

Türkiye için Islak Zenit Gecikmesi-Su Buharı Dönüşüm Faktörünün Modellenmesi

İlke Deniz^{1,*}, Çetin Mekik¹, Gökhan Gürbüz¹

¹ Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 67100, Zonguldak.

Özet

Global Navigasyon Uydu Sistemleri (GNSS) ağları, sürekli ve prezisyonlu yoğunlaşabilir su buharının belirlenmesinde kullanılan araçlardan (GNSS-MET ağları) biridir. TUSAGA-Aktif gibi sürekli ölçüm yapan ağların yüksek zamansal ve mekânsal doğruluğu, bu ağlardan kestirilen troposferik zenit gecikmelerinden sürekli, ekonomik, bulut ve yağmurdan etkilenmeden yoğunlaşabilir su buharı miktarının elde edilmesini sağlamaktadır (Rohm vd. 2014, Singh vd. 2013).

Su buharı kestiriminin doğruluğu, büyük ölçüde dönüşüm faktörünün doğruluğuna ve GNSS'den elde edilen zenit gecikmesinin doğruluğuna bağlı olmaktadır (Troller 2004, Sierk 2001, Lutz 2009).

Bu çalışmada, Türkiye'deki radyosonda istasyonlarının profil analiz algoritması ile (Deniz ve Mekik 2013) değerlendirilmesi sonucu bulunan Q dönüşüm faktörleri; radyosonda istasyonlarının enlemleri, yılın günü ve istasyonların yüksekliği ile birlikte en küçük kareler yöntemi ile Q dönüşüm faktörü modelinin katsayıları Türkiye için geliştirilmiştir. Hesaplanan katsayılar ile elde edilen yıllık Q dönüşüm faktörü modeline göre Ankara'daki sürekli gözlem yapan GPS istasyonundaki verileri değerlendirilerek elde edilen yoğunlaşabilir su buharı miktarları ve radyosondadan hesaplanan yoğunlaşabilir su buharı miktarları ile karşılaştırılmaktadır. Türkiye için geliştirilen Q dönüşüm faktörü katsayıları kullanılarak GPS Ankara Meteoroloji (GANM) ve GPS İstanbul Meteoroloji (GISM) istasyonlarına ait yoğunlaşabilir su buharı zaman serileri elde edilmekte ve sonuçlar irdelenmektedir.

Anahtar Sözcükler

GPS/GNSS, Atmosfer, Küresel Isınma, Troposfer, İklim

1. Giriş

Troposferik gecikmenin en önemli etmenlerinden biri su buharıdır. Su buharı miktarının tespit edilmesi durumunda zenit gecikmesinin hesabının yapılabilmesi Hogg vd. (1981) tarafından geliştirilmiştir. Mikrodalgaların kırılma indisi bağıntısını kullanarak, troposferdeki yoğunlaşabilir su buharı ile ıslak zenit gecikmesi arasındaki temel bağıntılar Askne ve Nordius (1987) tarafından geliştirilmiştir. Bevis vd. (1992), bu bağıntıda tanımlanan ağırlıklı ortalama sıcaklık değerini, yüzey sıcaklığına bağlı olarak belirlemek için lineer regresyon modelini geliştirmiştir. Bu modele göre ABD'deki yaklaşık 9.000 radyosonda profili analiz edilerek katsayılar hesaplanmıştır. Emaradson ve Derks (2000), ıslak zenit gecikmesi ile yoğunlaşabilir su buharı arasındaki dönüşüm faktörünü Q, yüzey sıcaklığı, enlem ve yılın gününe bağlı olarak veren modelleri geliştirmiştir. Ağırlıklı ortalama ve Q faktörü modelleri kullanılarak gerçekleştirilen çok sayıda çalışma yapılmıştır (Troller 2004, Troller vd. 2005, Lutz 2009).

