



Tüm Türkiye İçin GNSS ile Su Buharının Kestiriminde Q Dönüşüm Faktörünün Elde Edilmesi

Procuring Q Conversion Factor for all of Turkey in Estimation of Water Vapor with GNSS

Çetin Mekik

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

Öz

İklim değişimlerinin olumsuz etkileri, sürdürülebilir kalkınma çerçevesinde iklim ve meteorolojik tahmin araştırmalarını ön plana çıkarmıştır. En önemli meteorolojik parametrelerden biri olan yoğuşabilir su buharının konumsal ve zamansal olarak yüksek doğruluklarda, sürekli GNSS (Global Navigation Satellite Systems) istasyon ağlarında belirlenmesi ve izlenmesi olanakları ise GNSS meteorolojisi çalışmalarına hız katmıştır.

Bu çalışmada, Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı'nın (TUSAGA-Aktif'in) bir GNSS meteorolojisi ağı olarak da görev yapabilmesi için, toplam zenit gecikmesi değerlerinin (ZTD) yoğuşabilir su buharına (PWV) dönüştürülmesinde temel parametre olan Q dönüşüm faktörü tüm Türkiye için geliştirilmiştir. Türkiye'deki 8 radyosonda istasyonunun 2011 yılına ait profil gözlemlerinin analiziyle Q modelleri geliştirilmiş ve bu modeller; TÜBİTAK 112Y350 nolu proje kapsamında tesis edilen Ankara ve İstanbul'daki GNSS-RS istasyonlarında hesaplanan yaklaşık 1 yıllık PWVGNSS ile PWVRS değerlerinin karşılaştırılmasıyla test edilmiştir. Tüm Türkiye için istasyon yüksekliğiyle genişletilmiş hibrit Q modeli %1,15 duyarlıkla geliştirilmiştir. Ankara ve İstanbul GNSS-RS istasyonlarında yapılan karşılaştırma sonuçları; tüm Türkiye için geliştirilen hibrit Q modelinin $\pm 1,65$ mm doğrulukla yoğuşabilir su buharı kestirimi yapılabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: GNSS meteorolojisi, Q dönüşüm faktörü, Yoğuşabilir su buharı kestirimi

Abstract

Adverse effects of climate change have put extra emphasis on researches on climate and meteorological prediction within maintainable development frame. GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Meteorology research has gained a momentum with the possibilities supplied by networks of permanent GNSS reference stations offering to determine and monitor precipitable water vapor with high positional and temporal accuracies.

In this study, the Q conversion factor, the fundamental parameter in converting total zenith delays (ZTD) into precipitable water vapor (PWV), has been developed for all of Turkey in order for the Turkish National Permanent GNSS Network (TUSAGA-Aktif) to function as a network of GNSS meteorology. Several Q models have been implemented by analyzing the profile observations of 8 radiosonde stations in Turkey belonging to year 2011, and also tested by comparing the one year values of PWVGNSS and PWVRS computed for GNSS-RS stations in Ankara and Istanbul established within a TUBITAK project no. 112Y350. The hybrid Q model expanded with station height has been obtained for all of Turkey with a precision of 1.15%. The comparison results conducted at Ankara and Istanbul GNSS-RS stations have demonstrated that precipitable water vapor estimation can be achievable by using hybrid Q model developed for all of Turkey with an accuracy of 1.65 mm.

Keywords: GNSS meteorology, Q conversion factor, Precipitable water vapor estimation

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: cmekik@hotmail.com

1. Giriş

Son senelerde sel, heyelan, fırtına gibi afetlerin artması, global ısınma, atmosferik süreçler, sera etkisi vb. konuların toplumun gündeminde geniş biçimde yer almasını ve bu alandaki bilimsel araştırmaları hızlandırmıştır. İnsanların iklim üzerindeki etkisi araştırılmakta, sürdürülebilir kalkınma ile iklim arasındaki ilişki daha yakından sorgulanmaktadır. Kyoto Protokolü, iklimi korumak için formüle edilmesine rağmen iklim konusundaki kararlarda geç kalma endişesi her gün artmaktadır (Troller 2004, Perler 2011).

Su buharı atmosferdeki birçok süreçte yer almaktadır; doğal olarak oluşan sera gazlarından biridir ve önemli bir kimyasal tepkime özelliğine sahiptir (Troller 2004, Perler 2011). Birçok atmosferik sera gazı bulunmakta, bazıları doğal olarak, bazıları ise endüstriyel etkinlikler sonucu oluşmaktadır (Perler 2011). Ayrıca, su buharı global sıcaklıklar üzerinde bir termostat görevi yapmaktadır: bir taraftan fazla ısınmaya neden olurken, diğer taraftan daha fazla su buharı yere gelen güneş radyasyonunun miktarını azaltarak bulutların oluşmasına ve böylece global sıcaklığın azalmasına neden olmaktadır (Sierk 2000, Lutz 2008). Bu nedenle, uzun süreli su buharı değişimleri bilgisi, iklim değişimlerini modellemek için bağımsız bir kaynak olabilmektedir (Ning 2012).

Su buharının iklim geri besleme çevrimiyle önemli bir ilişkisi vardır: karbon dioksitin artan yoğunluğu sonucu, atmosferin ve yer yüzeyinin sıcaklığı artar ve daha yüksek buharlaşma basıncı nedeniyle atmosfer daha fazla su buharı tutar. Su buharı, uzaya kaçacak enerjiyi absorbe eder (soğurur) ve daha fazla ısınmaya neden olur (Sierk 2000, Lutz 2008). Yağış miktarı, atmosferde asılı bulunan yoğunlaşabilir su buharına veya su buharı miktarına doğrudan bağlı olduğundan su buharının konumsal ve zamansal dağılımlarının doğruluğu, hava tahminlerinin doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Su buharının hava tahminlerine dahil edilmesi hava tahminlerini önemli derecede iyileştirmektedir (Sierk 2000, Lutz 2008). Su buharı hidrolojik çevrim içinde, atmosferde, okyanuslarda ve karalardaki hareketleri yoluyla, yoğunlaşma ve buharlaşma süreçleriyle, buharlaşma-donma enerjisinin çok uzun mesafelere taşınmasına, El Nino vb. oluşumlara neden olmaktadır (Sierk 2000, Lutz 2008, Perler 2011). Ayrıca, su buharı, atmosferin modellenmesi ve iklim araştırmaları için bir anahtar büyüklük görevi de görmektedir. Endüstrilemiş ülkelerde, ulusal meteorolojik hizmetlerin maliyet/yarar oranı 1:5 civarındadır. Bu hizmetlerden yararlanan ekonomi sektörlerinden bazıları; tarım, inşaat, enerji, sigorta, iletişim, taşıma, lojistik ve su temini olarak sayılabilir (Perler 2011).

