar gözlemlenmiştir.



Şekil 1. IGS Final ve IGS URP PPP çözümleri ile kestirilen ZWD değerleri (üst); IGS Final PPP ve Rölatif URP çözümleri ile kestirilen ZWD değerleri (alt).

Bu kadar büyük farkların ortaya çıkmasında, IGS URP (kestirilen) uydu yörünge ve saat bilgisi ürünlerinin, eski epoklu yörünge ve saatlerden (URP hesaplanan) ekstrapolasyon ile tahmin edilmesinin payı

büyüküdür. IGS URP ürünlerini kullanan aynı oturum, PPP ile çözüm yerine, uydu konumu ve saatinden kaynaklanan hataların giderildiği ağ çözümü ile kestirim yapacak olursa; Şekil 1'de alt grafikte de

görüldüğü gibi ZWD kestirimleri arasındaki farkların milimetre (mm) mertebesine indiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, IGS URP hassas efemeris verisi, PPP çözümlerinde, ağ çözümü kadar hassasiyet gösterememekte, iyileştirmelere ihtiyaç duymaktadır. IGS RTS, Pilot Proje kapsamında 2007 yılında hayata geçmiştir. Servis, Nisan 2013'ten bu yana kullanıcılara RT uydu yörünge ve saat verilerini internet üzerinden Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP) protokollerine uygun olarak ve Radio Technical Commission for Maritime services / State Space Representation (RTCM / SSR) formatında mesajlar ile yayınlamaktadır. IGS RTS kullanıcıları, CORS ve benzeri ağlar yardımıyla yayın efemerisine (broadcast) getirilecek uydu yörünge ve saat düzeltmelerini RT kestirebilmektedir. Bu düzeltmelerin yayın efemerisine eklenmesi ile hassas uydu yörünge ve saat bilgileri üretilebilmekte ve RT PPP oturumları yürütülebilmektedir. RT PPP, atmosferik hava hareketlerinin temel bileşeni olan ve önemli bir sera gazı olan su buharı hareketlerinin RT izlenebilmesi için önemli bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır. 1990'lı yılların başında beri su buharı hareketleri GNSS gözlemleri ile izlenmekte ve elde edilen bulgular hava tahmin çalışmalarında etkin olarak kullanılmaktadır. GNSS, sahip olduğu homojen ve sık istasyon ağı, sürekli veri sağlaması ve ekonomik nedenlerin de etkisiyle, Radyosonda, Su Buharı Radyometresi ve Çok Uzun Baz İnterferometrisi (VLBI: Very Long Baseline Interferometry) gibi su buharı hareketlerini izleyebilen, maliyetli, örnekleme aralığı ve mekânsal çözünürlüğü düşük yöntemlere göre daha etkin bir çözüm sağlamaktadır. "GNSS Meteorolojisi" adıyla literatürde yerini alan bu konu ile ilgili ilk çalışmalar, Bevis et al. (1992), Rocken et al. (1997) ve Tregoning et al. (1998) ile başlamış olup çalışmaların büyük bir bölümü, GNSS ağ çözümleri uygulamalarıdır. Günümüzde, gerçek ve yakın gerçek zamanlı atmosferik verilere hava tahmin çalışmalarında duyulan ihtiyacın artması, GNSS Meteorolojisi alanındaki çalışmaları, RT çözümlere doğru yönlendirmektedir. Bu çalışmada; IGS RTS tarafından yayınlanan ve içeriğinde yayın efemerisine getirilen uydu yörünge ve saat düzeltmelerini içeren SSR / RTCM mesajları, PPP oturumlarında kullanılmış, ani hava değişimlerinin

yaşandığı zaman dönemlerinde ZWD ve PWV parametreleri kestirilmiştir. IGS RTS ürünlerinden bir tanesi olan CLK91 (SSR GPS: 1059 ve 1060 ; SSR GLONASS: 1065 ve 1066), "Le Site Du Centre National D'études Spatiales" (CNES) analiz merkezi'nde Laurichesse and Mercier (2007) tarafından geliştirilen ve tamsayı taşıyıcı faz belirsizliğinin etkilerinin giderildiği bir Kalman Filtresi algoritmasının (PPP - Wizard) sonuç ürünlerini içermektedir. Diğer bir yayın olan IGS03 (SSR GPS:1057, 1058, 1059 ; SSR GLONASS:1063, 1064, 1065), Alman Kartografya ve Jeodezi Federal Ajansı (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie - BKG) tarafından hesaplanarak, GPS ve GLONASS için RT yayın efemerisi düzeltmeleri sağlamaktadır. Bununla birlikte, RT PPP gözlemlerinde kullanılan farklı öncül troposfer modellerinin ve bu modellerle birlikte kullanılan izdüşüm fonksiyonlarının atmosferik kestirimlerin değerlerinde yarattıkları farklılıklar irdelenmiştir. Gözlem anından yaklaşık iki hafta sonra yayınlanan hassas uydu yörüngelerini ve saatlerini kullanan PP PPP'den kestirilen ZWD değerleri ve aynı veya yakın konumlu Radyosonda istasyonlarından sağlanan PWV değerleri, RT PPP sonuçları için referans olarak kullanılmıştır.

2. Matematiksel Model

2.1. PPP Gözlem Modeli

PPP, çift frekanslı bir alıcıyla, fark alma teknikleri kullanılmaksızın, taşıyıcı faz ve kod gözlemleri ile IGS analiz merkezlerinden (JPL, CODE, GFZ, vb.) gelen hassas efemeris ürünlerini kullanmaktadır. İlk olarak Zumberge et al. (1997) tarafından ortaya çıkarılan yöntem; iyonosfer bağımsız gözlem denklemlerini (P_3 , L_3) kullanarak, cm mertebelerinde konum doğruluğuna ulaşmıştır. Kouba and Heroux (2000), 30 saniyelik örnekleme aralığıyla gelen GPS gözlemlerini kullanarak ve bilinmeyenleri her 15 dakikada bir kestirerek yaklaşık sonuçlar elde etmişlerdir. Benzer çalışmalarda (Gao et al. 2003; Chen and Gao 2005), koordinat verisine ek olarak; troposfer, alıcı saat düzeltmesi ve tamsayı olmayan (float) faz belirsizliği kestirilmiştir. PPP'de iyi modellenmemesi halinde, metrelerce gecikmelere sebep olabilecek iyonosfer etkisi, çift frekanslı

alıcıların lineer denklem kombinasyonları ile aşağıda verilen eşitliği kullanarak giderilebilmektedir:

$$P_3 = \frac{f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2}{f_1^2 - f_2^2}; \quad L_3 = \frac{f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2}{f_1^2 - f_2^2}. \quad (1)$$

iyonosfer tabakasının neden olduğu toplam gecikme etkisinin 1.dereceden % 99'una karşılık gelen kısmı, bu kombinasyonlarla çözümden çıkarıldıktan sonra denklem:

$$L_3 = \rho + c(dt^r - dt^s) + \Delta\rho^{trop} - \lambda_3 N_3 + b_{L3}^r - b_{L3}^s \quad (2)$$

$$P_3 = \rho + c(dt^r - dt^s) + \Delta\rho^{trop} + b_{P3}^r - b_{P3}^s \quad (3)$$

eşitlikleri ile tanımlanmıştır. Eşitliklerde kullanılan parametreler sırasıyla:

- P_i : Kod gözlemleri (m),
- L_i : Taşıyıcı faz gözlemleri (m),
- f_i : Frekans (Hz)
- ρ : Uydu-alıcı geometrik mesafesi (m),
- c : Işık hızı (m/s),
- dt^r : Alıcı saat hatası (s),
- dt^s : Uydu saat hatası(s),
- $\Delta\rho^{trop}$: Troposfer gecikmesi (m),
- λ_i : Dalga boyu (m),
- N_i : Tamsayı taşıyıcı faz belirsizliği (devir),
- $b_{P_i}^r$: Alıcı donanım kod gecikmesi (m),
- $b_{L_i}^r$: Alıcı donanım taşıyıcı faz gecikmesi (m),
- $b_{P_i}^s$: Uydu donanım kod gecikmesi (m),
- $b_{L_i}^s$: Uydu donanım taşıyıcı faz gecikmesi (m).

