

GPS'DEN ELDE EDİLEN SU BUHARI VERİLERİNİN METEOROLOJİK AMAÇLI KULLANIMI (GPS METEOROLOJİSİ)

Muzaffer KAHVECİ * , Bülent YAĞCI * * , Ayhan CİNGÖZ * , M.Kürşad ATALAR * *

* Harita Genel Komutanlığı-ANKARA

* * Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü-ANKARA
muzaffer.kahveci@hgk.mil.tr

ÖZET

Genelde jeodezik, jeodinamik ve navigasyon amaçlı çalışmalara yönelik olarak kurulan Sabit GPS (SGPS) ağlarından elde edilen veriler meteorolojik çalışmalara da katkı sağlamaktadır. Bu çalışma ile SGPS istasyonlarında mevcut meteorolojik sensörlerle ölçülen saatlik sıcaklık ve basınç değerleri ile GPS gözlemlerinden yararlanarak yağışa dönüşebilir su buharı verileri (PWV) hesaplanmıştır. Hesaplama sonucunda elde edilen GPS_IPWV değerlerinin radyosonde verileri ile doğrulaması yapılmış ve Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nde(DMİ) kullanılan MM5 hava tahmin modeli sonuçları ile de karşılaştırılmıştır. Ankara ve İstanbul'da farklı yerlerde bulunan iki SGPS ve iki radyosonde istasyonuna ait veriler kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışmada, GPS verilerinden hesaplanan PWV değerleri ile radyosonde ve MM5 modelinden elde edilen PWV değerleri arasında oldukça uyumlu sonuçlara ulaşılmıştır.

Bu başlangıç çalışması ile, Türkiye'de henüz yeni bir alan olan GPS meteorolojisi çalışmalarının geliştirilmesi gerektiği, GPS hesaplamalarında kullanılmak üzere her SGPS istasyonuna bir meteoroloji sensörü kurmak yerine, DMİ tarafından işletilen mevcut istasyon verilerinin kullanılmasının hem jeodezi-jeofizikçiler hem de meteorologlar açısından daha ekonomik ve anlamlı olacağı değerlendirilmektedir.

ABSTRACT

GPS data obtained from the permanent GPS networks, which are usually established for the purposes of surveying, geodesy, geophysics and navigation, contribute to the meteorological studies as well. In this study, using continuous GPS data and hourly temperature and pressure data observed at GPS sites, IPWV values are computed and these values are verified by the observed radiosonde data. And these GPS results are also compared with the values obtained from MM5 model. This study is realized using the data from two GPS and two radiosonde stations in Ankara and İstanbul. It is shown that IPWV data obtained from GPS are in good agreement either with those of radiosonde measurements and the values of MM5 model production.

From this preliminary study it can be concluded that GPS meteorology studies should be improved, and the data gathered from the existing stations pertaining to State Meteorological Service are to be used instead of establishing new meteorological sensors at each GPS site which is thought to be more economical and reasonable for meteorologists, geodesists and geophysicians.

1. GİRİŞ

Su buharının atmosferdeki dağılımı ile ilgili bilgi, hava tahmini çalışmaları ve iklim araştırmalarında büyük öneme sahiptir. Su buharı, zamansal ve uzaysal ölçekli küresel meteorolojik çalışmalardan, bölgesel meteorolojik çalışmalara kadar önemli bir rol oynamaktadır. Su buharı, atmosferi oluşturan temel bileşenlerden en değişken özelliğe sahip olanıdır. Ayrıca, global iklim sisteminde kritik rol oynayan sera gazı (greenhouse gas) özelliğine sahiptir. Bir başka ifade ile, su buharı, atmosferin diğer bileşenleri ile karşılaştırıldığında sera etkisine en çok katkıyı yapan gazdır.

