Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi
Cilt: 6, No: 3, 2014 (32-39)

Electronic Journal of Map Technologies
Vol: 6, No: 3, 2014 (32-39)

TEKNOLOJİK ARAŞTIRMALAR

www.teknolojikarastirmalar.com
e-ISSN: 1309-3983

Makale
(Article)

Radyosonda ve GPS Verileri ile Elde Edilen Yoğuşabilir Su Buharı Değerlerinin Karşılaştırılması

Gökhan GÜRBÜZ*, Çetin MEKİK*, İlke DENİZ*, Szabolcs ROZSA**
*Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 67100 Zonguldak/TÜRKİYE
**Budapest University of Technology and Economics, Department of Geodesy and Surveying, Budapest/HUNGARY
gokhanngurbuz@gmail.com

Özet

GPS alıcıları taşınabilir, ekonomik ve hava koşullarından etkilenmeden ölçüm yapabildiğinden, hava tahmini için önem taşıyan yoğuşabilir (yağışa dönüşebilir) su buharı miktarı (PWV) ve toplam zenit gecikmesi (ZTD) belirlemede kullanılan değerli bir yöntemdir. GPS gözlemleriyle, radyosonda verilerinde olduğu gibi nem profili çıkartılamaz. Bununla birlikte, radyosondalar ile günde sadece iki kez ölçüm yapılabilirken, GPS ile sürekli ve otomatik olarak gözlem yapılabilmesi bir üstünlük kabul edilebilir. Bu sebeple GPS sinyalleri ile yoğuşabilir su buharı miktarı belirlenmesinde kullanılan troposferik gecikme modelleme yöntemleri sürekli olarak geliştirilmektedir. Troposferik modellerde olduğu gibi Global İzdüşüm fonksiyonu (GMF) ve Vienna İzdüşüm Fonksiyonu [1] (VMF1) gibi izdüşüm fonksiyonlarında da atmosferik parametrelere ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzde en yüksek doğruluklu zenit gecikmeleri bu iki izdüşüm fonksiyonu ile hesaplanabilmektedir. GMF ve VMF1 izdüşüm fonksiyonlarının yanı sıra Niell İzdüşüm Fonksiyonu da akademik çalışmalarda sık sık kullanılmaktadır. Geçmiş çalışmalarda radyosonda analiz algoritmasına dayanan ve toplam sekiz radyosonda istasyonundan altısına ait veriler değerlendirilerek Türkiye için yüzey sıcaklığı, ağırlıklı ortalama sıcaklık ve yoğuşabilir su buharı miktarını hesaplayan bir T_m modeli geliştirildi [2]. Bu çalışmada ise Ankara (GANM) ve İstanbul (GISM)'e kurulan sürekli ölçüm yapan GPS alıcılarından elde edilen veriler Niell İzdüşüm Fonksiyonu kullanılarak BERNESE v5.0 [3] yazılımından ve Global Basınç ve Sıcaklık (GPT) ampirik modeli ile [4] tarafından geliştirilen T_m modeli kullanan Gamit/GLOBK [5] yazılımı ile değerlendirilmiştir. Bu değerler, radyosonda analiz algoritmasının ve geliştirilmiş T_m modelinin doğruluğunu, güvenilirliğini gözlemlemek ve geliştirmek için, radyosonda analiz algoritmasından elde edilen değerler ve gerçek radyosonda değerleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, bu çalışmada kullanılan tüm değerlendirme yöntemleriyle PWV değerleri radyosonda doğruluğuna göre ±1-2 mm ile hesaplanmıştır. Bu sebeple çoğu Avrupa ülkesinde olduğu gibi Türkiye'de de PWV değerlerinin elde edilmesinde zamansal çözünürlük açısından daha güçlü olan GPS sisteminin kullanılmaya başlanması gerekmektedir. Algoritmanın ve Tm modelinin geliştirilmesi amacıyla değerlendirmeye katılmamış son iki radyosonda istasyonundan alınan veriler kullanılarak algoritma daha da güçlendirilecektir.