Troposferik zenit gecikmesinden yoğunlaşabilir su buharına dönüşümde temel olan ve uzun süreli radyosonda profil verilerinin analizinden elde edilen lineer T_{z} bağıntısı üzerindeki Bevis vd. (1992)'den sonra da çalışmalar devam etmiştir. Bu alanda; Almanya (Solbrig 2000), Tayvan (Liou vd. 2001), Güney Kore (Jihyun vd. 2006), Kuzey Kore (Dongseob 2006), Hindistan (Suresh Raju vd. 2007), Cezayir (Boutiouta ve Lahcene 2010), Kanada (Bokoye vd. 2003), Hollanda ve Baltık (Baltink vd. 2002), Afrika (Bock vd. 2008) bölgeleri için çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda, ağırlıklı ortalama sıcaklığın $\pm 2-5K$ karesel ortalama hata ile belirlenebildiği ifade edilmektedir (Pacione vd. 2014, Wang vd. 2005). Global T_{z} bağıntısı içinde çalışmalar vardır (Wang vd. 2005, Schuler 2001, Mendes vd. 2000). $T - T_s$ bağıntısı, istasyona bağımlı, mevsimsel ve günlük değişimler içermektedir (Wang vd. 2005, Malderen 2014).

Ayrıca, troposferik zenit gecikmesinden yoğunlaşabilir su buharına dönüşümde Emaradson ve Derks (2000)'de incelenen Q dönüşüm faktörü Jade ve Vijayan (2008)'de da araştırılmıştır.

2. Islak Zenit Gecikmesi-Su Buharı Dönüşüm Faktörü

GNSS sinyallerini etkileyen troposferik ıslak zenit gecikmesi, yoğunlaşabilir su buharı sebebiyle oluşmaktadır (Emaradson ve Derks 2000). Buna bağlı olarak ıslak zenit gecikmesinin (ZWD) yoğunlaşabilir su buharına (IPW) dönüşümü;

$$IPW = \frac{ZWD}{Q} \quad (1)$$

* Sorumlu Yazar: Tel: 0372 2911931 Faks: 0372 257 29 96

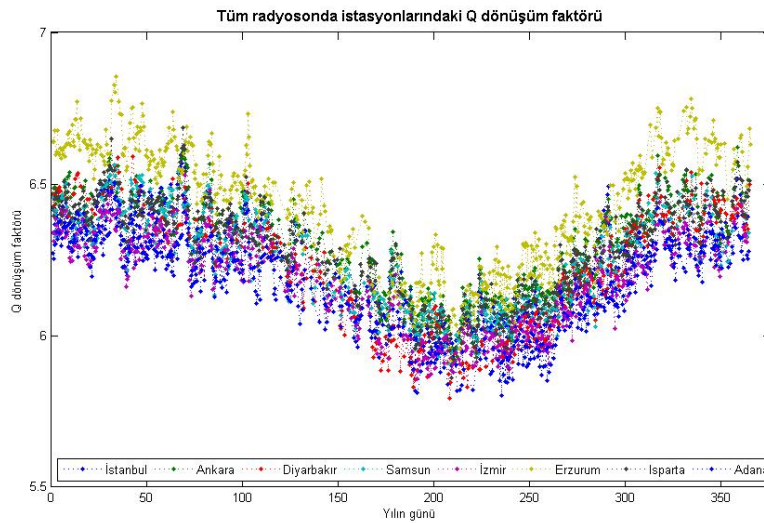
E-posta: : ideniz@beun.edu.tr (İLKE DENİZ), cmekik@hotmail.com (ÇETİN MEKİK), gokhanngurbuz@gmail.com (GÖKHAN GÜRBÜZ)

bağıntısı ile sağlanabilir Burada, Q dönüşüm faktörüdür. Emardson ve Derks (2000) çalışmasında, Q dönüşüm faktörünü ile yoğunlaşabilir su buharının kestirimi için dört model geliştirmiştir: Fiziksel model, Polinom model, Yıllık model ve Hibrit model (Emardson ve Derks 2000). Bu çalışmada, 38 Avrupa şehrini içeren 120.000 radyosonda profili verileri kullanılmıştır. Çalışmada, Q değeri;

$$Q_{yillik} = a_0 + a_1\theta + a_2 \sin\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) + a_3 \cos\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) \quad (2)$$

olarak araştırılmıştır. Burada; θ , derece cinsinden istasyonun enlemi, t_D yılın günüdür. Modeldeki katsayılar, $a_0=5.882$, $a_1=0,01113$, $a_2=0,064$, $a_3=0,127$ 'dir.