Meteorolojistler, su buharının yatay ve düşey dağılımını belirlemek için çeşitli yöntemler geliştirmişlerdir. Bunlardan meteoroloji balonları (radyosonde) radyo sinyallerinden yararlanarak yer istasyonlarına atmosfer içindeki sıcaklık, basınç, nem ile rüzgâr hız ve yönü ile ilgili bilgiler göndermektedir. Normal radyosonde aletleri ile sıcaklık ≈ 0.2 C° ve basınç ise ≈ 3.5 doğrulukta elde edilebilmektedir. Bu sapma miktarları soğuk ve kuru bölgelerde daha da artabilmektedir. Radyosonde gözlemlerinin düşey kesitte iyi bir çözünürlük sağlamasına karşın, bazı kısıtlamaları da bulunmaktadır. Örneğin, bu aletler pahalıdır ve bu nedenle kullanıldıkları istasyon sayısı ve günlük fırlatma sayısı (örneğin günde iki kez) sınırlı tutulmaktadır. Bu kısıtlamalar nedeniyle radyosonde tekniği su buharının zamansal ve uzaysal değişkenliğini belirlemede yetersiz kalmaktadır. Dolayısıyla, su buharının analizindeki bu kısıtlamalar, kısa dönemli (0-24 saat) yağış tahmininde temel hata kaynağını oluşturmaktadır.

Radyosonde dışında yer-bazlı, gökyüzüne doğru bakan su buharı radyometreleri (WVR; Water Vapor Radiometers) atmosferik su buharı tarafından üretilen mikrodalga ışınımını ölçmekte ve belirli bir hat boyunca I WV (Integrated Water Vapor) değerlerini belirleyebilmektedir. Ayrıca, aynı hat boyunca ILW (Integrated Liquid Water) değerini de eş zamanlı olarak belirleyebilmektedir. Gerçekte WVR aletleri, gökyüzü parlaklık sıcaklığını (sky brightness temperature) iki ya da daha fazla frekansta ölçmektedir. Bu tip WVR aletleri ışıktan ya da orta yoğunluktaki bulut örtüsünden etkilenmemekle birlikte, yoğun bulut örtüsünde ve yağmurda verimli çalışmamaktadır.

Bu makalede atmosferik su buharının belirlenmesine yönelik olarak son 4-5 yıldan beri bir çok ülkede yoğun şekilde kullanılmakla birlikte, Türkiye’de yeni sayılabilecek bir yaklaşım hakkında bilgi verilmeye çalışılacaktır. Bu yeni yaklaşım; özellikle jeodezici ve jeofizikçiler tarafından nirengi ağları oluşturma ve depremlerin önceden belirlenmesi gibi amaçlarla uzun bir süredir kullanılan Global Konum Belirleme Sistemi(GPS) verilerinden meteorolojik amaçlı olarak yararlanılmasıdır.

İkinci bölümde, GPS hakkında kısaca bilgi verilmekte, üçüncü bölümde GPS gözlemlerini etkileyen hata kaynaklarından birisi olan atmosferik etkiler (iyonosfer ve troposfer) hakkında teorik bilgi verilmekte, dördüncü bölümde GPS Meteorolojisi tanıtılmakta, beşinci bölümde Ankara ve İstanbul’da bulunan iki sabit GPS istasyonuna ait veriler ile aynı bölgelerdeki meteoroloji istasyonlarından elde edilen radyosonde verilerinden yararlanarak yapılmış bir doğrulama çalışması ve sayısal uygulama anlatılmakta, altıncı bölümde ise sonuç ve öneriler yer almaktadır.

2. GLOBAL KONUM BELİRLEME SİSTEMİ (GPS)

Hesaplama tekniği ve uzay çalışmalarındaki hızlı gelişmeler, 1980’li yılların en önemli ürünlerinden biri olan Global Konum Belirleme Sistemi (GPS)’nin günlük yaşama girmesine neden olmuştur. “NAVSTAR/GPS” (Navigation Satellite Timing And Ranging/Global Positioning System) ABD Savunma Dairesi (Department of Defence) tarafından geliştirilen, elinde GPS alıcısı olan herhangi bir kullanıcının, uydu sinyalleri yardımıyla;

- Herhangi bir yer ve zamanda,
- Her türlü hava koşullarında,
- Global bir koordinat sisteminde,
- Yüksek duyarlılıkta,
- Ekonomik olarak,
- Anında ve sürekli konum, hız ve zaman belirlemesine olanak veren bir radyo navigasyon sistemidir.