Multipath ve diğer gürültü (noise) etkileri bu eşitliklerde göz ardı edilmiştir. Eşitlikte, katı yer gelgitleri, okyanus yüklemeleri, atmosfer yüklemesi ve gelgitsel olmayan diğer etkiler, uydu - alıcı çifti arasındaki geometrik mesafenin bileşenleridir. Yukarıda ifade edilen etkilerin nasıl modelleneceği, Uluslararası Dünya Dönme ve Referans Sistemleri Servisi (International Earth Rotation and Reference Systems Service - IERS) (Petit and Luzum 2010) konvansiyonları ile belirlenmiştir. Multi-GNSS verilerin ve kullanıma sokulan yeni sinyallerin de çözümlere katıldığı göz önüne alınırsa, bu eşitliklerde, farklı GNSS sistemleri arasında doğabilecek uyumsuzlukları giderecek sapma

değerlerinin (inter-system biases) dikkate alınması gerekmektedir (Dach et al. 2015).

2.2. Troposfer Gecikme Modeli

Yansız (nötr) atmosfer olarak adlandırılan troposfer tabakası, Dünya'dan yaklaşık 50 km yüksekliğe kadar uzanmakta, toplam atmosfer kütesinin yaklaşık % 75'ini ve su buharının yaklaşık % 99'unu oluşturmaktadır. GNSS ve VLBI gibi mikrodalga sinyalleri için frekans bağımsız ve ayırgan olmayan (non-dispersive) bir ortam olması nedeniyle iyonosferdeki gibi lineer kombinasyonlar ile etkisi giderilememekte ve modellenmesi gerekmektedir. GNSS gözlemlerinde kullanılan troposfer modeli genel olarak:

$$T = mf_h \cdot ZHD + mf_w \cdot ZWD + [G_N \cdot \cos(\alpha) + G_E \cdot \sin(\alpha)] \quad (4)$$

eşitliği ile ifade edilir (Dach et al. 2015). Burada ZHD ve ZWD , sırayla, zenit hidrostatik (kuru) ve zenit ıslak gecikmeyi, mf_h ve mf_w , sırayla, kuru ve ıslak gecikmeler için izdüşüm fonksiyonlarını; G_N ve G_E , azimutal asimetric atmosferin dikkate alınmasıyla kestirilen Kuzey ve Doğu yönlü troposfer gradyanlarını, α da ilgili gözlem noktasında azimutun radyan cinsinden değerini temsil etmektedir. GNSS ölçmelerinde troposferden kaynaklanan gecikmeleri hesaplamak için iki temel yaklaşım kullanılabilir. Birinci yaklaşımda; gözlem denklemlerini oluşturarak En Küçük Kareler (EKK) yöntemini veya Kalman Filtresi (KF) yöntemini kullanarak gecikme kestirilebilir. İkinci yaklaşımda ise analitik troposfer tahmin modelleri, sayısal atmosfer modelleri, su buharı radyometreleri ve yerinde meteorolojik okumalar gibi harici kaynakları kullanarak troposfer modellenilebilmektedir. PPP ve ağ GNSS çözümlerinde ZHD parametresi, oturumun yapıldığı istasyonda yapılan hassas basınç ölçmeleri (p), enlem (φ) ve yüksekliğin (h) bir fonksiyonu olarak Saastamoinen (1972) eşitliği (5) ile yüksek bir hassasiyetle hesaplanabilmekte ve çözüm denkleminde öncül (a priori) troposfer parametresi olarak girmektedir.

$$ZHD = \frac{0.0022768 \cdot p}{(1 - 0.00266 \cdot \cos(2\varphi) - 0.28 \cdot 10^{-6} \cdot h)}. \quad (5)$$

Modellenmesi zor ZWD parametresi, zamansal ve mekânsal değişkenliği yüksek olan su buharı ile korelasyonundan dolayı EKK parametre kestirimi sonucunda bulunmakta ve bir önceki adımda hesaplanan öncül değere getirilen düzeltme olarak anılmaktadır. ZHD ve ZWD birlikte toplam gecikmeyi oluşturmaktadır. Günümüzde, hem ZHD hem de ZWD hesabında kullanılmak üzere sayısal hava modelleri verilerine dayanan birçok analitik atmosfer modeli geliştirilmiştir. Avrupa Orta Menzilli Hava Tahminleri Merkezi'nin (European Centre for MediumRange Weather Forecasts - ECMWF) uzun yıllara dayanan Re-Analysis (ERA-40, 1999 – 2002) (Uppala et al. 2005), ve ERA-Interim (2001-2011) (Dee et al. 2011) analizleri kapsamında, meteorolojik parametrelerin yıllık ortalama değerleri ve yıllık değişim oranları (genlik katsayıları) hesaplanmıştır. Grid formatında saklanan bu değerler küresel harmoniklere açılarak herhangi bir konum ve zaman dilimi için sürekli veri sağlayabilmekte, RT çözümleri desteklemektedir. GPT (Boehm et al. 2007), 9. derece ve 9.mertebeden deniz seviyesinde küresel harmonik bir fonksiyondur ve ölçme yapılan bölgede meteorolojik veriye ulaşma imkânı bulunmayan durumlarda sıklıkla tercih edilmektedir. GPT, konumu ve gözlem tarihi bilinen bir istasyon için ihtiyaç duyulan sıcaklık, basınç, nem, su buharı basıncı ve izdüşüm fonksiyonu katsayılarını (a_h, a_w) kullanıcılara sağlamaktadır. GPT2 (Böhm et al. 2015), GPT'nin kaba olan yatay grid çözünürlüğünü arttırmış (GPT:15°; GPT2: 5°), çok yağışlı dönemler ile çok kuru dönemlerin hakim olduğu bölgelerin daha iyi yansıtılması için meteorolojik verilerin yarıyıllık ortalama değerlerini ve genliklerini hesaplamıştır. GMF (Boehm et al. 2006a), GPT (~GPT2) (Boehm et al. 2007; Böhm et al. 2015) ile birlikte çalışmak için geliştirilmiş bir izdüşüm fonksiyonu olup ECMWF analiz verilerinin küresel harmoniklere açılması ile ilgili konum ve gün için kuru ve ıslak izdüşüm fonksiyon değerlerini hesaplamaktadır. Diğer bir analitik model olan UNB (Leandro et al. 2006), 15°'lik enlem bant aralıklarında tanımlanmış ve meteorolojik parametrelerin yıllık ortalama ve genliklerini içeren tablo (look up table) değerlerinin küresel harmoniklere açılması sonucu istenilen konum ve gün için tahmini değerler üretmektedir.