Türkiye için GPS meteorolojisine altlık oluşturacak T -T_s bağıntısının ve Q dönüşüm faktörünün geliştirilmesi çalışması temel çalışmalardandır. Bu çalışmalar öncelikle radyosonda verilerinin analizine dayanır. Bu amaçla, "GPS ile Atmosferik Su Buharı Kestirimi" isimli ve 112Y350 numaralı TÜBİTAK projesi çerçevesinde, Türkiye'deki 8 radyosonda istasyonunun 2011 yılındaki 4.103 radyosonda profilleri, profil analiz algoritması ile değerlendirilmiştir (Deniz ve Mekik 2013). Değerlendirme sonucu bulunan Q dönüşüm faktörleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Elde edilen Q dönüşüm faktörleri; radyosonda istasyonlarının enlemleri, yılın günü ve istasyonların yüksekliği parametreleri ile modellenerek en küçük kareler yöntemi ile Q dönüşüm faktörü modellerinin katsayıları Türkiye için geliştirilmiştir. Türkiye için geliştirilen Q yıllık modelleri katsayıları Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1: Profil analiz algoritması değerlendirmesi sonucu Türkiye'deki tüm radyosonda istasyonları için bulunan Q dönüşüm faktörleri zaman serileri

Tablo 1: Q modellerinde kullanılan katsayılar, karesel ortalama hataları (KOH) ve Q'nun karesel ortalama hataları

Katsayılar	Model			
	Yıllık		H ile yıllık	
	Değer	KOH	Değer	KOH
a_0	5,3867	0,0425	5,2731	0.0306
a_1	0,0222	0,0011	0,0235	0.0008
a_2	0,0907	0,0023	0,1145	0.0018
a_3	0,1901	0,0024	0,0931	0.0017
			0,1920	0.0017
	$\sigma = \pm 0.1064$ (%1,97)		$\sigma = \pm 0.0764$ (% 1,45)	

Emardson'un yıllık modeli aynı parametreleri içeren yıllık modelinde Q dönüşüm faktörünün karesel ortalama hatası %1,97 bulunmuştur. Emardson ve Derks (2000)'in çalışmasındaki yıllık modelin karesel ortalama hatası ise %1,43'tür. İkinci modelde ise; yıllık model bağıntısına yükseklik parametresi eklenmiştir.

$$Q_{\text{yillik}} = a_0 + a_1\theta + a_2H + a_3 \sin\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) + a_4 \cos\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) \quad (3)$$

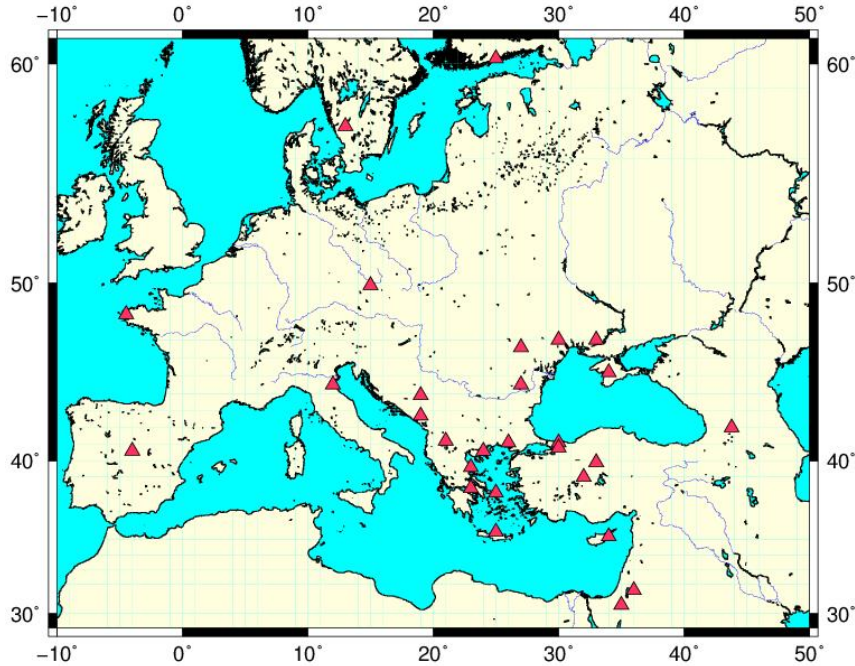
Burada; H, kilometre cinsinden istasyonun yüksekliğidir ve karesel ortalama hatası % 1,45 bulunmuştur.