GPS’in sivil ve bilimsel amaçlı kullanım alanları çok genel olarak;

- Kara, deniz ve hava araçlarının navigasyonu,

- Jeodezik ve jeodinamik amaçlı ölçmeler,
- Kadastral ölçmeler,
- Kinematik GPS destekli fotogrametrik çalışmalar,
- Yerel ve global deformasyon ölçmeleri,
- Araç takip sistemleri,
- Uçakların, görüşün sınırlı ya da hiç olmadığı hava koşullarında iniş ve kalkışı,
- Aktif kontrol ağları,
- CBS veri tabanlarının geliştirilmesi,
- Turizm, tarım, ormancılık, spor, arkeoloji,
- Asayiş,
- Hidrografik ölçmeler ve
- Meteorolojik çalışmalara veri desteği

şeklinde sıralanabilir.

Klasik ölçme teknikleri ile karşılaştırıldığında GPS'in üstün tarafları aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

- Noktalar arası görüş zorunluluğu ortadan kalkmıştır. GPS alıcı anteninin uydu sinyalinin izleyebilmesi için gökyüzünü görmesi yeterlidir.
- Nokta yeri seçiminde noktaların en yüksek yerlerde olması gibi zorunluluklar ortadan kalkmıştır. Gereksinim duyulan ve GPS ölçüsünün yapılmasına olanak veren her yerde nokta tesisi yapılabilmektedir.
- GPS ölçülerinin yapılması büyük oranda hava şartlarından bağımsızdır.
- Gece ve gündüz sürekli (24 saat) ve gerçek zamanlı ölçüm yapılabilmektedir.
- GPS ölçülerinin yapılışındaki hız ve aletlerin kullanım kolaylığı, ölçücü hatalarının olmaması (anten yüksekliği ölçümü hariç) nedenleriyle ekonomik bir sistemdir.
- Üç boyutlu nokta koordinatları elde edilmektedir.
- Elde edilen jeodezik doğruluklar en duyarlı klasik jeodezik tekniklerle elde edilenlerle eşit ya da daha iyidir.

GPS' in zayıf tarafı ise, alıcı anteninin mutlaka açık gökyüzünü görmesi gerektiğidir. Başka bir deyişle, GPS sinyalleri radyo sinyalleri gibi kuvvetli olmadığından, kapalı yerlerde, çok sık ağaçlıklı bölgelerde ve madenlerde kullanılamamaktadır.

GPS sistemi üç ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar uydulardan oluşan Uzay Bölümü, tüm sistemi yöneten Kontrol Bölümü ile alıcıların bulunduğu Kullanıcı Bölümüdür (Kahveci ve Yıldız 2005).

Uzay Bölümü

Uzay Bölümü ekvator ile 55 derecelik eğim yapan 6 yörünge düzlemi üzerine yerleştirilmiş 21 esas ve 3 yedek olmak üzere toplam 24 uydudan oluşacak şekilde planlanmıştır. Ancak, ortalama ömrü 7.5-10 yıl olarak hesaplanmış olan bazı uyduların hala sorunsuz olarak çalışmaya devam etmeleri nedeniyle toplam 30 GPS uydusu faaliyet göstermektedir.

Uzay bölümünün genel özellikleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Uydular yeryüzünden yaklaşık 20200 km (yer merkezinden 26500 km) uzaklıkta olup 11 saat 58 dakikada bir tam devir yaparlar.
- Yeryüzünde herhangi bir yer ve zamanda gözlenebilecek en az uydu sayısı 4'tür ve her bir uydu yaklaşık 5 saat ufuk hattı üzerinde kalır. Türkiye bölgesinde enleme göre değişmekle birlikte gözlenebilen en çok uydu sayısı 10'dur.