Bu değerler daha sonra Saastamoinen (1972) troposfer modelinde kullanılmakta ve NMF (Niell 1996) ile gecikme hesaplanmaktadır. Ani hava değişimlerine duyarlı olmayan bu analitik modeller; istenilen konum ve zaman için anlık veri sağlamakta, GNSS gözlem denklemlerine kolayca entegre edilebilmektedir. ECMWF analizleri sonucunda hesaplanan ve 2.5° (boylam) x 2.0° (enlem) grid formatında günde 4 kez yayınlanan (00:00, 06:00, 12:00, 18:00 UTC) VMF1; içeriğinde kuru ve ıslak izdüşüm fonksiyonlarının parametreleri ile verilen grid noktaları için hesaplanmış ZHD ve ZWD değerlerini bulundurmaktadır (Boehm et al. 2006b). VMF1, ilgili konum ve yükseklik için ara değer hesabıyla gerçeğe en yakın troposfer tahminlerini sağlayan yaklaşımdır. 6 saatlik ECMWF verilerini girdi olarak kullanmasından dolayı ani hava değişimlerine duyarlı ve aynı sebepten dolayı GNSS yazılımlarına uygulanması zordur. Belli bir gecikme ile PPP çözümünde kullanabilen VMF1, daha çok yakın gerçek zaman uygulamalarına katkı vermektedir. Gözlem denklemlerinden kestirilen ZWD ile PWV arasındaki ilişkiyi ortaya koyan dönüşüm, Bevis et al. (1994) tarafından verilen eşitlikteki (6) gibi ifade edilmiştir:

$$PWV = \frac{10^{-6} M_w}{\rho R (k_2' - k_1 \frac{M_w}{M_D} + \frac{k_3}{T_m})} \cdot ZWD. \quad (6)$$

Bu eşitlikte, M_w ve M_D , sırayla, su buharı ve kuru havanın Molar kütleleri, R , uluslararası gaz sabiti, T_m , ağırlıklı ortalama su buharı sıcaklığı ve k_1, k_2' ve k_3 ise ampirik kırılma sabitleridir. Dönüşüm işleminde en önemli parametre olan T_m değeri, yakın konumlu Radyosonda verilerinden üretilebildiği gibi analitik fonksiyonlar (GPT, UNB) yardımı ile de üretilebilir.

3. IGS Gerçek Zaman Servisi (IGS RTS)

Natural Resources Canada (NRCan), Alman Kartografya ve Jeodezi Federal Ajansı (BKG) ve Avrupa Uzay Ajansı'nın (European Space Agency - ESA) desteğiyle 2007 yılında kurulan IGS RTS, Nisan 2013'ten bu yana IGS Analiz Merkezleri'nden gelen uydu verileri ve 130'dan fazla istasyona ait gözlemleri kullanarak yayın efemerisine getirilen

uydu yörünge ve uydu saat bilgisi düzeltmelerini hesaplamaktadır. Düzeltmeler, internet üzerinden NTRIP protokollerine uygun olarak ve SSR / RTCM

v.3 mesajı formatında ve üyelik kapsamında sağlanmaktadır.

Tablo 1. IGS RTS düzeltme yayınları (Int Kyn. 1).

IP port	Yayın	GNSS	Mesaj (*)	Referans	Analiz Merkezi
products.igs-ip.net:2101	IGS01	GPS	1059,1060	ITRF2008	ESA
products.igs-ip.net:2101	IGS03	GPS GLO	1057,1058,1059 1063,1064,1065	ITRF2008	BKG
products.igs-ip.net:2101	CLK91	GPS GLO	1059,1060 1065,1066	ITRF2008	CNES
products.igs-ip.net:2101	CLK70	GPS	1059,1060	ITRF2008	GFZ

(*) 1057/1063: GPS/GLONASS yayın efemerisi için yörünge düzeltmesi; 1058/1064: GPS/GLONASS yayın efemerisi için saat düzeltmesi; 1059/1065: GPS/GLONASS için kod sapma değerleri

SSR mesajları, içerdikleri veri ve temsil ettikleri uydu sistemine bağlı olarak benzersiz mesaj isimleri ile tanımlanmışlardır (Tablo 1). Bu düzeltmelerden, CNES tarafından yayınlanan CLK91; diğer yayınlardan farklı olarak, tamsayı saati algoritması (Laurichesse and Mercier, 2007) ile tamsayı faz belirsizliğine neden olan uydu ve alıcı kaynaklı sapmaları kestirebilen bir PPP çözümün yan ürünüdür. Bu ürünleri kullanan RT PPP çözümleri, kullanmayan RT PPP çözümlerine göre cm mertebesindeki konum doğruluğuna daha çabuk yakınsamaktadır. CORS ağları yardımıyla kestirilen yörünge verileri, Yer Merkezli İnertiyel sistemi (Earth Centered Inertial - ECI) içinde ifade edilmektedir. Düzeltmelerin getirileceği yayın efemerisi ise Yer Merkezli Yer Sabit (Earth Centered Earth Fixed - ECEF) bir sistemde tanımlanmıştır, bu nedenle RT düzeltmelerin ECEF'e dönüştürülmesi gerekmektedir (Weber et al. 2016). Üç boyutlu uydu yörünge bileşenleri için getirilen düzeltmeler matris formunda ifade edilebilir:

$$\begin{bmatrix} \Delta_{along} \\ \Delta_{cross} \\ \Delta_{radial} \end{bmatrix}_{T, ECI} = \begin{bmatrix} \Delta_{along} \\ \Delta_{cross} \\ \Delta_{radial} \end{bmatrix}_{T_0, ECI} + \begin{bmatrix} \hat{\Delta}_{along} \\ \hat{\Delta}_{cross} \\ \hat{\Delta}_{radial} \end{bmatrix} (T - T_0). \quad (7)$$

Eşitliğin sol tarafı, inertiyel sistemde uydu yörüngesi boyunca (along), uydu yörüngesi doğrultusuna dik (cross) ve uydu ve Dünya yer merkezini birleştiren doğrultu boyunca (radial) getirilen düzeltmeleri, sağ

tarafındaki ilk terim, T_0 anındaki düzeltmeleri, ikinci terim ise zamansal düzeltme oranlarını temsil etmektedir. ECEF üzerinden hesap yapabilmek için IERS (Petit and Luzum, 2010) konvansiyonları içinde tanımlanan dönüşüm matrisi (R) aracılığıyla dönüşüm gerçekleştirilir ve Uluslararası Yersel Referans Sisteminde (International Terrestrial Reference Frame - ITRF2008) düzeltmeler hesaplanır:

$$\begin{bmatrix} \Delta_{along} \\ \Delta_{cross} \\ \Delta_{radial} \end{bmatrix}_{T, ECEF} = R \times \begin{bmatrix} \Delta_{along} \\ \Delta_{cross} \\ \Delta_{radial} \end{bmatrix}_{T, ECI}. \quad (8)$$

Bulunan ECEF düzeltmeleri, ilgili epoktaki (T) yayın efemerisine (Broadcast - BRD) eklenerek uydu koordinatları, belirtilen T epogu ve kartezyen dik koordinat sisteminde (X, Y, Z) bulunabilmektedir:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{T, ECEF} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{T, BRD} - \begin{bmatrix} \Delta_{along} \\ \Delta_{cross} \\ \Delta_{radial} \end{bmatrix}_{T, ECEF}. \quad (9)$$

RT servisler aracılığıyla sağlanan saat değerleri:

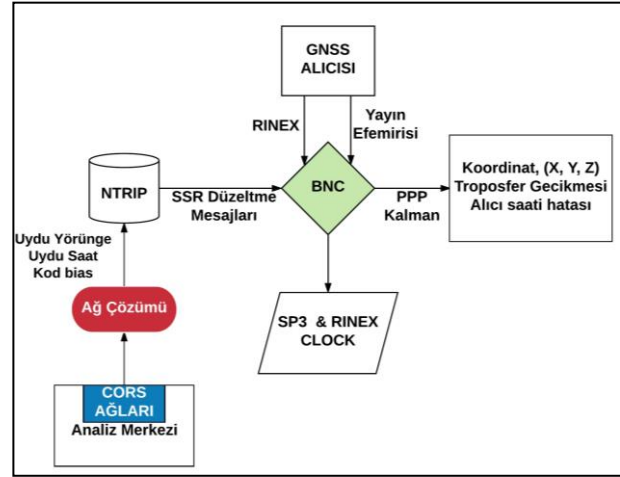
$$dt_{SSR}^s = dt^s + \gamma Clk / c \quad (10)$$