Anahtar Kelimeler: Radyosonda analiz algoritması, yoğuşabilir su buharı miktarı, izdüşüm fonksiyonu, Bernese v5.0

Comparison of Precipitable Water Vapor Values Retrieved from Radiosonde and Derived from GPS

Abstract

GPS receivers are an attractive source of total zenith delay (ZTD) and precipitable water vapor (PWV) data for weather prediction since they are portable, economic and provide measurements that are not affected by weather conditions. They cannot provide a humidity profile as radiosondes can, however they have the advantage of

Bu makaleye atıf yapmak için
Gürbüz G., Mekik Ç., Rozsa S., "Radyosonda ve GPS Verileri ile Elde Edilen Yoğuşabilir Su Buharı Değerlerinin Karşılaştırılması" Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi 2014, 6(3) 32-39

How to cite this article
Gürbüz G., Mekik Ç., Rozsa S.," Comparison of Precipitable Water Vapor Values Retrieved from Radiosonde and Derived from GPS" Electronic Journal of Map Technologies,2014, 6(3) 32 -39

producing automated continuous data as opposed to operational radiosondes usually providing two measurements in a day. Therefore, tropospheric delay modeling methods for estimating precipitable water vapor using GPS signals are being developed frequently in the world. As with all tropospheric models, mapping functions also need atmospheric parameters such as Global Mapping Function (GMF) and Vienna Mapping Function (VMF1). Today the tropospheric model with the highest accuracy can be computed with these two models. Apart from GMF and VMF1, Niell Mapping Function is also being often used in academic studies. In previous studies, a regional T_m model based on a radiosonde analysis algorithm [2] has been developed, and computes the surface temperature, the weighted mean temperature and precipitable water vapor using radiosonde data. In this study, PWV values obtained from radiosonde profiles and the ones derived from continuously operating GPS observations processed both with BERNESE v5.0 using Niell Mapping Function and Gamit/GLOBK using empirical model Global Pressure and Temperature (GPT) and T_m model developed by [4] are compared with the values computed from radiosonde analysis algorithm to improve the accuracy and reliability of the algorithm.

Keywords: Radiosonde analysis algorithm, precipitable water vapor, mapping function, Bernese v5.0

1. GİRİŞ

Radyo dalgalarının hız ve yönleri atmosferden geçerken, hem elektriksel olarak yüklü olan iyonosfer katmanı hem de elektriksel olarak nötr olan troposfer katmanı tarafından etkilemektedir. İyonosferin GPS sinyalleri üzerinde, serbest haldeki yüklü parçacıklardan dolayı saçıcı etkisi vardır ve bu nedenle iyonosferik refraksiyon frekansa bağımlıdır. Ancak, çift frekans kullanımı ile oluşturulan iyonosferden bağımsız kombinasyon aracılığı ile iyonosferik refraksiyon neredeyse tamamen giderilir [6]. Diğer yandan, yüksüz atmosferin saçıcı olmayan davranışından dolayı troposferik etki giderilemez. Troposferik yol gecikmesi; uydu-alıcı arasındaki troposferde, hızları ve yörünge eğrilikleri değişerek hareket eden mikrodalgaların yolu (optik yol) ile uydu-alıcı geometrik yolu (kiriş) arasındaki fark olarak tanımlanır [7]. Geçmiş çalışmalarda radyosonda analiz algoritmasına dayanan ve toplam sekiz istasyondan altı radyosonda istasyonuna ait veriler değerlendirilerek Türkiye için yüzey sıcaklığı, ağırlıklı ortalama sıcaklık ve yoğuşabilir su buharı miktarını hesaplayan bir T_m modeli geliştirildi [2]. Bu çalışmada ise Ankara (GANM) ve İstanbul (GISM)'e kurulan GPS alıcılarından elde edilen veriler, Niell İzdüşüm Fonksiyonu [8] kullanılarak BERNESE v5.0 yazılımından ve GPT (küresel basınç ve sıcaklık) ampirik modeli ile [4] tarafından geliştirilen T_m modeli kullanan Gamit/GLOBK yazılımı ile değerlendirilmiştir. Bu değerler, radyosonda analiz algoritmasının ve geliştirilen T_m modelinin doğruluğunu, güvenilirliğini gözlemlemek ve geliştirmek için radyosonda analiz algoritmasından elde edilen değerler ve gerçek radyosonda değerleri ile karşılaştırılmıştır.