Su buharının alışılmışın dışındaki önemliliği nedeniyle, çok sayıda araştırma etkinliği, gözlemlerin global ölçekte iyileştirilmesine yönelmektedir. Nemliliğin içeriği ve onun atmosferde dağılımı için değişik uzaktan algılama teknikleri geliştirilmiştir. Ancak, yüksek konumsal ve zamansal çözünürlükleri nedeniyle yer bazlı teknikler hala önemli veri kaynaklarıdır (Sierk 2000). Farklı sistemlerden elde edilen verilerin entegrasyonu için bu verilerin doğruluklarının bağımsız gözlemlerle denetlenmesi gerekir. Bu nedenle, farklı sistemlerden elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılır ve değerlendirilir. Bu sonuçların Uluslararası Meteoroloji Birliğinin benimsediği doğruluklarla uyumlu olması beklenir ve veri entegrasyonu için doğruluk standardizasyonu gerekmektedir (Haan 2006).

GNSS'nin geliştirilmesi ve güncel kullanımı; navigasyon, jeodezik ölçmeler, kadastral ölçmeler, mühendislik ölçmeleri ve jeodinamik uygulamalar alanlarında bir devrimdir. Konumsal bilginin doğru, güvenilir, sürekli ve ekonomik olarak temin edilmesi amaçlarıyla, sürekli çalışan GNSS ağları (CORS - Continuously Operating Reference Systems) birçok ülkede kurulmuştur ve kurulmaya devam etmektedir (Bevis vd. 1992, Sierk 2000, Troller 2004, Lutz 2008, Mekik vd. 2011, Boutiouta ve Lahcene 2013). Mevcut sürekli GNSS istasyonlarının çok az bir maliyetle, GNSS meteorolojisi istasyonlarına dönüştürülmesi ve gerçek zamana yakın su buharının elde edilmesi olanakları, GNSS ile yoğunlaşabilir su buharı kestirimi çalışmalarını güncelleştirmiştir.

GNSS ile meteorolojik veri üretiminde üç farklı uygulama üzerinde çalışılmaktadır. Bunlar; GNSS meteorolojisi, GNSS tomografisi ve GNSS radyo okültasyonudur. GNSS tomografisi; düşey tabakalaşmayı gözlemlemek için, uydualıcı eğik yolundaki troposferik etkilerin modellenmesi yoluyla, istasyonlar ağı kapsama alanında voksel olarak tanımlanan hacimler içinde, su buharının konumsal (3 boyutlu) ve zamansal olarak kestirimini amaçlamaktadır. Araştırmalar yüksek doğrulukta çözümlere ulaşabildiğini kanıtlamaktadır (Sierk 2000, Lutz2008, Müidla vd. 2009, Perler 2011, Rohm 2012). GNSS radyo okültasyonu (GNSS RO) uygulamalarında, GNSS uyduları ile üzerinde GNSS alıcısı bulunan CHAMP, GRACE, vb. uydular arasındaki yüksek duyarlıkları konum bilgilerinden, düşey atmosferik kırılma indisi profilleri üretilmekte ve bu profiller, özgül nemlilik, basınç ve sıcaklık profillerine dönüştürülmektedir. GNSS RO ile farklı profillerin elde edilmesi ve karşılaştırma çalışmaları, ulaşılan çözümlerin doğruluklarının giderek arttığını göstermektedir (Vespa vd. 2004, Heise vd.

2006, Wickert vd. 2009, Huang vd. 2009, Schmidt vd. 2008, 2010, Sharifi vd. 2013). GNSS meteorolojisinde su buharına dönüştürülen temel büyüklük “troposferik zenit gecikmesi”dir (ZTD). Bir istasyon noktasındaki toplam zenit gecikmesi; bu istasyondaki ve çevresinde uygun dağılmış istasyon noktalarındaki (GNSS MET ağı) GNSS gözlemlerinden, öncül troposferik model, izdüşüm fonksiyonu kullanılarak kestirilir. Elde edilen büyüklük, istasyonun zenit doğrultusunda, troposferde uydu-alıcı arasındaki optik ve geometrik yollar arasındaki farktır.

ZTD; kuru (ZHD) ve ıslak (ZWD) olmak üzere iki bileşene ayrılır. Kuru bileşen atmosferik basınca bağlıdır ve istasyon noktasındaki basınç değeri kullanılarak doğrudan yüksek doğrulukla elde edilir. ZWD ise, ZTD'den ZHD çıkarılarak da elde edilebilir ve yoğunlaşabilir su buharına (PWV) dönüştürülür. Yoğunlaşabilir su buharı bilindiğinde, troposferik zenit gecikmesi hesaplanabilir (Hogg 1981). Bunun tersi olarak, ZWD bilindiğinde de; mikrodalgalar için troposferik kırılma indisi eşitliğinden PWV çıkarılmaktadır (Askne ve Nordius 1987). Bu çıkarımda temel parameter, istasyon noktasının zenith doğrultusunda troposferin ağırlıklı ortalama sıcaklığı T_m 'dir. T_m değerleri uzun süreli radyosonda profil gözlemlerinin analizi yoluyla elde edilir. Bir istasyonda, yüzey sıcaklıkları T_s ile T_m değerleri arasında lineere yakın bir bağıntı gözlenmektedir. Bu ilişki $T_m = a + bT_s$ olarak modellendirilerek a ve b katsayıları kestirilebilir (Bevis vd. 1992). Bevis vd. (1992,1994) tarafından, Kuzey Amerika için geliştirilen modelden sonra; Avrupa (Emardson vd. 1998), Avustralya (Tregoning vd. 1998), 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 2013), Kanada (Bokoye vd. 2003), Hollanda ve Baltık (Baltink vd. 2002), Afrika (Bock vd. 2008), Brezilya (Sapucci 2014) için yerel ve bölgesel modeller geliştirilmiştir. Bu çalışmalarda yüzey sıcaklığına bağlı olarak, ağırlıklı ortalama sıcaklığın $\pm 2-5$ K karesel ortalama hata ile belirlenebildiği ifade edilmektedir (Wang vd. 2005, Pacione vd. 2014). Global $T_m - T_s$ bağıntısı için de çalışmalar vardır (Wang vd. 2005). Lineer model; yüzey basıncı ve yüzey nemliliği parametreleri ile genişletilerek de değerlendirilmiştir (Sapucci 2014).