3. Modellerin Değerlendirilmesi

Türkiye için geliştirilen yıllık yoğuşabilir su buharı modellerine (Eşitlik 2 ve 3) göre GPS Ankara Meteoroloji (GANM) ve GPS İstanbul Meteoroloji (GISM) istasyonlarındaki veriler değerlendirilerek radyosondadan elde edilen yoğuşabilir su buharı değerleri ile karşılaştırılmaktadır. Bu amaçla, ITRF, IGS ve EUREF ağlarındaki GPS istasyonlarını içeren bir ağ oluşturulmuştur (Şekil 2).

Bu ağ, BERNESE 5.0 yazılımı ile değerlendirilmiştir. Bernese 5.0 yazılımı değerlendirilmesi sırasında; uydu verisi ölçme aralığı 30 saniye, uydu yükseklik açısı (kesme açısı) 10° alınmıştır. Ayrıca, analizlerde iyonosferden bağımsız lineer faz kombinasyonu ve kuazi-iyonosfer bağımsız (QIF) stratejisi uygulanmıştır. Troposferik zenit gecikmelerinin kestirilmesi için Saastamoinen öncül modeli ve Niell'in kuru ve ıslak izdüşüm fonksiyonları (mapping functions) kullanılmıştır. GISM ve GANM istasyonlarına ait sıcaklık ve nem verileri kullanılarak kısmi su buharı basınçları hesaplanmıştır (Troller 2004). Bu değerler ile kuru troposferik zenit gecikmesi bulunmuştur. Toplam troposferik gecikme değerleri, kuru ile ıslak troposferik zenit gecikme değerlerinin birleştirilmesiyle hesaplandığından, Bernese 5.0 yazılımıyla elde edilen toplam troposferik gecikmeleri değerlerinden bulunan kuru troposferik zenit gecikmeleri çıkartılmak suretiyle ıslak troposferik zenit gecikmeleri için zaman serileri hesaplanmıştır. Bundan sonra da elde edilen ıslak troposferik zenit gecikmesi değerlerinden; Türkiye için geliştirilen Q dönüşüm faktörü katsayıları kullanılarak GPS Ankara Meteoroloji (GANM) ve GPS İstanbul Meteoroloji (GISM) istasyonlarına ait yoğuşabilir su buharı zaman serileri elde edilmiştir.

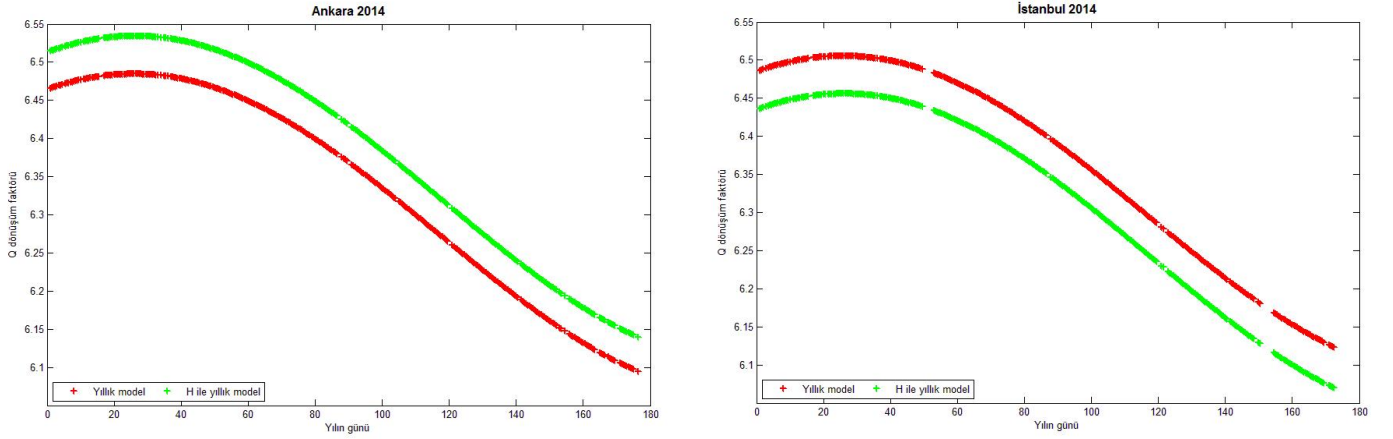
GANM ve GISM istasyonundaki ıslak troposferik zenit gecikmesi ve yoğuşabilir su buharı hesaplamaları için Matlab yazılımında bir algoritma geliştirilmiştir ve bu çalışmada kullanılmıştır.