$$\gamma Clk = C_0 + C_1(t - t_0) + C_2(t - t_0)^2$$

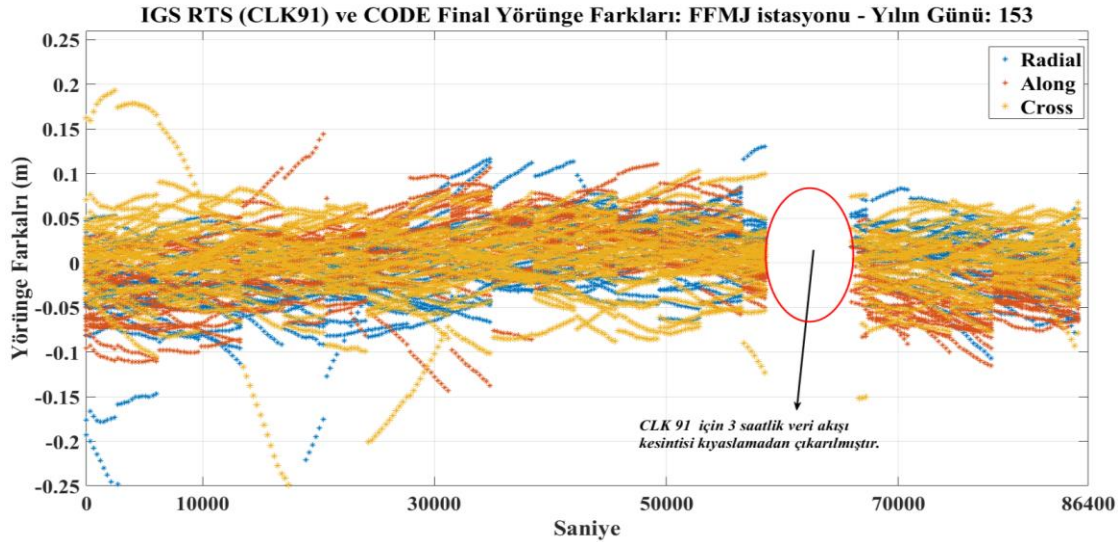
eşitliği ile verilmektedir. Burada γClk , C_0 , C_1 ve C_2 saat düzeltmesi katsayıları ile hesaplanan RT saat düzeltmesini, dt^s , yayın efemerisinde okunan saat

değerini, dt_{SSR}^s ise düzeltme getirilmiş yayın efemeris saatine karşılık gelmektedir. Saat düzeltmesi mesajı içinde referans alınan saat değeri, t_0 , ölçme epoğu ise t ile ifade edilmiştir. IGS RTS, sağladığı RT veriler ile birlikte RT PPP çözümlerini gerçekleştirmek amacıyla BKG NTRIP Client (BNC v2.9) yazılımını geliştirmiştir (Weber et al. 2016). BNC, sunucu-istemci mimarisine göre tasarlanmış olup kullanıcılardan gelen talepler doğrultusunda gelen SSR mesajlarını, ilgili uydular için yayın efemerisini ve ilgili istasyon için RINEX gözlem dosyalarını tek bir platformda toplayarak RT PPP çözümünü KF ile gerçekleştirebilmektedir. Düzeltme getirilen yayın efemerisi, hassas efemeris (standard product 3 - sp3 ve RINEX Clock - clk) formatına dönüştürülmektedir. Şekil 2’de BNC ortamında

gerçekleşen RT PPP çözümü için işleyen süreçler resmedilmiştir.



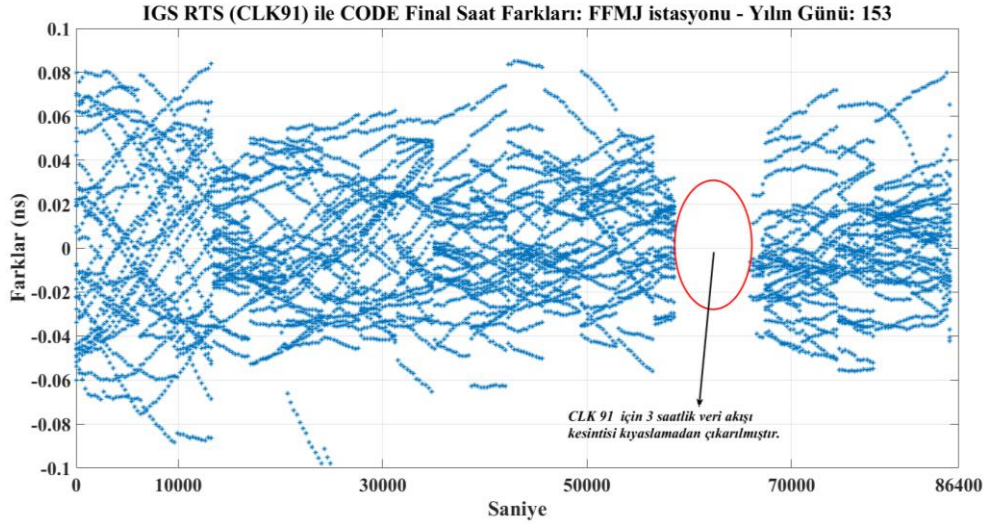
Şekil 2. GNSS Alıcısı ve BNC ile RT PPP çözümü.



Şekil 3. IGS RTS (CLK91) ve CODE Final hassas efemeris ürünleri arasındaki Along - Track, Cross - Track ve Radial yönlü farklar.

IGS RTS ile üretilen hassas efemeris ve saat bilgisi ürünlerinin güvenilirliği, doğruluğu yörünge için 2.5 cm, saat için 75 pikosaniye (ps) olan ve referans olarak kabul edilen Center for Orbit Determination in Europe (CODE) analiz merkezinin Final ürünleri ile kıyaslanmıştır. Şekil 3’de 2013 yılı 153. gün için IGS RTS (CLK91) ve CODE Final yörüngeleri (along, cross ve radial) arasındaki konum farkları metre cinsinden gösterilmiştir. Aynı gün ve aynı uydular için gözlemlenmiş saat farkları ise “ns” cinsinden Şekil 4’de verilmiştir. 2013 yılının 150. ve 157. günleri arasında 1 hafta boyunca gerçekleşen gözlemler sonucu, her iki sistemdeki 31 GPS uydusu

karşılaştırılmıştır. 7 gün ortalamaları sonunda: iki efemeris verisinin yörüngedeki 3 boyutlu konum farkları ortalama 4.2 cm, farkların karesel ortalama hata (KOH) değeri 4.9 cm; saat farklarının ortalaması 0.36 ns (≈ 0.1 m), saat farklarının KOH değeri 2.62ns (≈ 0.78 m) bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar ve IGS URP ürünlerinin varsayılan doğrulukları (yörünge: 5 cm; saat: 3 ns) (Kouba 2009) dikkate alındığında, IGS RTS uydü yörünge ve saatlerinin, IGS URP (kestirilen) ürünlerine göre daha hassas ve doğru olduğu, CODE Final değerlerine daha yakın doğrulukta sonuçlar vermelerinden anlaşılmaktadır.



Şekil 4. IGS RTS (CLK91) ve CODE Final saat farkları

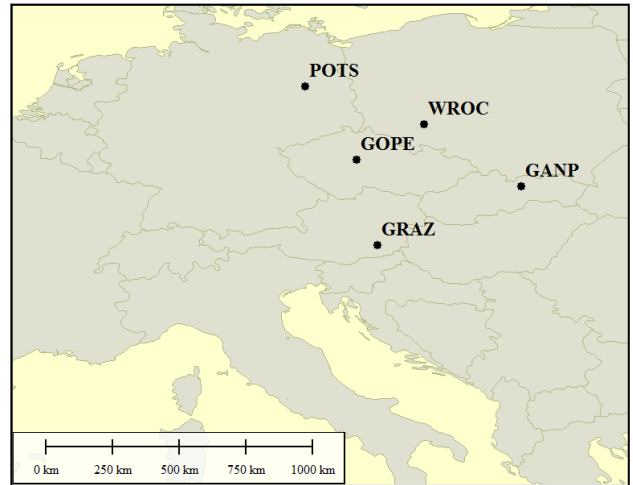
IGS RTS bünyesindeki analiz merkezleri troposfer gecikmesi değerlerini de kestirmekte ve bu değerleri Solution Independent Exchange (SINEX) formatında kullanıcılara sağlamaktadır. Troposfer gecikmesi hesaplanırken, öncül troposfer modeli Saastamoinen (1972) ile hesaplanmakta, ihtiyaç duyulan meteorolojik veriler de normal şartlar altındaki (N.Ş.A) standart atmosfer değerlerine göre Berg (1948) eşitliklerini kullanarak bulunmaktadır:

$$\begin{aligned} P &= P_{ref} \cdot (1 - 0.0000226 \cdot (h - h_{ref}))^{5.225} \\ T &= T_{ref} - 0.0065 \cdot (h - h_{ref}) \\ H &= H_{ref} \cdot e^{-0.0006396(h - h_{ref})} \end{aligned} \quad (11)$$