ZWD/PWV=Q şeklinde Q dönüşüm faktörü tanımlanmıştır (Emardson ve Derks 2000). Q dönüşüm faktörleri yine radyosonda profil analizleriyle elde edilirler. Birkaç radyosonda istasyonunda uzun sürede belirlenen Q dönüşüm faktörleri, istasyon yüzey sıcaklığı, istasyonun enlemi ve yılın gününe bağlı olarak modellendirilmiştir (Emardson ve

Derks 2000). Q dönüşüm faktörleri, istasyonun enlemi ve yüksekliğinin üstel fonksiyonu olarak da incelenmiştir (Jade ve Vijayan 2008). Q dönüşüm faktörüne ilişkin çalışmalardan, bu faktörün yaklaşık ± 1 'e yakın oransal duyarlılıklarla elde edilebileceği görülmektedir.

PWV'nin ± 1 mm duyarlılıkla belirlenebilmesi için ZTD'nin yaklaşık ± 7 mm duyarlılıkla kestirilmesi gerekmektedir. ZTD'nin kestiriminde, hataları minimize etmek için oluşturulacak jeodezik ağı; istasyon sayısı, istasyonların dağılımı, minimum gözlem süresi ve değerlendirme stratejileri araştırılmaktadır. Bu ağın IGS istasyonlarından oluşturulması ve ZTD'nin yüksek doğruluklarla kestirimini sağlamak için, ağın bir deneysel optimizasyon çalışmasıyla kesinleştirilmesi önerilmektedir (Schüler 2001, Dousa 2004, Dousa ve Bennitt 2013, Jin vd., 2010, Rohm 2012, Rohm vd. 2014).

GNSS ile PWV'nin elde edilmesinde, dönüşümün doğruluğunun, diğer yöntemlerle elde edilen PWV değerleriyle karşılaştırmalar ile belirlenmesi önerilmektedir (Emardson ve Derks 2000). GNSS PWV'nin duyarlılığı; ZTD'nin doğruluğu (ağ yapısı, değerlendirme stratejisi), ZHD'deki hatalar ve T_m 'deki hatalar dikkate alınarak $\pm 1-2$ mm olarak verilmektedir (Schüler 2001, Pottieux vd. 2014, Ning 2012, Pacione vd. 2014).

2. Gereç ve Yöntem

Emardson ve Derks (2000)'de 38 Avrupa şehrini içeren 120.000'den fazla radyosonda profilinin analizini gerçekleştirerek zenit gecikmesi ile su buharı arasındaki dönüşüm faktörünü (Q) geliştirmiştir. Yine aynı çalışmada, Q değeri; yüzey sıcaklığı, istasyonun enlemi ve yılın gününe bağlı olarak;

- fiziksel model,

$$Q_{fiziksel} = a_0 + \frac{a_1}{a_2 + T_{\Delta}} \quad (1)$$

- polinom model,

$$Q_{polinom} = a_0 + a_1 T_{\Delta} + a_2 T_{\Delta}^2 \quad (2)$$

- yıllık model,

$$Q_{yillik} = a_0 + a_1 \theta + a_2 \sin\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) + a_3 \cos\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) \quad (3)$$

- hibrit model,

$$Q_{hibrit} = a_0 + a_1 T_{\Delta} + a_2 T_{\Delta}^2 + a_3 \theta + a_2 \sin\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) + a_4 \cos\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) \quad (4)$$

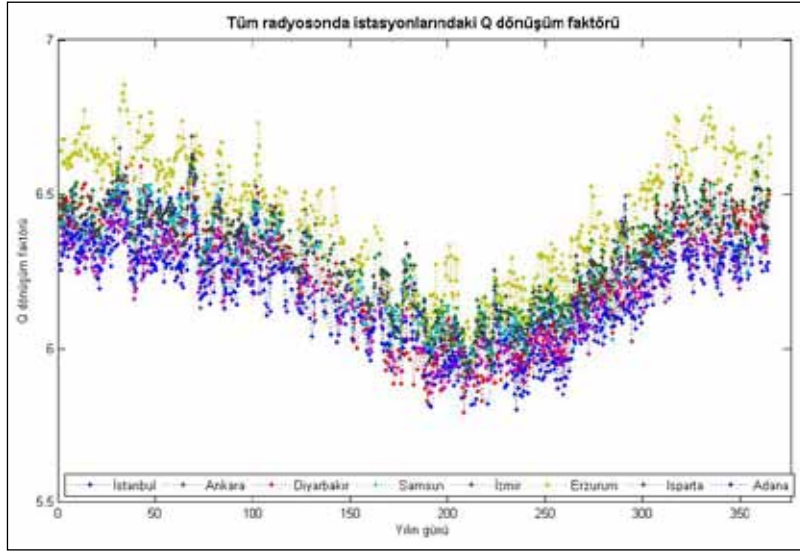
olarak modellendirilmiştir. Burada; θ istasyon enlemi

(t_D), t_D yılın günü, $T_{\Delta} = T_s - T_{ort}$, T_s yüzey sıcaklığı, T_{ort} ise ortalama yüzey sıcaklığıdır. Bulunan katsayılar Çizelge 1'de görülmektedir.

Çizelge 1'den, hibrit modelle Q değerinin %1,14 duyarlıkla hesaplanabildiği görülmektedir. Türkiye'deki tüm radyoson-



Şekil 1. Türkiye'deki tüm radyosonda istasyonları.



da istasyonlarından (Şekil 1'de gösterilen) elde edilen Q dönüşüm faktörleri Şekil 2'de görülmektedir.