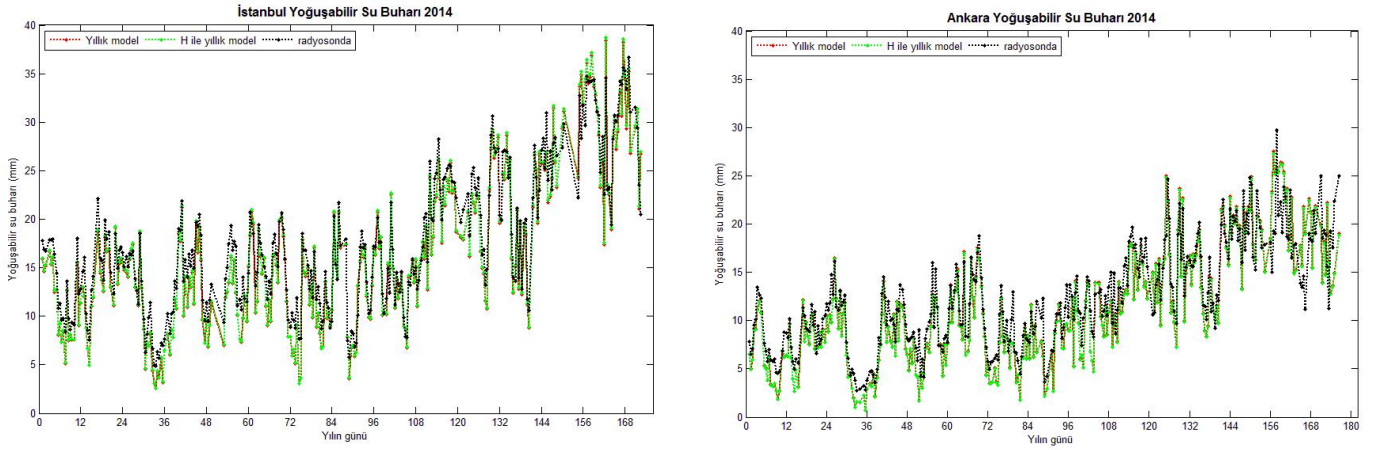
Şekil 2: Yoğuşabilir su buharı kestirimi için oluşturulan ağ

Türkiye için geliştirilen Q dönüşüm faktörü katsayıları kullanılarak GANM ve GISM istasyonlarına ait Q dönüşüm katsayılarının zaman serileri Şekil 3'te görülmektedir.

Q dönüşüm faktörü ile elde edilen yoğunlaşabilir su buharı değerleri ile radyosondadan hesaplanan su buharı değerleri zaman serileri Şekil 4'te verilmektedir. Elde edilen yoğunlaşabilir su buharı değerleri ile radyosondadan hesaplanan su buharı değerleri arasındaki farklar ise Tablo 2'de görülmektedir.



Şekil 3: GANM ve GISM istasyonlarına ait Q dönüşüm katsayılarının zaman serileri



Şekil 4: İstanbul (GISM) ve Ankara (GANM) GPS istasyonları için yıllık modeller kullanılarak hesaplanan yoğunlaşabilir su buharı zaman serileri

Tablo 2: Yoğunlaşabilir su buharı değerleri ile radyosondadan hesaplanan su buharı değerleri arasındaki farklar

	GISM 2014		GANM 2014	
	Yıllık model	H ile yıllık	Yıllık model	H ile yıllık
Minimum	-6,55	-6,85	-8,35	-8,18
Maksimum	5,15	5,00	7,40	7,51
Ortalama	1,30	1,16	1,05	1,13
Standart sapma	1,69	1,72	2,38	2,36

4. Sonuçlar

Tablo 2'deki, Ankara ve İstanbul için hesaplanan yoğuşabilir su buharı farklarının istatistiğinden, GPS'ten kestirilen su buharı ile radyosondadan verilen su buharı arasındaki farkların ortalama ve standart sapmalarına bakıldığında, bir sistematik bileşeni içermediği görülmektedir. Farkların standart sapmalarının Haan (2006), Haase vd. (2003), Park vd. (2010), Park vd. (2012)'de verilen sonuçlarla uyumludur.