2. TROPOSFERİK ZENİT GECİKMESİ ve YOĞUŞABİLİR SU BUHARI MİKTARI

2.1 Troposferik Zenit Gecikmesi

Troposferik toplam zenit gecikmesi, yüzey basıncının fonksiyonu olarak hidrostatik kısım ve sıcaklık ile su buharı dağılımına bağlı olan hidrostatik olmayan (ıslak) kısımdan oluşur.

Troposferik gecikmenin %90'lık bir bölümüne troposferin hidrostatik kısmı sebep olmaktadır. Deniz seviyesinde, zenit doğrultusundaki toplam troposferik gecikme 2,4 m civarındadır ve bu modellenmezse 5° yükseklik (eğim) açısında yapılan gözlemlerde yaklaşık 25 m'ye ulaşabilmektedir. Hidrostatik gecikmenin toplam gecikmeden çıkartılmasıyla, yoğuşabilir su buharı miktarıyla orantılı olan hidrostatik olmayan (ıslak) gecikme bulunur [9]. Atmosferik kolonun ağırlıklı ortalama sıcaklığının zayıf bir fonksiyonu olan boyutsuz orantı sabiti [10], [11] lineer bir bağıntı ile yüzey sıcaklığı ile ilişkilendirilebilir [4].

Geliştirilmiş troposferik yüzey modelleri, en çok orta ve uzun menzilli GPS baz gözlemleri için önemlidir. Kısa mesafeli bazlar için aşağıda bahsi geçecek tüm yüzey modelleri aynı sonuçları vermektedir [12]. Yüzey modellerinin değerlendirilmesi sonucu en önemli gelişmenin, düşük eğim açılı

gözlemlerin de uydu jeodezisi hesaplamalarına dâhil edilebilmesine izin vermesi olarak görülür. Bununla birlikte, düşük eğim açılı gözlemlerin kullanılması, zenit (başucu) doğrultusundaki troposferik gecikme düzeltmeleri ve istasyon yükseklikleri arasındaki kestirimlerin korelasyonlarını düşürürken aynı zamanda istasyonlar arası baz uzunluklarının tekrarlanabilirliğini artırmaktadır [12]. Bu sebeplerden dolayı, yüzey modelleri yüksek doğruluğa sahip jeodezik çalışmalar için çok önemlidir.

2.2 Yoğuşabilir Su Buharı Miktarı

Troposferik su buharı miktarının, kısa ve uzun periyotlarda, düşük maliyetle, doğru ve devamlı olarak sürekli GPS istasyonlarındaki verilerle elde edilebileceği gerçeği, sürekli GPS ağlarından yararlanarak iklim ve meteorolojik araştırmaları güncelleştirmiştir.

Zenit doğrultusundaki su buharının toplam miktarı aynı zamanda "yoğuşabilir su buharı" (PWV) olarak da adlandırılır. Bu değer, GPS gözlemlerinden kestirilebilen troposferik yol gecikmesiyle yaklaşık olarak orantılıdır. Yoğuşabilir su buharı miktarının GPS verilerinden belirlenmesi tekniğine "GPS Meteorolojisi" de denilmektedir [13]. Toplam troposferik zenit gecikmesi değerlerinden yoğuşabilir su buharının kestirilebileceği [4]'de gösterilmiştir. Toplam yoğuşabilir su buharı miktarı ile birlikte tüm profillerin elde edilmesi ve düşey tabaka bilgileri, meteorolojik modellerin ve hava tahmin araçlarının geliştirilmesinde daha büyük yarar sağlamaktadır [14]. Yüzey sıcaklığı (T_s) ile ağırlıklı ortalama sıcaklık (T_m) arasında kuvvetli bir korelasyon olduğu [4]'de kanıtlanmıştır. Radyosonda sıcaklık profillerinin değerlendirilmesi ile dengelenmiş yüzey sıcaklığı ve ağırlıklı ortalama sıcaklık değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler arasındaki;