Eşitliklerde basınç (P - millibar), sıcaklık (T - Celsius) ve bağıl nem (H - %) değerleri ölçme yapılan istasyon yüksekliğine göre değişim göstermektedir. P_{ref} , T_{ref} ve H_{ref} sırasıyla 1013.25 millibar, 18° Celsius ve % 50 nem oranı ile tanımlanmıştır. Referans yüksekliği (h_{ref}) ise 0 metredir. Bu yaklaşım ile hesaplanan öncül troposfer, gerçek atmosfer koşullarına yeterli hassasiyette yaklaşamamakta ve takip eden süreçte KF ile kestirimi yapılan ve öncül troposfere getirilecek düzeltmeyi temsil eden ZWD değerini de etkilemektedir. Bununla birlikte, kuru ve ıslak gecikmeler için zenit açısının (z) bir fonksiyonu olarak tek bir izdüşüm fonksiyonunun ($\Delta trop / \cos(z)$) tercih edilmesi, kestirimi yapılan toplam troposfer gecikmesinin gerçek atmosferden sapmalar göstermesine neden olacaktır.

4. Uygulama: RT PPP ile Atmosferik Su Buharı Değişimlerinin İzlenmesi

Atmosfer hareketlerinin RT izlenmesi amacıyla 5 IGS istasyonunda 3 hafta süren RT PPP oturumları gerçekleştirilmiştir. Kullanılan IGS ve Radyosonda istasyonlarının isimleri ve coğrafi konumları şekil 5 ve tablo 2'de verilmiştir. Çözümde kullanılan 30 saniye aralıklı gözlem verilerini içeren RINEX v3.0 dosyaları ilgili istasyonlar için BKG Analiz Merkezi aracılığıyla oturum boyunca anlık olarak sunucudan çekilmiştir. Çözümler, BERNESE v5.2 (Dach et al. 2015) ve MatLab (Int Kayn. 2) ortamlarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. RT PPP gözlemlerinin gerçekleştiği IGS istasyonları.

Tablo 2. RT PPP ve Radyosonda gözlemlerinin gerçekleştiği istasyonlar.

İst.	Enlem(°)	Boylam(°)	Elip.Yük (m)
------	----------	-----------	--------------

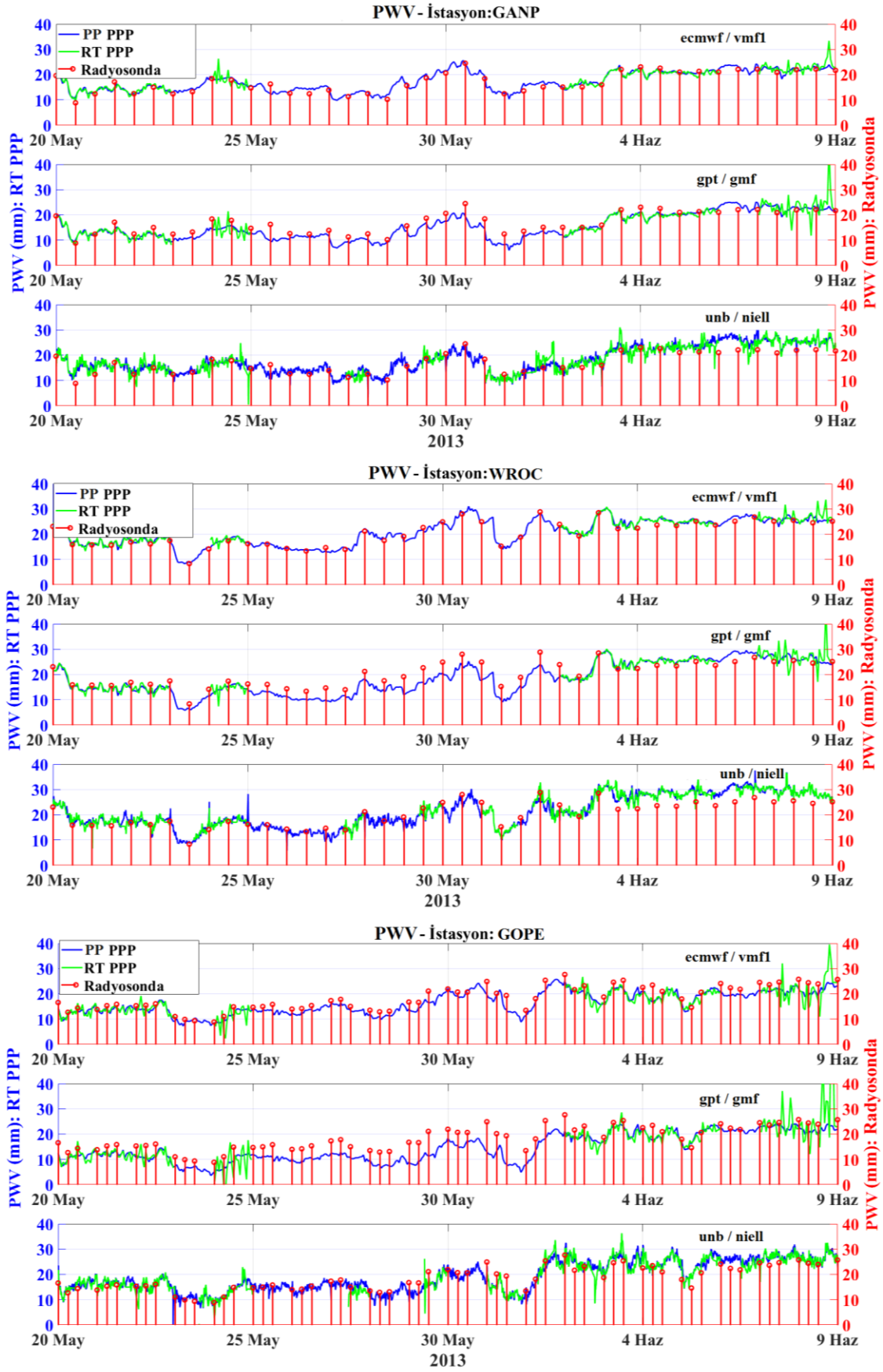
IGS			
wroc	51.1	17.0	181.0
ganp	49.0	20.3	745.2
gope	49.9	14.7	592.6
graz	47.0	15.4	538.3
pots	52.3	13.0	144.4
Radyosonda			
Wroclaw	51.1	16.8	119.6
Ganovce	49.0	20.3	703.0
Praha	50.0	14.4	302.0
Graz	46.9	15.4	340.0
Lindenberg	52.2	14.1	112.0