Emardson ve Derks (2000)'de verilen modeller esas alınarak gerçekleştirilen Q dönüşüm faktörünün tüm Türkiye için genişletilerek modellendirilmesi çalışmaları aşağıda verilmektedir. Sekiz radyosonda istasyon için hesaplanan Q değerleri ölçü olarak alınmış ve istasyonların enlemi, yüksekliği, yılın günü ve yüzey sıcaklığı kullanılarak en küçük kareler yöntemiyle dengeleme yapılmış ve aşağıdaki modellerin katsayıları hesaplanmıştır:

- Eşitlik 3'teki modele göre;

$$Q_{yillik} = a_0 + a_1 \theta + a_2 \sin\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) + a_3 \cos\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) \quad (5)$$

- Eşitlik 2'deki modele göre;

$$Q_{polinom} = a_0 + a_1 T_{\Delta} + a_2 T_{\Delta}^2 \quad (6)$$

Şekil 2. Tüm radyosonda istasyonlarında elde edilen Q dönüşüm faktörleri.

Çizelge 1. Q Modelleri katsayıları (Emardson ve Derks 2000)

Katsayı	Model							
	Fiziksel		Polinom		Yıllık		Hibrit	
	Değer	σ	Değer	σ	Değer	σ	Değer	σ
a_0	$2,1404 \times 10^1$	1×10^0	6,458	2×10^{-4}	5,882	1×10^{-3}	6,457	2×10^{-4}
a_1	$1,2559 \times 10^4$	2×10^3	$-1,78 \times 10^{-2}$	2×10^{-5}	0,01113	3×10^{-5}	$-1,78 \times 10^{-2}$	3×10^{-5}
a_2	$-8,4026 \times 10^1$	7×10^1	$-2,2 \times 10^{-5}$	2×10^{-6}	0,064	4×10^{-4}	$-1,9 \times 10^{-5}$	2×10^{-6}
a_3	-	-	-	-	0,127	4×10^{-4}	$1,3 \times 10^{-2}$	3×10^{-4}
a_4	-	-	-	-	-	-	$0,4 \times 10^{-2}$	4×10^{-4}
RMS(%)	1,15		1,15		1,43		1,14	

- Eşitlik 4'teki modele göre;

$$Q_{hibrit} = a_0 + a_1 T_{\Delta} + a_2 T_{\Delta}^2 + a_3 \theta + a_4 \sin\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) + a_5 \cos\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) \quad (7)$$

- Eşitlik 3'teki model, istasyonun yüksekliği parametresi eklenerek genişletilmiştir.

$$Q_{yünlük} = a_0 + a_1 \theta + a_2 H + a_3 \sin\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) + a_4 \cos\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) \quad (8)$$

- Eşitlik 4'teki modelden istasyonun yüksekliği (H) parametresi eklenerek geliştirilen model;

$$Q_{hibrit} = a_0 + a_1 T_{\Delta} + a_2 T_{\Delta}^2 + a_3 \theta + a_4 \sin\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) + a_5 \cos\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) \quad (9)$$

- Eşitlik 4'teki modeldeki istasyonun enlem parametresi (θ) yerine aynı parametrenin karesi (θ^2) konularak geliştirilen model;

$$Q_{hibrit} = a_0 + a_1 T_{\Delta} + a_2 T_{\Delta}^2 + a_3 \theta^2 + a_4 H + a_5 \sin\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) + a_6 \cos\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) \quad (10)$$

Hesaplanan katsayılar Çizelge 2'de verilmektedir. Değerlendirmelerde tüm istasyonlardaki yüzey sıcaklıklarının ortalaması olarak $T_{ort.} = 287,7620$ K alınmıştır.

$H_0: x_i = 0$ hipotezine göre, %95 güvenilirlik alınarak yapılan t testinde, tüm parametreler istatistiksel olarak signifikant çıkmıştır.

3. Bulgular

Profil analiziyle geliştirilen Q dönüşüm faktörlerinin kullanılması yoluyla, GNSS verilerinden hesaplanan yoğunlaşabilir su buharı değerlerinin radyosonda istasyonundan elde edilen yoğunlaşabilir su buharı değerleri ile karşılaştırılması ve kontrolü amaçlanmaktadır. Bu nedenle, Ankara ve İstanbul'daki sürekli GNSS referans istasyon verilerinden doğru ve güvenilir toplam zenit gecikmesi değerlerinin kestirimi çalışmaları yapılmıştır. Toplam zenit gecikmesi değerleri, GAMIT/GLOBK bilimsel yazılımı ile kestirilmektedir.

Ankara ve İstanbul radyosonda istasyonlarında, GNSS verilerinden doğru ve güvenilir toplam zenit gecikmesi değerlerinin elde edilmesi için, bu istasyonlar ile birlikte değerlendirilecek GNSS ağına tasarımı önemlidir. Bu ağına ITRF, IGS, EUREF gibi yüksek dereceli sürekli istasyonlarını içerecek biçimde bir GNSS ağı tasarlanması amaçlanmıştır.

GNSS sisteminde; GNSS gözlemlerini uydu efemeris hataları, uydu saati hataları, iyonosferik etkiler, troposferik etkiler, sinyal yansıma etkisi, anten faz merkezi hataları, taşıyıcı dalga faz belirsizliği, faz kesiklikleri vb. etkilemektedir. Yüksek doğruluk isteyen çalışmalarda bu etkilerin davranışı ve büyüklüğü çok iyi modellendirilmeli ve kontrol altında tutulmalıdır (Kahveci, 2005). Değişen uydu dağılımı, ağ yapısı ve ön değerlendirme stratejileri (sinyal belirsizliği, saat ve koordinat çözümleri) gibi nedenlerden dolayı istenen doğrulukların elde edilmesi zordur (Dousa 2010). GAMIT/GLOBK yazılımı için en uygun ağ ve toplam zenit gecikmesi kestirimi stratejileri araştırılmaya başlanmıştır (Schüler 2001).

GAMIT/GLOBK bilimsel yazılımı ile verilerin değerlendirilmesinde aşağıdaki ürünler öncelikli kullanılmıştır:

Çizelge 2. Hesaplanan Q dönüşüm faktörleri modellerinin katsayıları.