$$T_m = a + bT_s \tag{1}$$

lineer bağıntısının katsayıları *a* ve *b* en küçük kareler yöntemiyle kestirilmiştir. Ağırlıklı ortalama sıcaklık T_m;

$$T_m = \frac{\int \frac{e}{T} ds}{\int \frac{e}{T^2} ds} \tag{2}$$

olarak tanımlanmaktadır (Bevis vd., 1985). Ağırlıklı ortalama sıcaklığın belirlenmesine yönelik çalışmalar devam etmektedir. ABD'lerinde, yaklaşık 9000 radyosonda profilinin değerlendirilmesinden;

$$T_m \cong 70.2 + 0.72T_s \tag{3}$$

olarak hesaplanmıştır.

3. UYGULAMA

Bu çalışmada TÜBİTAK-ÇAYDAG 112Y350 numaralı proje kapsamında Ankara (17130) ve İstanbul (17064) radyosonda istasyonlarının yakınlarına GPS ölçüm istasyonları için yeni galvanizli çelik pilyeler yaptırılıp proje kapsamında alınan GPS alıcıları üzerlerine yerleştirilmiştir (Şekil 1). Bu alıcılara ait veriler tüm kullanıcılara açık olup, http://gnssmet.beun.edu.tr/ sitesinden bu veriler indirilebilir.

Test alanı olarak özellikle İstanbul ve Ankara'nın seçilmesinin sebepleri, iklim farklılığı, denize kıyısı olma ve olmaması durumları ve değerlendirilmelerin yapıldığı Bülent Ecevit Üniversitesi'nin (Zonguldak) bu illere yakınlığı olarak sayılabilir. Bu yeni istasyonlardan (GISM, GANM) yararlanılarak, GPS verilerinden doğru ve güvenilir toplam zenit gecikmesi değerlerinin elde edilmesi için, bu

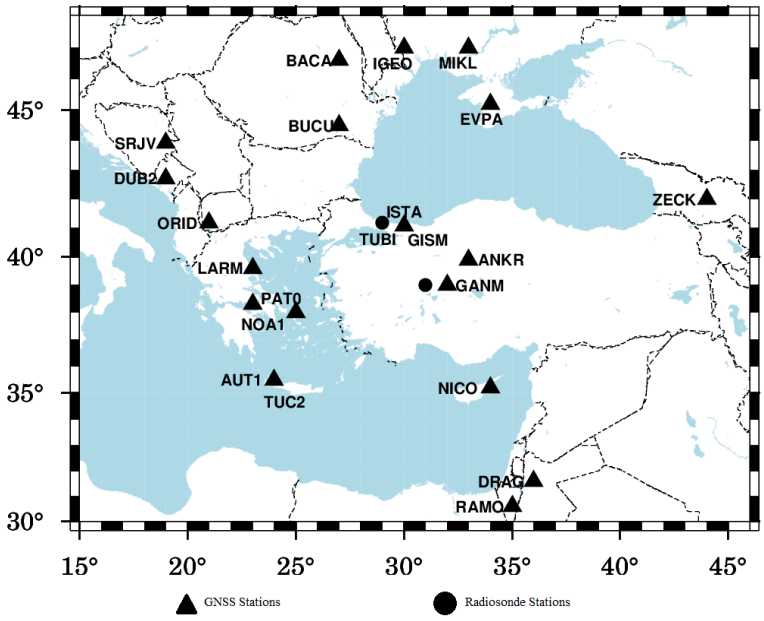
istasyonlar ile birlikte değerlendirilecek GPS ağının tasarımı önemlidir. Bu yüzden IGS, EUREF gibi yüksek dereceli sürekli ölçüm yapan istasyonlar içerecek biçimde bir GPS ağı tasarlanmıştır (Şekil 2). Bu ağda bulunan istasyonların isimleri aşağıdaki gibidir:

- IGS (Zeck, Onsa, Ramo, Mets, Ankr, Bucu, Drag, Gope, Ista, Mikl, Nico, Orid, Tubi, Yebe)
- EUREF (Aut1, Baca, Dub2, Duth, Igeo, Larm, Noa1, Pat0, Srjv, Tuc2, Cost)



Şekil 1. Çalışma kapsamında kurulan GPS alıcıları (Sol; GISM, Sağ; GANM)

Troposferik parametre kestiriminin doğruluğu, doğrudan nokta konum doğruluğu ile ilişkili olduğu için öncelikle oluşturulan ağdaki tüm noktaların koordinatları yüksek doğrulukla hesaplandı. Bu işlemlerde, koordinatların hesaplanmasının ardından referans kabul edilen istasyonların koordinatları sabit kabul edilerek troposferik parametre kestirimine geçildi. Böylelikle, bilinmeyen olarak kabul edilen koordinatlar denklemden çıkartılarak nokta konum ve troposfer bileşeni arasındaki korelasyon giderildi. Bu çalışmada 2013 yılının Kasım ve Aralık ve 2014 yılının Ocak ve Şubat aylarına ait toplam 120 günlük veri değerlendirilmiştir.



Şekil 2. Değerlendirmede kullanılan GPS ve radyosonda istasyonları

Bernese ve Gamit/GLOBK bilimsel yazılımları ile verilerin değerlendirilmesinde IGS istasyonlarının gözlem verileri http://sopac.ucsd.edu/ sitesinden yüklenmiştir (FTP sitelerinde oluşabilen hatalardan dolayı kimi zaman gözlem verileri ftp://igs.bkg.bund.de/ sitesinden de indirilmiştir). Değerlendirmede kullanılan parametreler Çizelge 1'deki gibidir.

Çizelge 1. Değerlendirmede kullanılan parametreler ve modeller

Değerlendirme parametreleri	Değerlendirme stratejileri
Giriş verileri (Gözlem, iyonosfer, efemeris dosyaları)	Günlük
Ağ yapısı	Maksimum ortak gözleme göre (Obs-Max*)
Uydu yükseklik (eğim) açısı	10˚
Veri toplama sıklığı	30 saniye
Yörünge	IGS hassas yörünge
İstasyon koordinatları	ITRF 2008 referans ağı (ölçme epoğu)
Anten faz merkezi kayıklıkları	PHAS_COD.I08**
İyonosfer	İyonosferden bağımsız lineer faz kombinasyonu (L3)
Sinyal belirsizlikleri	Kuazi-iyonosferden bağımsız (QIF) stratejisi
Öncül model***	Saastamoinen modeli ile kuru Niell izdüşüm fonksiyonu
İzdüşüm fonksiyonu	Islak Niell izdüşüm fonksiyonu (1 saat aralıklı)
ZTD kestirimleri	1'er saatlik dilimler

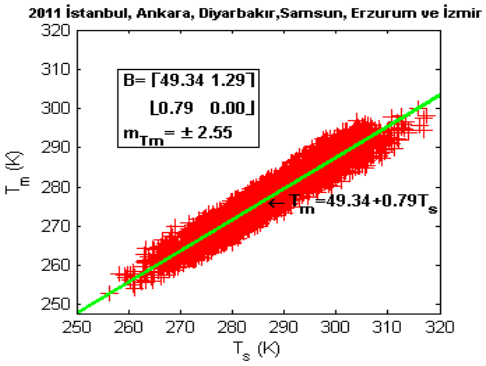
*Obs-Max stratejisinde ağdaki bazlar, kullanılan istasyonlara ait maksimum ortak gözlemlerin sayısına göre oluşturulur.
**Anten faz merkezi kayıklıklarını atx (anten bilgisi değişim formatı) formatında PHAS_COD.I08 dosyasında tutulur ve sık sık güncellenir.
*** Bernese 5.0 yazılımında troposfer modellemesi;