CLK91 ve IGS03 mesajlarından gelen düzeltmelerin ağırlıklı (CLK91: 0.6, IGS03: 0.4) ortalaması alınarak, 5 dakika örnekleme aralıklı hassas yörünge dosyası (sp3); sadece CLK91'den gelen saat düzeltmeleri ile de 30 saniye aralıklı hassas RINEX Saat dosyası oluşturulmuştur. BNC v2.9 ile gerçekleştirilen RT PPP çözümlerinden farklı olarak bu çözümde, IERS konvansiyonlarına (Petit and Luzum, 2010) uygun olarak nutasyon etkisi (IAU2000R06), kutup gezinmeleri (IERS2010XY), katı yer gelgitleri, okyanus yüklemeleri ve atmosferik yüklemeler dikkate alınmıştır. Oturumlarda sırasıyla GPT / GMF, UNB / Niell ve VMF1 troposfer model yaklaşımları için ayrı ayrı çözümler gerçekleştirilmiş, farklı model seçiminin kestirimlere olan etkileri izlenmiştir. Öncül (a priori) troposfer gecikmesi (ZHD), analitik (GPT, UNB) modellerden türetilen meteorolojik verileri kullanarak Saastamoinen (1972) ile hesaplanmıştır. ZWD, 1 saatlik aralıklarla, gradyenler ise (G_N, G_E) 2 saat arayla EKK ile çözüm denkleminde kestirilmiştir. Bevis et al. (1992) eşitliği (6) ile ZWD ve PWV arasındaki dönüşüm sağlanmış, eşitlikte sabit parametreler dışında gerekli olan ortalama su buharı sıcaklığı T_M , yakın konumlu Radyosonda gözlemlerinden aşağıda gösterilen eşitlik (Bevis et al. 1992) ile üretilmiştir:

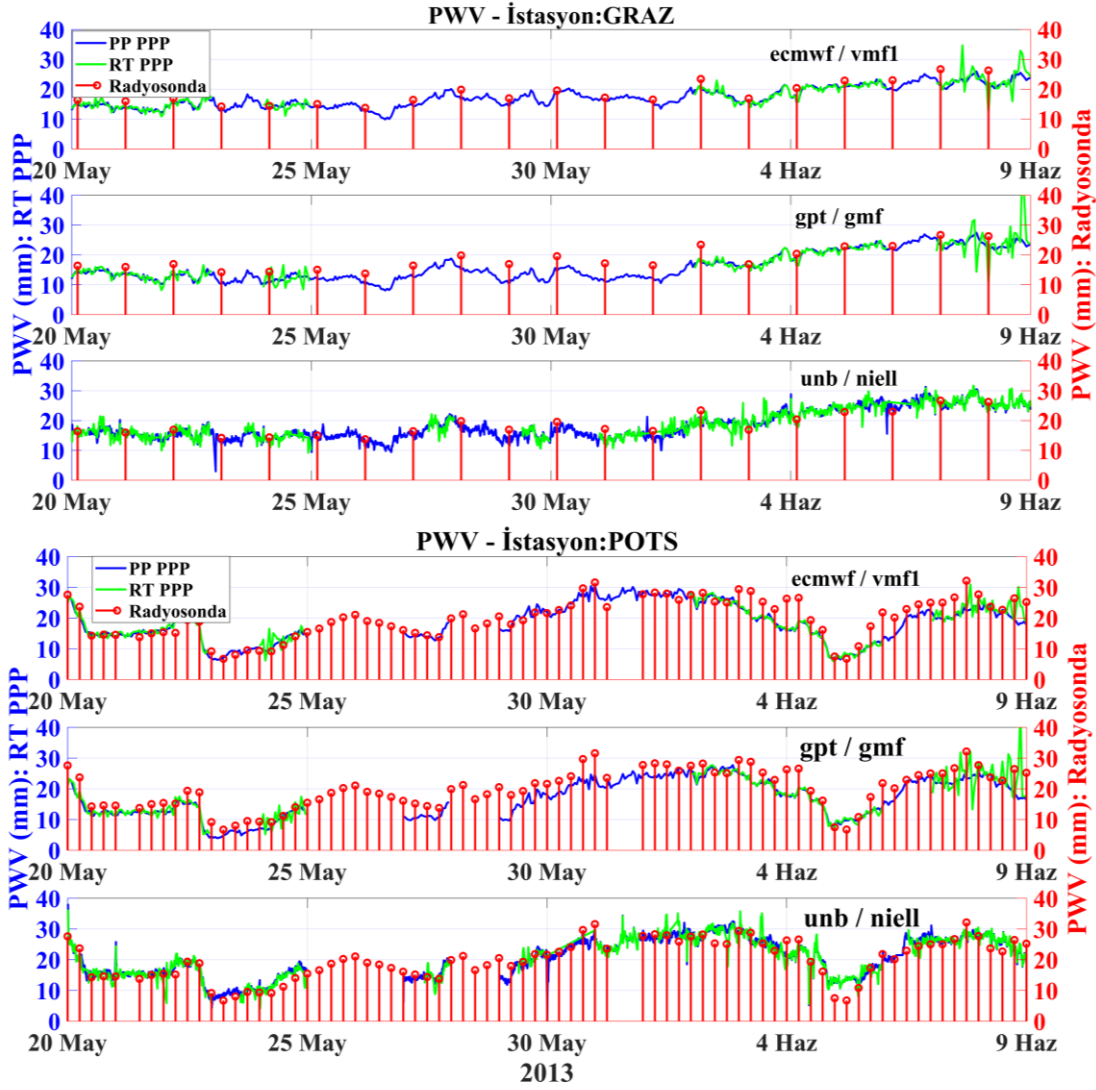
$$T_M = \frac{\int_s^\infty \frac{e}{T} ds}{\int_s^\infty \frac{e}{T^2} ds} \quad (12)$$

Radyosonda verileri, Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi (NOAA) – Küresel Radyosonda arşivinden

(IGRA) ilgili günler için sağlanmış, seçilen istasyonlardan günde en az iki kez uçuş gerçekleştirilmesine dikkat edilmiştir. Balonda bulunan algılayıcılarda kayıt edilen basınç, sıcaklık ve su buharı kısmi basıncı okumaları kullanılarak (Bevis et al. 1992) PWV değerleri hesaplanmıştır. IGS istasyonları ve Radyosonda istasyonlarının farklı yüksekliklerde olmasından kaynaklanan troposfer gecikme etkileri, Saastamoinen (1972) ve GMF (Boehm et al. 2006b) kullanılarak hesaplanmış ve bu fark GNSS gözlemlerinden indirgenmiştir. Radyosonda verisine ek olarak, gözlemlerden yaklaşık 13 gün sonra yayınlanan IGS Final uydu yörünge ve saat verilerini (KOH: 2.5 cm / 75.0 ps) kullanan RT PPP çözümlerinden kestirilen PWV değerleri, RT PPP sonucunda bulunan su buharı değerleri için referans olarak kullanılmıştır. Şekil 6'da gösterilen ve gözlem yapılan 5 IGS istasyonunda gözlemlenen PWV değişimlerini temsil eden grafikten de görülebileceği üzere; VMF1 troposfer modelini çözümünde kullanan RT PPP oturumları, Radyosonda verisine en yakın sonuçları sağlamıştır. GANP istasyonu için RT PPP (VMF1) çözümü ile Radyosonda çözümü arasında hesaplanan 0.45 mm ortalama fark ve 2.9 mm'lik standart sapma değeri, gözlemler boyunca tespit edilen en hassas değerlerdir. En büyük standart sapma, WROC istasyonu ve UNB modeli için 4.55 mm olarak gözlemlenmiştir. Çözümlerinde, VMF1 troposfer modelini kullanan RT PPP oturumlarından türetilen PWV değerleri ile radyosonda verilerinden türetilmiş PWV değerleri arasında 5 istasyonda gözlemlenen ortalama farklar: -0.45 mm (WROC) ile 3.31 mm (GRAZ) arasında değişim göstermektedir. Benzer farklar, GPT/GMF modelini çözümünde kullanan RT PPP oturumları için 1.69 mm (WROC) ile 3.03 mm (POTS) arasında; UNB / Niell modelini kullanan RT PPP çözümleri için ise -0.41 mm (GANP) ile 1.53 mm (GRAZ) arasında gözlemlenmiştir. Radyosonda ile uyumu en iyi olan çözümler VMF1 modeli ile elde edilen PWV değerleri için gözlemlenmiştir. Radyosonda ile türetilmiş PWV değerlerine göre en büyük sapma ise UNB / Niell kullanan RT PPP oturumları ile elde edilen PWV değerleri için gözlemlenmiştir.