Katsayılar	Model											
	Eşitlik:5'e göre		Eşitlik:6'ya göre		Eşitlik:7'ye göre		Eşitlik:8'e göre		Eşitlik:9'a göre		Eşitlik:10'a göre	
	Değer	KOH	Değer	KOH	Değer	KOH	Değer	KOH	Değer	KOH	Değer	KOH
a_0	5,3867	0,0425	6,2587	0,0019	6,0309	0,0352	5,2731	0,0306	5,7053	0,0306	5,9589	0,0155
a_1	0,0222	0,0011	-0,0162	0,0001	-0,0113	0,0002	0,0235	0,0008	-0,0067	0,0002	-0,0067	0,0002
a_2	0,0907	0,0023	0	0	0	0	0,1145	0,0018	0	0	0	0
a_3	0,1901	0,0024			0,0057	0,0009	0,0931	0,0017	0,013	0,0008	0,0002	0
a_4					0,0565	0,0019	0,192	0,0017	0,0833	0,002	0,0835	0,002
a_5					0,0699	0,003			0,0709	0,0016	0,0709	0,0016
a_6									0,1195	0,0028	0,1195	0,0028
	$m_Q = \pm 0,1064$		$m_Q = \pm 0,0924$		$m_Q = \pm 0,0815$		$m_Q = \pm 0,0764$		$m_Q = \pm 0,0684$		$m_Q = \pm 0,0684$	
RMS(%)	1,98		1,48		1,35		1,45		1,20		1,15	

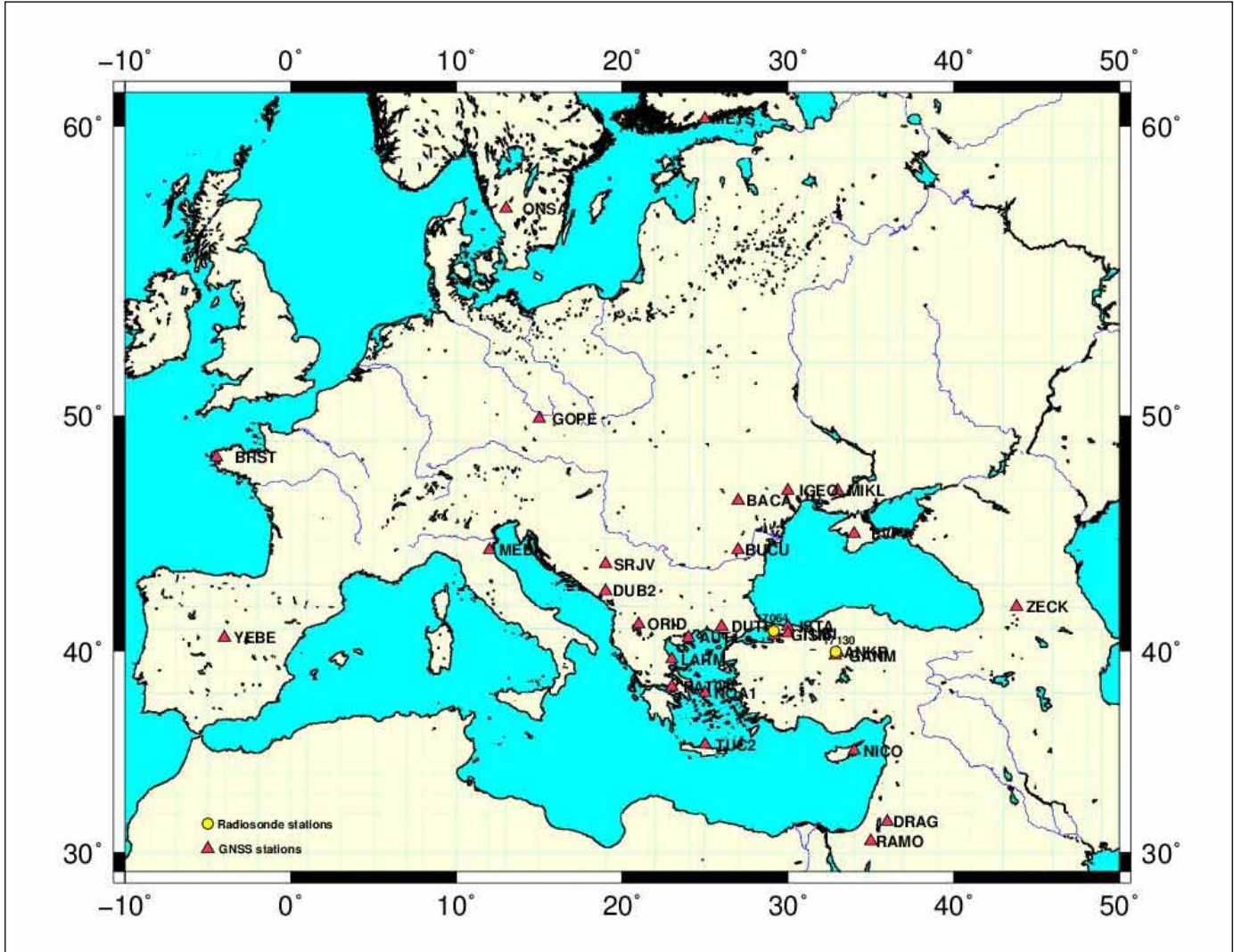
- IGS istasyonlarının gözlem verileri <http://igs.bkg.bund.de> sitesinden yüklenmiştir.
- İyonosfer verileri ve yörünge verileri <http://www.bernese.unibe.ch/> ve <http://igs.jpl.nasa.gov/igs/product/> sitelerinden yüklenmiştir. Toplam zenit gecikmesi

kestirimi için oluşturulan ağ; Şekil 3'te görülmektedir. Ağın değerlendirme stratejisi Çizelge 3'te görülmektedir.

Bu ağda, İstanbul ve Ankara GNSS istasyonları için 1 haftalık GNSS verileri birlikte değerlendirilerek önce duyarlılık koordinatlar hesaplanmıştır. İyonosferden bağımsız lineer

Çizelge 3. Değerlendirmede kullanılan parametreler ve modeller.

Değerlendirme parametreleri	Değerlendirme stratejileri
Giriş verileri	Günlük
Uydu yükseklik açısı	10°
Uydu verisi ölçme aralığı	30 saniye
Yörüngeler	IGS final yörünge (SP3)
Uygulanan Yüklenme Etkileri	63
İzdüşüm fonksiyonu	Niell izdüşüm fonksiyonu (1 saat aralıklı)
ZTD kesirimleri	1 saat aralıklarla



Şekil 3. PWV kestiriminde kullanılan jeodezik ağ.

L3 kombinasyonu ile iyonosferik etki elimine edilmekte, duyarlıklı koordinatlar sabit alınarak iyonosfer etkisinden, sinyal belirsizliklerinden ve faz sıçramalarından arındırılmış toplam zenit gecikmeleri kestirilmektedir (Çizelge 3).