$$\Delta\varrho_k^i(t,A,z) = \Delta_{\varrho_{apr,k}}\left(z_k^i\right) + \Delta^h\varrho_k(t)f\left(z_k^i\right) \qquad (4)$$

formülü ile hesaplanır ve bu formüldeki $\Delta\varrho_k^i$ troposferik yol gecikmesini, $\Delta_{\varrho_{apr,k}}\left(z_k^i\right)$ terimi öncül modele göre eğik gecikmeyi, $\Delta^h\varrho_k(t)f\left(z_k^i\right)$ zenit yol gecikmesi ve ona bağımlı izdüşüm fonksiyonunu simgeler. Bu yüzden öncül model ve kuru izdüşüm fonksiyonu ile hidrostatik (kuru) gecikme hesaplanırken, ıslak gecikme ise ıslak izdüşüm fonksiyonları yardımıyla kestirilir.

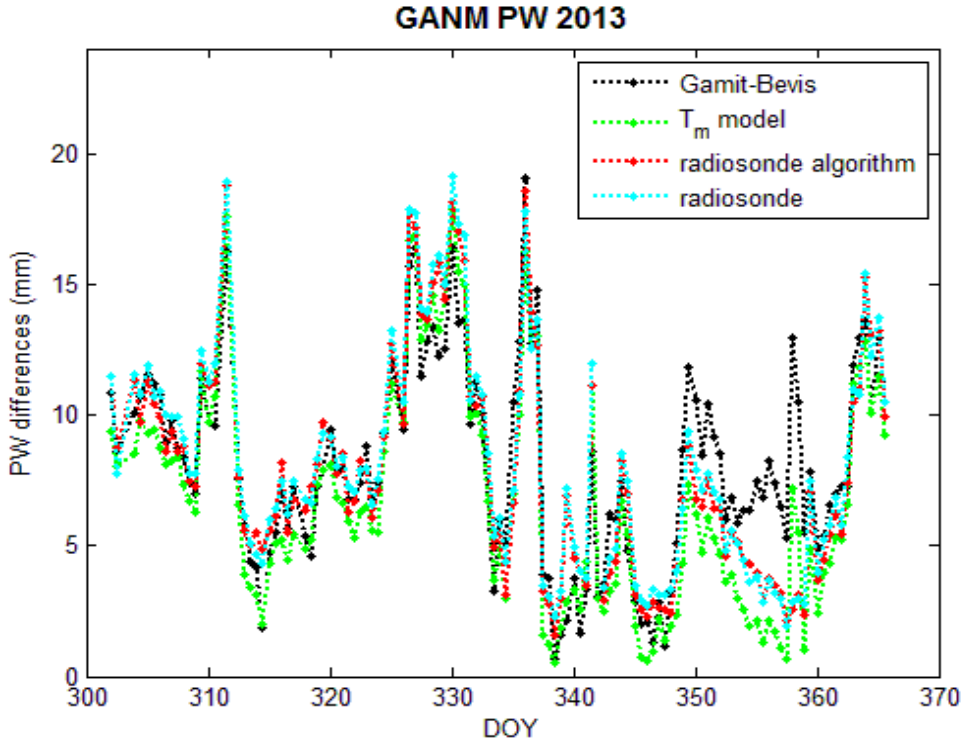
4. SONUÇLAR

Proje kapsamında da 6 radyosonda istasyonuna ait 3.000 radyosonda verisinin değerlendirmesi sonucunda ortalama ±2,55 K karesel ortalama hata ile ağırlıklı ortalama sıcaklık elde edilmiştir (Şekil 3). Bu T_s'den yararlanılarak oluşturulan T_m modelinden ve GPS ile elde edilen verilerden 2013 senesine ait (Şekil 4) 60 ve 2014 senesine ait (Şekil 5) 60 günlük değerlendirme ile elde edilen değerlerin gerçek radyosonda değerlerine çok yakın olduğu görülmektedir.