Sonuç olarak; istasyon yüksekliğini de dikkate alan yıllık model, tüm Türkiye için, Q dönüşüm faktörü olarak kullanılabilir. Yoğuşabilir su buharı bilgisinin bilinmesi durumunda, ıslak zenit gecikmesi ve toplam zenit gecikmesi değerleri de hesaplanabilir.

Türkiye için, $T_{\text{e}}T$ lineer modelinin ve Q dönüşüm faktörü modellerinin geliştirilmesi çalışmalarına devam edilmektedir.

Teşekkür

Bu bildiriye sunulan bilgiler ve sonuçlar 112Y350 nolu "GPS ile Atmosferik Su Buharı Kestirimi" başlıklı Tübitak tarafından desteklenen projeden üretilmiştir.

Kaynaklar

- Askne J., Nordius H., (1987), *Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data*, Radio Science, Cilt 22, Sayı 3, 15,379-386, Mayıs-Haziran 1987.
- Baltink H. K., Van Der Marel H., Van Der Hoeven A. G. A., (2002), *Integrated atmospheric water vapour estimates from a regional GPS network*, Journal of Geophysical Research, Cilt 107, Sayı D3.
- 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, Cilt 97, Sayı D14, 15,787-15,801, 20 Ekim 1992.
- Bock O., Bouin M. N., Doerflinger E., Collard P., Masson F., Meynadier R., Nahmani S., Koite M., Gaptia Lawan Balawan K., Dide F., Ouedraogo D., Pokperlaar S., Ngamini J.-B., Lafore J. P., Janicot S., Guichard F., Nuret M., (2008), *West African Monsoon observed with ground-based GPS receivers during African Monsoon Multidisciplinary Analysis (AMMA)*, J. Geophys. Res., 113, D21105, doi:10.1029/2008JD010327.
- Bokoye A. I., Royer A., O'Neill N. T., Cliche P., McArthur L. J. B., Teillet P. M., Fedosejevs G., Thériault J.-M., (2003), *Multisensor analysis of integrated atmospheric water vapor over Canada and Alaska*, J. Geophys. Res., 108, 4480, doi:10.1029/2002JD002721, D15.
- Boutiouta S., Lahcene A., (2013), *Preliminary study of GNSS meteorology techniques in Algeria*, International Journal of Remote Sensing, 34:14, 5105-5118, doi: 10.1080/01431161.2013.786850.
- Deniz I., Mekik C., (2013), *Determination of wet tropospheric zenith delay and integrated precipitable water vapour derived from radiosonde data*, International Symposium on GNSS, 22-25 Ekim, İstanbul.
- Dongseob, S., (2006), *Accuracy improvement of precipitable water vapor estimation by precise GPS analysis*, Doktora Tezi, SungKyunKwan Üniversitesi, Güney Kore.
- Emardson T R., Derks H. J. P., (2000), *On the relation between the wet delay and the integrated precipitable water vapour in the European atmosphere*, Meteorol. Appl. 7, 61–68.
- Haan S., (2006), *National/Regional Operational Procedures of GPS Water Vapour Networks and Agreed International Procedures, Instruments and Observing Methods*, Report No.92, World Meteorological Organization, TD-No 1340.
- Haase J., Ge M., Vedel H. Calais E., (2003), *Accuracy and Variability of GPS Tropospheric Delay Measurements of Water Vapor in the Western Mediterranean*, Journal of Applied Meteorology, Cilt 42, 1547-1568.
- Hogg D.C., Guiraud F.O., Decker M.T., (1981), *Measurement of excess radio transmission length on earth-space paths*, Astronomy and Astrophysics, Cilt 95, Sayı 2, 15,304-307.
- Jade S., Vijayan M. S. M., (2008), *GPS-based atmospheric precipitable water vapor estimation using meteorological parameters interpolated from NCEP global reanalysis data*, J. Geophys. Res., 113, D03106, doi:10.1029/2007JD008758.
- Jihyun H., Kwan-Dong P., Bok-Haeng H., (2006), *Development of a local mean temperature equation for GPS-based precipitable water vapor over the Korean peninsula*, Journal of Astronomy and Space Sciences 23: 373–384.
- Liou Y., Teng Y., Hove T., Liljegren J., (2001), *Comparison of precipitable water observations in the near Tropics by GPS, Microwave Radiometer, and Radiosondes*, American Meteorological Society, January 2001.
- Lutz S., (2009) *High-resolution GPS tomography in view of hydrological hazard assessment*, Doktora Tezi, Zürich Federal Teknoloji Enstitüsü, Zürich, İsviçre.
- Malderen R. V., (2014), *A literature survey on integrated water vapor (I WV) intercomparison studies*, GNSS4SWEC Workshop, 26-28 Şubat, LMU Munich, Münih, Almanya.
- Mendes V. B., Prates G., Santos L., Langley R. B., (2000), *An evaluation of models for the determination of the weighted mean temperature of the atmosphere*, Proceedings of The Institute of Navigation 2000 National Technical Meeting, pp. 433-438, Anaheim, Kaliforniya, U.S.A. 26-28 Ocak 2000.
- Pacione R., Bock O., Dousa J., (2014), *GNSS Atmospheric water vapor retrieval methods*, GNSS4SWEC Workshop, 26-28 Şubat, LMU Munich, Münih, Almanya.
- Park C., Baek J. ve Cho J., (2010), *Analysis on Characteristics of Radiosonde Bias Using GPS Precipitable Water Vapor*, Journal of Astronomy and Space Sciences, 27(3), 213-220.
- Park C., Roh K. ve Cho J., (2012), *Radiosonde Sensors Bias in Precipitable Water Vapor From Comparisons With Global Positioning System Measurements*, Journal of Astronomy and Space Sciences, 29(3), 295-303.