Kestirilen toplam zenit gecikmesi değerlerinden kuru zenit gecikmesi;

$$\Delta_{kuru}^z = 0,0022768p_s / f(\varphi, H) \quad (11)$$

ile bulunur. Eşitlikte; p_s ; yüzey basıncı, $f(\varphi, H)=1-0.00266 \cdot \cos 2\varphi - 0.00028H$ alınır ve φ , enlem ve H, km biriminde istasyonun ortometrik yüksekliğidir. Buradan, ıslak zenit gecikmesi değerleri büyük bir doğrulukla (mm mertebesinde);

$$\Delta_{ıslak}^z = \Delta_T^z - \Delta_{kuru}^z \quad (12)$$

İle elde edilir. Böylece, ıslak zenit gecikmesi değerlerinden yoğunlaşabilir su buharı değerleri

$$PWV_{[mm]} = \frac{\Delta_{ıslak}^z [mm]}{\tau'} \quad (13)$$

ile bulunur. Dönüşüm faktörü;

$$\tau' = 10^{-5} \cdot (k_2' + \frac{k_3}{T_m}) \cdot R_w \quad (14)$$

Değerine ulaşılır. Eşitlikte; $T_m=48.97 + 0.79 \cdot T_s$ (Çizelge 3'e göre), $k_2' = 17.0 \text{ K hPa}^{-1}$, $k_3=3.776 \cdot 10^5 \text{ K}^2/\text{hPa}$, $R_w=461.524 \text{ JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$, alınır.

Çizelge 2'de katsayıları verilen hibrit modeli karşılaştırma amacıyla Ankara ve İstanbul GNSS istasyonlarındaki GAMIT/GLOBK ile elde edilen verilerle birlikte kullanılarak PWV_{GNSS} değerleri hesaplanmıştır. PWV_{GNSS} ve PWV_{RS} arasındaki farkların istatistiği Çizelge 4'te ve görseli Şekil 4'te görülmektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışma çerçevesinde Türkiye'deki tüm radyosonda istasyonlarının (8 adet) sıcaklık profili analizleri yapılmış ve her profil gözlemi için Q dönüşüm faktörleri hesaplanmıştır.

Radyosonda sıcaklık profil analizinden elde edilen Q değerleri kullanılarak tüm Türkiye için duyarlıklı Q dönüşüm modeli araştırılmış ve belirlenmiştir. Belirlenen Q dönüşüm faktörü modelleri Ankara ve İstanbul GNSS-RS istasyonlarında test edilmiştir. Modelden hesaplanan yoğunlaşabilir su buharı değerleri ile radyosonda istasyonlarının verdiği su buharı

değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonuçları irdelenerek, modellerin doğrulukları belirlenmiştir.

Emardson, istasyondaki yüzey sıcaklığı, yılın günü ve enleme bağlı olarak hibrit modelini geliştirmiştir. Şekil 2'den Q dönüşüm faktörünün zamana göre yıllık periyodik değişiminin olduğu görülmektedir. Türkiye'deki radyosonda istasyonlarının yükseklikleri minimum 4 m ile maksimum 1.869m arasında değişmektedir. Bu yükseklik farklarının Q dönüşüm faktörüne etkisi hibrit model yükseklik parametresi ile genişletilerek araştırılmıştır. Yükseklik parametresinin signifikant (anlamlı) olduğu bulunmuştur.

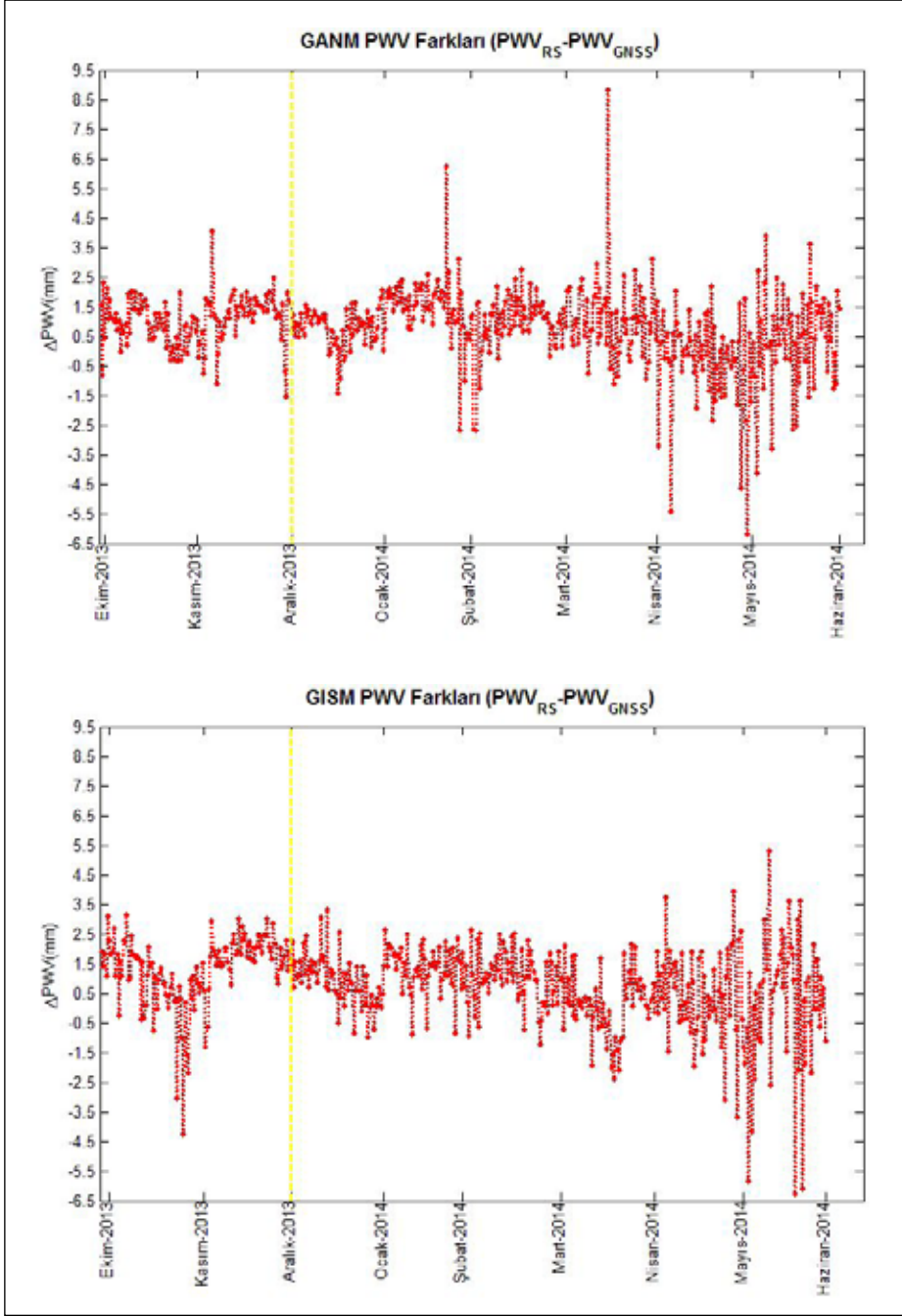
Geliştirilen Q modellerinin karesel ortalama hataları (rms) karşılaştırıldığında Çizelge 2'den; istasyon yüksekliğiyle genişletilmiş hibrit modelin %1,15 duyarlıklı olduğu görülmektedir. Bunun yoğunlaşabilir su buharına etkisi, $PWV=50 \text{ mm}$ için 0,5mm ve $PWV=100 \text{ mm}$ için yaklaşık 1 mm olacaktır. Yükseklik parametresi ile genişletilmiş hibrit modelin kullanılması ile yapılan $PWV_{GNSS} - PWV_{RS}$ farkı karşılaştırması, Çizelge 3'te Ankara için ortalama 0,92 ve karesel ortalama hata $\pm 1,24\text{mm}$, İstanbul için ortalama 0,82 ve karesel ortalama hata $\pm 1,38\text{mm}$ olduğu gösterilmiştir. Ortalama ve karesel ortalama hatalar arasındaki farklar signifikant değildir. Bu nedenle, tüm Türkiye için, radyosonda duyarlığına göre GNSS ile yoğunlaşabilir su buharı belirlemenin duyarlığı ortalama $\pm 1,3 \text{ mm}$ alınabilir.