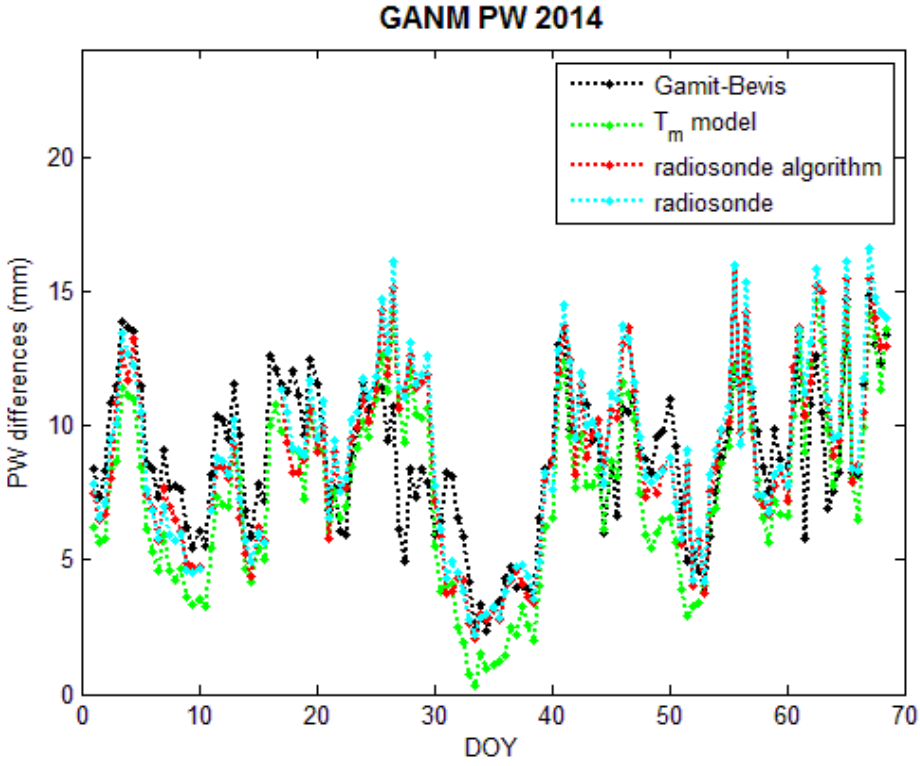


Şekil 3. Tm modeli

GPT kullanan Gamit/GLOBK yazılımı ve Niell izdüşüm fonksiyonu kullanan BERNESE v5.0 yazılımı ile değerlendirilmesinin ardından, T_m modeli [4] ile elde edilen değerlerin gerçek radyosonda değerlerine göre ±1-2 mm doğrulukla belirlenmiştir (Çizelge 2).



Şekil 4. GANM istasyonunun 2013 yılına ait değerlendirme sonuçları



Şekil 5. GANM istasyonunun 2014 yılına ait değerlendirme sonuçları

Şekil 4 ve Şekil 5'te görülen siyah çizgiler Gamit yazılımı kullanılarak elde edilen zenit gecikmelerinin belirlenmesinin ardından elde edilen PWV değerlerini simgelerken, kırmızı çizgiler radyosonda algoritmasından elde edilen değerleri temsil etmektedir. Açık mavi renkli çizgiler gerçek radyosonda verisinden elde edilen PWV değerlerini gösterirken, açık yeşil renkli çizgiler T_m modelini [2] temsil etmektedir. Aynı zamanda grafiklerin yatay eksenleri belirtilen yıllara ait yılın günlerini, düşey eksen ise milimetre cinsinden PWV değerlerini belirtmektedir.