- Rohm W., Yang Y., Biadeglne B., Zhang K., Le Marshall J., (2014), *Ground-based GNSS ZTD/IWV estimation system for numerical weather prediction in challenging weather conditions*, Atmospheric Research, Cilt 138, 414-426.
- Schüler T., (2001), *On ground-based GPS tropospheric delay estimation*, Doktora Tezi, Münih Üniversitesi, Almanya.
- Singh D., Kumar J., Kashyap G.D., (2013), *Precipitable water vapor estimation in India from GPS-derived zenith delays using radiosonde data*, Meteorol Atmos Phys, doi: 10.1007/s00703-013-0293-1.
- Sierk B., (2001), *Solar spectrometry for determination of tropospheric water vapor*, Doktora Tezi, Zürih Federal Teknoloji Enstitüsü, Zürih, İsviçre.
- Solbrig, P. (2000), *Untersuchungen über die Nutzung numerischer Wettermodelle zur Wasserdampfbestimmung mit Hilfe des Global Positioning Systems*, Munich: Institute of Geodesy and Navigation, University FAF.
- Suresh Raju C., Saha K., Thampi B. V., Parameswaran K., (2007), *Empirical model for mean temperature for Indian zone and estimation of precipitable water vapor from ground based GPS measurements*, Ann. Geophys., 25, 1935–1948.
- Troller M.R., (2004), *GPS based determination of the integrated and spatially distributed water vapor in the troposphere*, Doktora Tezi, Zürih Federal Teknoloji Enstitüsü, Zürih, İsviçre.
- Troller M., Lutz S., Walpersdorf A., Geiger A., Bürki B., Bock O., Doerflinger E., Kahle H. G., (2005), *Determination of continuous 3D water vapor distribution using the high-density GPS network of the ESCOMPTE campaign*, Final ESCOMPTE Workshop, Marsilya, Fransa, 2-4 Şubat 2005.
- Wang J., Zhang L., Dai A., (2005), *Global estimates of water-vapor-weighted mean temperature of the atmosphere for GPS applications*, Journal of Geophysical Research, Cilt.110.