$PWV_{GNSS} - PWV_{RS}$ karşılaştırma sonuçları, toplam zenit gecikmelerinin hesaplandığı jeodezik ağı seçimini ve hesaplamada kullanılan stratejinin doğruluğunu da kanıtlamaktadır. Polinom model sadece yersel sıcaklığı içermekte ve yıllık model yersel sıcaklığı içermediğinden, Türkiye için en genel model olan hibrit modellerin tercih edilmesi uygun seçim olacaktır.

TUSAGA-Aktif istasyonlarının GNSS-MET ağlarına dönüştürülmesi ile tüm Türkiye için gerçek zamana yakın su buharının konumsal ve zamansal değişimleri yüksek doğruluklarla izlenebilir. Bunun için, gerçek zamana yakın (NRT) ve hassas nokta konum belirleme (PPP) algoritmalarının TUSAGA-Aktif için geliştirilmesi uygun olacaktır.

Çizelge 4. Ankara ve İstanbul istasyonlarında GAMIT/GLOBK ile ve Q hibrit modeline (Eşitlik 10) göre hesaplanan PWV_{GNSS} test istatistiği.

	Min. (mm)	Maks. (mm)	Ort. (mm)	KOH (mm)
GANM Ankara 484 profil	-6,05	8,92	0,92	$\pm 1,24$
GISM İstanbul 460 profil	-6,21	5,20	0,82	$\pm 1,38$



Şekil 4. Ankara (GANM) ve İstanbul (GISM) istasyonlarında GAMIT/ GLOBK ile ve Qhibrit modeline (Eşitlik 10) göre hesaplanan $PWV_{RS} - PWV_{GNSS}$ farklarının grafikleri.

5. Teşekkür

Yazar, bu makalede sunulan veri ve bilgilerin elde edilmesini sağlayan 112Y350 nolu projeyi destekleyen TÜBİTAK-ÇAYDAG'a teşekkür etmektedir. Ayrıca, verilerin temin ve analizindeki katkılarından ötürü İlke Deniz ve Gökhan Gürbüz'e şükranlarını sunmaktadır.

6. Kaynaklar

- Askne, J., Nordius, H. 1987.** Estimation of Tropospheric Delay for Microwaves from Surface Weather Data. *Radio Sci.*, 22.3: 379-386.
- Baltink, HK., Van Der Marel, H., Van Der Hoeven, AGA. 2002.** Integrated Atmospheric Water Vapour Estimates from a Regional GPS Network. *J. Geophys. Res.*, 107.D3.