Çizelge 2. 2013-2014 Değerlendirme sonuçları

2013 İstatistiği	Minimum	Maksimum	Ortalama
Gamit (Bevis T_m)	-10,13	5,09	0,05
Beu T_m Modeli	-4,36	4,37	1,43
R. Algoritması	-1,39	1,39	0,30
2014 İstatistiği			
Gamit (Bevis T_m)	-3,98	6,11	0,28
Beu T_m Modeli	-2,04	6,18	1,51
R. Algoritması	-1,15	1,52	0,33

Toplam zenit gecikmelerinin hesaplanmasında oluşturulan ağda, noktaların dağılımının ve değerlendirme stratejisinin önemli olduğu görülmüştür. Özellikle BERNESE v5.0 yazılımı kullanılırken farklı baz oluşturma seçenekleri (yıldız; tek referans istasyonu üzerinden ölçüm istasyonlarına çekilen baz profili, en kısa baz; ağ üzerindeki en yakın noktaları birbirine bağlayan baz profili, ön tanımlı baz; kullanıcının kendi belirlediği baz profili) denenmiştir ve en uygun olarak Obs-Max (maksimum ortak gözleme göre oluşturulan bazlar) seçilmiştir. Oluşturulan ağın geometrik yapısı ve değerlendirme stratejilerinin nokta konumuna ve dolayısı ile zenit gecikmelerine etkisi gözlemlenmiş ve en uygun parametreler belirlenmiştir. Bunların bir sonucu olarak, radyosonda verileri ile yapılan karşılaştırmalarda elde edilen sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu gözlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK-ÇAYDAG 112Y350 numaralı proje kapsamında yapılmıştır.

NOT

Bu çalışma, Hitit Üniversitesinde 15-17 Ekim 2014 tarihleri arasında gerçekleştirilen 7. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumunda sunulan "Radyosonda ve GPS Verileri ile Elde Edilen Yoğuşabilir Su Buharı Değerlerinin Karşılaştırılması" başlıklı çalışmanın revize edilmiş ve genişletilmiş halidir.

5. KAYNAKLAR

1. Boehm, J., Werl, B., Schuh, H., 2006, "Troposphere Mapping Functions for GPS and VLBI from ECMWF Operational Analysis Data". J Geophys Res 111, doi: 10.1029/2005JB003629.
2. Deniz, İ., Mekik, Ç., 2013, "Determination of Wet Tropospheric Zenith Delay and Integrated Precipitable Water Vapour Derived From Radiosonde Data", Proceedings of International Symposium on Global Navigation Satellite Systems (ISGPS-2013), Session 10A, Paper no. 23.
3. Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., Meindl, M., 2007, "User Manual of the Bernese GPS Software, Version 5.0", Astronomical Institute, University of Bern.
4. Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., Ware, R.H., 1992, "GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System", Journal of Geophysical Research, 15, 787-15,80.
5. Herring, T. A., King R. W., McClusky, S. C., 2006, "GAMIT Reference Manual", Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology

6. Hofmann, B., W. B, H. Lichtenegger, J. Collins 1997. "GPS theory and practice", Springer-Verlag, Vienna.
7. Mekik, Ç. 1999, "GPS'e Atmosferin Etkileri", Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası Dergisi, sayı: 86, syf:14-20, 1999
8. Niell, A.E., 1996, "Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths". J. Geophys. Res., 101, 3227-3246.
9. Davis, J, Herring, TA., Shapiro, I.I., Rogers A.E.E., Elgered, G, 1985, "Geodesy by Radio Interferometry: Effects of atmospheric modelling errors on the estimates of baseline lengths", Rad Sci 20:1593–1607.
10. Askne, J., Nordius, H., 1987, "Estimation of Tropospheric Delay for Microwaves from Surface Weather Data", Radio Sci., 22, 379–386.
11. Elgered, G., Davis, J.L., Herring, T. A., Shapiro, I. I. 1991, "Geodesy by Radio Interferometry: Water vapor radiometry for estimation of the wet delay", J. Geophys. Res. 96, 6541, 1991.
12. Özlüdemir, M.T., 2004, "The Stochastic Modelling of GPS Observations". Turkish J. Eng. Env. Sci., Tubitak, 28 (2004) , 223 – 231.
13. Bevis, M., Chiswell, S., Hering, T. A., Anthes, R., Rocken, C., Ware, R. 1994, "GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water". J Appl Meteorol 33:379–386.
14. Troller M.R., 2004, "GPS based determination of the integrated and spatially distributed water vapor in the troposphere", PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zürih, 2004.