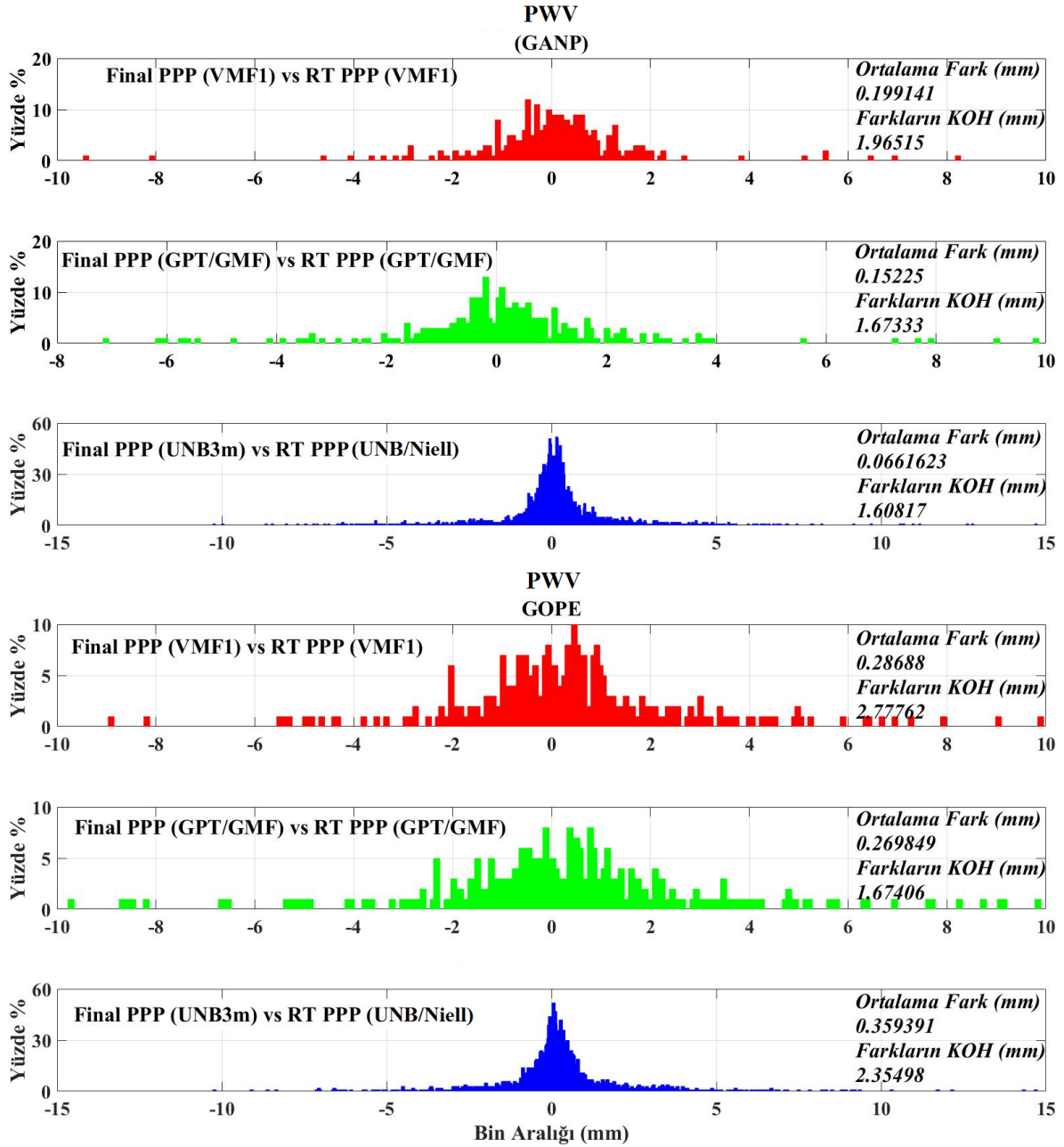
Şekil 6. GANP, WROC, GOPE, GRAZ ve POTS IGS istasyonları için RT PPP, PP PPP ve yakın konumlu Radyosonda gözlemleri sonucu kestirilen PWV karşılaştırması.



Şekil 6 (Devam). GANP, WROC, GOPE, GRAZ ve POTS IGS istasyonları için RT PPP, PP PPP ve yakın konumlu Radyosonda gözlemleri sonucu kestirilen PWV karşılaştırması.

Tablo 2’de verilen GNSS istasyonlarında 3 haftalık zaman periyodu (20 Mayıs – 10 Haziran, 2013) için hem RT PPP hem de PP PPP oturumları gerçekleştirilmiş, GPT / GMF, UNB / Niell ve ECMWF / VMF1 troposfer model yaklaşımlarının üçü de oturumlarda sırasıyla kullanılmıştır. RT PPP ve PP PPP çözümleri ile kestirilen PWV değerleri arasındaki farklar ve bu farkların KOH değerleri hesaplanmıştır. Şekil 7’de bu istasyonlardan GANP ve GOPE istasyonlarına ait hesaplanan farkların dağılım bar grafiği gösterilmiştir. Aynı ölçme tekniği (PPP) ve aynı ölçme konfigürasyonlarını kullanan ve sadece çözümde kullanılan atmosfer model yaklaşımı farklılık gösteren oturumların kıyaslanması (intra-teknik karşılaştırma) sonucu; analitik modeller (GPT, UNB) ile çözüme giden PPP oturumlarının (PP ve RT)

PWV kestirimleri birbirine daha yakındır. ECMWF analizleriyle 6 saatte bir yayınlanan meteorolojik verileri (VMF1 küresel grid) çözümde kullanan PPP kestirimleri (PP ve RT) arasındaki ortalama farkların ve farkların sapmalarının analitik modellerden daha fazla olduğu görülmüştür. 5 IGS istasyonu ve üç ayrı troposfer yaklaşımı için yapılan kıyaslama sonucu, ortalama kestirim farkları 0.05 mm ile 0.36 mm arasında; farkların KOH değerleri de 1.17 mm ile 2.77 mm arasında değişim göstermektedir. Şekil 7’de PWV fark dağılımları grafik olarak gösterilmeyen POTS, GRAZ ve WROC istasyonları için KOH değerleri, analitik model kullanan PPP oturumları için 1.15 mm ile 1.74 mm aralığında iken, VMF1 kullanan PPP oturumlarında bu değerler 1.8 mm ile 2.0 mm aralığındadır.



Şekil 7. GANP (üst) ve GOPE (alt) IGS istasyonları için RT PPP ve PP PWV kestirimleri farklarının dağılımları; her çözüm GPT/GMF, UNB/Niell ve ECMWF/VMF1 için ayrı ayrı tekrarlanmıştır.

Bu sonuçlara göre; benzer ölçme koşulları ve aynı zaman dilimlerinde yürütülen ve aynı analitik modeli (GPT veya UNB) kullanan RT ve PP PPP çözümleri, birbirine daha yakın su buharı kestirimleri vermiştir. Benzer bir durum; GPT / GMF model yaklaşımı ile IGS Analiz merkezleri tarafından 4 haftalık bir gecikmeyle yayınlanan ve hassasiyeti yaklaşık 5 mm olan IGS Final Troposfer (Zenith Path Delay - ZPD) ürünlerinde de görülebilir. Sağladığı doğruluk pratikte ECMWF/VMF1'den daha düşük olmasına rağmen GPT/GMF ile troposfer kestirimi yapan PPP

oturumlarının, IGS Final Troposfer ZPD değerleri ile daha uyumlu olduğu gözlenmektedir.