- Bevis, M., Businger, S., Herring, TA., Rocken, C., Anthes, RA., Ware, RH. 1992.** GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System. *J. Geophys. Res.*, 97.D14: 15787-15801.
- Bevis, M., Businger, S., Chriswell, S. 1994.** GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water. *J. Appl. Meteorol.*, 33.3: 379-386.
- Bock, O., Bouin, MN., 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, JP., 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.
- Bokoye, AI., Royer, A., O'Neill, NT., Cliche, P., McArthur, LJB., Teillet, PM., Fedosejevs, G., Thériault, JM. 2003.** Multisensor Analysis of Integrated Atmospheric Water Vapor Over Canada and Alaska. *J. Geophys. Res.*, 108.D15.
- Boutiouta, S., Lahcene, A. 2013.** Preliminary Study of GNSS Meteorology Techniques in Algeria. *Int. J. Remote Sens.*, 34:14, 5105-5118.
- Dongseob, S. 2006.** Accuracy Improvement of Precipitable Water Vapor Estimation by Precise GPS Analysis, *Doktora tezi*, SungKyunKwan Üniversitesi, Güney Kore (Korece).
- Dousa, J. 2004.** Evaluation of tropospheric parameters estimated in various routine GPS analysis. *Phys. Chem. Earth*, 29.2:167-175.
- Dousa, J. 2010.** The Impact of Errors in Predicted GPS Orbits on Zenith Troposphere Delay Estimation. *GPS Solut.*, 14.3: 229-239.
- Dousa, J., Bennitt, GV. 2013.** Estimation and evaluation of hourly updated global Zenith Total Delays over ten months. *GPS Solut.*, 17.4: 453-464.
- Emardson, TR., Derks, HJP. 2000.** On the relation between the wet delay and the integrated precipitable water vapour in the European atmosphere. *Meteorol. Appl.*, 7.1: 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, Hollanda 1340:20.
- Heise, S., Wickert, J., Bayerle, G., Schmidt, T., Reigber, Ch. 2006.** Global monitoring of tropospheric water vapor with GPS radio occultation aboard CHAMP. *Adv. Space Res.*, 37.12: 2222-2227.
- Hogg, DC., Guiraud, FO., Decker, MT. 1981.** Measurement of excess radio transmission length on earth-space paths. *Astron. Astrophys.*, 95: 304-307.
- Huang, CY., Cheng, CZ., Lin, PH., Fong, CJ., Wickert, J., Hsiao, CC. 2009.** Occultation Retrieval of Atmospheric Profiles from the FORMOSAT-3/COSMIC Mission: Early results. *Terr. Atmos. Ocean Sci.*, 20.1: 21-34.
- Jade, S., Vijayan, MSM. 2008.** GPS-based atmospheric precipitable water vapor estimation using meteorological parameters interpolated from NCEP global reanalysis data. *J. Geophys. Res.*, 113.D03106.
- 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.
- Jin, SG., Lou, O., Ren, C. 2010.** Effect of physical correlations on long-distance GPS positioning and zenith tropospheric delay estimates. *Adv. Space Res.*, 46.2: 190-195.
- Kahveci, M., Yıldız, F. 2005.** Global Konum Belirleme Sistemi Teori-Uygulama. Genişletilmiş 2. Baskı, Nobel Basımevi, Ankara, 215s.
- Liou, Y., Teng, Y., Hove, T., Liljegren, J. 2001.** Comparison of precipitable water observations in the near Tropics by GPS, Microwave Radiometer, and Radiosondes. *J. Appl. Meteorol.*, 40.1: 5-15.
- Lutz, SL. 2008.** High-resolution GPS tomography in view of hydrological hazard assessment, *Doktora tezi*, Swiss Federal Institute of Technology, Zürih, İsviçre.
- Mekik, C., Yıldırım, O., Bakıcı, S. 2011.** The Turkish RTK CORS Network (TUSAGA-Aktif) Infrastructure. *Sci. Res. Essays*, 6.19: 3986-3999.
- Müidla, P., Rannat, K., Uba, P. 2009.** A Mathematical Models of Tropospheric Water Vapor Tomography, Second International Conference on Environmental and Computer Science, Dubai, Birleşik Arap Emirlikleri.
- Ning, T. 2012.** GPS Meteorology: With Focus on Climate Applications, Department of Earth and Space Sciences, Chalmers University of Technology, *Doktora tezi*, Gothenburg, İsveç.
- Pacione, R., Bock, O., Dousa, J. 2014.** GNSS Atmospheric Water Vapor Retrieval methods, GNSS4SWEC Workshop, LMU Munich, 26-28 Şubat, Münih Almanya.
- Pottioux, E., Berckmans, J., Haan, S., Bruyninx, C. 2014.** Producing IWV Maps for Guiding Nowcasting of Severe Weather, GNSS4SWEC Workshop, LMU Munich, 26-28 Şubat, Münih Almanya.
- Perler, D. 2011.** Water Vapor Tomography using Global Navigation Satellite Systems, *Doktora tezi*, Swiss Federal Institute of Technology, Zürih, İsviçre.
- Rohm, W. 2012.** The precision of humidity in GNSS tomography. *Atmos. Res.*, 107: 69-75.

- Rohm, W., Yuan, Y., Biadeglne, B., Zhang, K., Marshall, J. 2014.** Ground-based ZTD/IWV estimation system for numerical weather prediction in challenging weather conditions. *Atmos. Res.*, 138: 414-426.
- Sapucci, L. F. 2014.** Evaluation of Modeling Water-Vapor-Weighted Mean Tropospheric Temperature for GNSS-Integrated Water Vapor Estimates in Brazil. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 53.3: 715-730.
- Schmidt, T., Wickert, J., Heise, S., Flechter, F., Fagiolini, E., Schwarz, G., Zenner, L., Gruber, T. 2008.** Comparison of ECMWF analysis with GPS radio occultations from CHAMP. *Ann. Geophys.*, 26.11: 3225-3234.
- Schmidt, T., Wickert, J., Haser, A. 2010.** Variability of the upper troposphere and lower stratosphere observed with GPS radio occultation bending angles and temperatures. *Adv. Space Res.*, 46.2: 150-161.
- Sharifi, MA., Khaniani, AS., Joghaten, i M., Schmidt, T., Masoumi, S., Wickert, J. 2013.** Tropause analysis over Iranian region using GPS radio occultation data. *Adv. Space Res.*, 52.9: 1700-1707.
- Sierk, B. 2000.** Solar Spectrometry for Determination of Tropospheric Water Vapor, *Doktora tezi*, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, İsviçre.
- Schüler, T., 2001.** On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation, *Doktora tezi*, Münih Üniversitesi, Münih, Almanya.
- Solbrig, P. 2000.** Untersuchungen über die Nutzung numerischer Wettermodelle zur Wasserdampfbestimmung mit Hilfe des Global Positioning System, Munich: Institute of Geodesy and Navigation, University FAF (Almanca).
- 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.*, 25.9: , 1935-1948.
- Tregoning, P., Boers, R., O'Brien, D., Hendy, M. 1998.** Accuracy of Absolute Precipitable Water Vapor Estimates from GPS Estimates. *J. Geophys. Res.*, 103.D22: 28701-28710.
- Troller, M.R. 2004.** GPS Based Determination of the Integrated and Spatially Distributed Water Vapor in the Troposphere, *Doktora tezi*, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, İsviçre.
- Vespa, F., Benedetto, C., Pacino, R. 2004.** The Use of Refractivity by Radio Occultation Technique for the Derivation of Atmospheric Water Vapor Content. *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C*, 29.2: 257-265.
- Wang, J., Zhang, L., Dai, A., 2005.** Global Estimates of water-vapor-weighted mean temperature of atmosphere for GPS applications. *J. Geophys. Res.*, 110.D21.
- Wickert, J., Michalak, G., Schmidt, T., Beyerle, G., Cheng, C., Healy, SB., Heise, S., Huang, C., Jakowski, N., Köhler, W., Mayer, C., Offiler, D., Ozawa, E., Pavelyev, AG., Rothacher, M., Tapley, B., Arras, C. 2009.** GPS Radio Occultation Result from CHAMP, GRACE and FORMOSAT-3/COSMIC. *Terr. Atmos. Sci.*, 20.1: 35.