5. Sonuç

IGS Gerçek Zaman Servisi (IGS RTS) kullanıcıları, Nisan 2013'ten bu yana yayın efemerisine RT uydu yörünge ve saat düzeltmelerini getirebilmektedir. RTCM SSR formatındaki bu düzeltmeleri kullanarak RT hassas yörünge (sp3) ile hassas saat (rinex clock) ürünleri üretilebilmekte ve hassas RT PPP

oturumları yapılabilmektedir. RT PPP çözümlerinde arandığı doğruluğun önündeki en büyük engel olan tamsayı faz belirsizliği, CORS gibi ağ çözümleri sonucunda kestirilen uydu ve alıcı kaynaklı donanımsal sapmaların çözüm denklemlerinden indirgenmesi ile kısmen giderilebilmekte, hassas çözüme ulaşmak için geçen süre olan yakınsama süresi kısalmaktadır. CLK91 içeriğindeki mesajlar, yakınsama süresini azaltmak için geliştirilen bir Kalman Filtresi aracılığıyla kestirilen uydu efemeris düzeltmeleri ile uydu ve alıcı kaynaklı sapmaları yayınlamaktadır. Bu yayın ile taşıyıcı faz belirsizliği kısmen giderilmekte ve RT PPP için görülen uzun yakınsama süreleri kısalmaktadır. Bu çalışmada; hava olaylarının temelini oluşturan, zamansal ve mekânsal değişkenliği yüksek su buharı hareketleri GNSS ölçme teknikleri ile RT izlenmiştir. Bu kapsamda, IGS03 (float) ve CLK91 (fixed) yayınlarından gelen düzeltmeleri kullanan RT PPP oturumları ile ZWD değerleri kestirilmiş, PWV değerleri bu kestirim değerlerinden türetilmiştir. RT PPP PWV, yakın konumlu Radyosonda istasyonlarının okumaları ile kıyaslanmıştır. RT PPP oturumlarında üç ayrı troposfer model yaklaşımı (ECMWF / VMF1, GPT / GMF, UNB / Niell) için bağımsız çözümler gerçekleştirilmiş, farklı model ve fonksiyonların kestirimlere olan etkisi incelenmiştir. 5 IGS istasyonunda gerçekleşen RT PPP oturumlarından, ECMWF / VMF1 ile troposferi modelleyen çözümlerin, Radyosonda verileri ± 2 mm (KOH: 3.30 mm) aralığında uyumlu olduğu, tüm çözümler için Radyosonda ile olan farkların ortalama 4 mm'den küçük olduğu gözlemlenmiştir. En büyük sapmalar, UNB modelini kullanan oturumlarda tespit edilmiştir. Radyosonda ile 5 mm aralığında uyum gösteren RT PPP kestirimleri, sayısal hava modelleri analizlerinde girdi verisi olarak kullanılabilmesi için gerekli olan hassasiyeti göstermiştir. İkinci uygulamada, RT PPP kestirimleri ile doğruluğu yüksek IGS Final uydu yörünge ve saatlerini kullanan PP PPP kestirimleri karşılaştırılmıştır. Analitik GPT / GMF ve UNB / Niell modellerini kullanan RT PPP oturumları aynı modelleri kullanan PP PPP oturumları ile daha iyi uyum sağlamıştır. VMF1'i kullanan RT ve PP çözümler arasındaki sapma değerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Teşekkür

Bu makale Engin Tunalı'nın "Monitoring Tropospheric Water Vapor Variations with PPP During Severe Weather" başlıklı doktora tez çalışması kapsamında üretilmiştir. Öncelikle bu çalışmayı önerileri ve yorumları ile zenginleştiren değerli hakemlere teşekkürü borç bilirim. Sonuçların değerlendirilmesinde destek sağlayan Hacettepe Üniversitesi Geomatik Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Sayın Yrd. Doç. Dr. Kamil Teke'ye katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Kaynaklar

- Berg, H., 1948. Allgemeine Meteorologie. Dummler's Verlag, Bonn.
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Anthes, R., Rocken, C., Ware, R. H., 1992. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system, *Journal of Geophysical Research* (D), **97**, 15787–15801.
- Bevis, M., Businger, S., Chiswell, S., Herring, T. A., Anthes, R. A., Rocken, C., Ware, R. H., 1994. GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water. *Journal of Applied Meteorology*, **33**(3):379–386, doi: 10.1175/15200450(1994)033<0379:GMMZWD>2.0.O;2.
- Bisnath, S., Gao, Y., 2008. Current State of Precise Point Positioning and Future Prospects and Limitations. *Observing Our Changing Earth*, 615–623. doi: 10.1007/978-3-540-85426-5_71.
- Boehm, J., Niell, A., Tregoning, P. and Schuh, H., 2006a. Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophysical Research Letters*, Vol. **33**.
- Boehm, J., Werl, B., Schuh, H., 2006b. Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from european centre for medium-range weather forecast operational analysis data, *Journal of Geophysical Research*, **111**, (B02):406. doi:10.1029/2005JB003629.
- Boehm, J., Heinkelmann, R., Schuh, H., 2007. Short Note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications. *Journal of Geodesy*, Vol. **81**, 679–683.

- Böhm, J., Möller, G., Schindelegger, M., Pain, G., Weber, R., 2015. Development of an improved blind model for slant delays in the troposphere (GPT2w), *GPS Solutions*, **19**:3, 433 – 441. doi:10.1007/s10291-014-0403-7.
- Chen, K. and Gao, Y., 2005. Real-Time Precise Point Positioning Using Single Frequency Data. Proceedings of ION GNSS-2005, September 2005, Long Beach, CA, 1514-1523.
- Dach, R., Lutz, S., Walser, P., Fridez, P., (Eds); 2015: Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual, Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publishing. DOI: 10.7892/boris.72297; ISBN: 978-3-906813-05-9.
- Dee, D., et al., 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **137**, 553–597, doi:10.1002/qj.828
- Gao, Y., Chen, K., Shen, X., 2003. Real-Time Kinematic Positioning Based on Undifferenced Carrier Phase Data Processing. Proceedings of ION NTM-2003, Jan.22 - 24, 2003, Anaheim, California, 362-368.
- Kouba, J. and Héroux, P., 2001. *GPS Solutions* **5**: 12. <https://doi.org/10.1007/PL00012883>.
- Kouba, J., 2009. A Guide to using International GNSS Service (IGS) products, Natural Resources Canada, <http://igscb.jpl.nasa.gov/components/usage.html> (accessed November, 2017).
- Laurichesse, D. and Mercier, F., 2007. Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and Its Application to PPP. Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division, Institute of Navigation (GNSS 2007). Fort Worth, TX, USA.
- Leandro, R.F., Santos, M. C. and Langley, R. B., 2006. UNB neutral atmosphere models: Development and performance. In National Technical Meeting of The Institute of Navigation, Monterey, California, 18–20 January, 564–573.
- Niell, A., 1996. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *Journal of Geophysical Research*, **101**(B2):3227–3246. doi: 10.1029/95JB03048.
- Petit, G. and Luzum, B., 2010. IERS conventions 2010, IERS Technical Note; **36**. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, ISBN 3-89888-989-6.
- Rocken, C., Van Hove, T., Ware, R., 1997. Near real-time GPS sensing of atmospheric water vapor. *Geophysical Research Letters* **24**: doi: 10.1029/97GL03312. issn: 0094-8276.
- Saastamoinen, J., 1972. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites, The use of artificial satellites for geodesy, *Geophysical Monograph Series*, **15**, 247–251.
- Tregoning, P., Boers, R., O'Brien, D. M., and Hendy, M., 1998. Accuracy of precipitable water vapour estimation from GPS observations, *Journal of Geophysical Research*, **103**, 28,901–28,910.
- Uppala, S. M., et al., 2005. The ERA-40 re-analysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **131**, 2961-3012. doi:10.1256/qj.04.176.
- Weber, G., Mervart, L., Stürze, A., Rülke, A. and Stöcker, D., 2016. BKG Ntrip Client, Version 2.12. *Mitteilungen des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie*, **49**, Frankfurt am Main.
- 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*, **102**. doi: 10.1029/96JB03860. issn: 0148-0227.

İnternet Kaynakları

1-<https://igs.bkg.bund.de/ntrip/orbits>, (19.10.2017)

2-<https://www.mathworks.com/help>, (19.10.2017)