Kontrol Bölümü

Kontrol Bölümü; Ana kontrol istasyonu, yer antenleri ve izleme istasyonlarını içeren İşletim Kontrol Sistemi'nden meydana gelmektedir. Tüm GPS uyduları dünya üzerinde uygun dağılmış, çok hassas saatlerle donatılmış, konumu iyi bilinen 6 sabit izleme istasyonundan (Hawaii, Colorado Springs, Cape Canaveral, Ascension, Diego Garcia, Kwajalein) izlenmektedir. Bu istasyonların amacı, günlük olarak uyduların sağlıklı biçimde çalışmalarını sağlamak, toplanan verilerin irdelenmesi ile uydu yörüngelerinin belirlenmesi, uydu saatlerinin düzeltmelerinin hesaplanması ve yeni hesaplanan yörünge saat düzeltmesi gibi bilgilerin uydulara yüklenmesidir.

Kullanıcı Bölümü

GPS çok farklı amaçlar için kullanılabilen bir sistem olup, elinde GPS alıcısı bulunan herkes bir kullanıcıdır. GPS'in kullanım alanlarına bakıldığında Kullanıcı Bölümü için askeri ve sivil kullanıcılar olmak üzere iki ayrı sınıflama yapılabilir.

3. ATMOSFERİK GECİKME ETKİSİ

GPS ölçülerinden elde edilen sonuçları da etkileyen bazı raslantısal ve sistematik etkiler (bias) söz konusudur. Bunların bazıları görelî konum belirleme yöntemlerinin kullanılması durumunda bile bozucu etkilerini sürdürmektedir. Bu etkiler GPS'in birçok kullanım alanı için (örneğin navigasyon amaçlı uygulamalar, askeri uygulamalar vb.) fazla önemli bir sakınca oluşturmamakla birlikte özellikle bilimsel amaçlı çalışmalarda (yüksek doğruluklu konum belirleme, yer kabuğu hareketlerinin belirlenmesi, meteorolojik çalışmalar, jeoit belirleme vb.) bu etkilerin davranışı ve büyüklüğü çok iyi modellendirilmeli ve kontrol altında tutulmalıdır. Bu bozucu etkilerden meteorolojik çalışmalarda önemi olanlar iyonosfer ve troposfer etkileridir (Kahveci ve Yıldız 2005).

3.1. İyonosfer Etkisi

İyonosfer, hava moleküllerinin ileri derecede yoğunlaşmış halde bulunduğu ve elektrik iletkenliği kazandığı yüksek atmosfer bölgelerinin tümüdür. İyonosferde atomlardan kopmuş serbest elektronların sayısı, elektromanyetik dalgaların yayılmasını değiştirmeye yetecek kadar çoktur.

İyonlaşma şiddeti, elektron yoğunluğu ile ifade edilmekte olup, çok değişken olan bu yoğunluk cm^3 'de 100000 ile birkaç milyon serbest elektron arasında değişmektedir. İyonosfer genel olarak, elektromanyetik dalgaların yayılmasını etkileyebilecek kadar serbest elektron yoğunluğuna sahip üst atmosfer tabakası (~70-3000 km) olarak tanımlanabilir. İyonlaşma ve serbest elektron yoğunluğu doğrudan güneş ışınımına (radyasyon yoğunluğuna) bağlıdır. Buradan, iyonosferin elektromanyetik dalgalar üzerindeki etkisinin geceye göre gündüz daha fazla olacağı sonucuna varılabilir.

İyonosferin elektromanyetik dalgaların yayılmasındaki etkisi Toplam Elektron Muhteviyatı (**TEC**; **Total Electron Content**) ile ifade edilmektedir. TEC, uydu-alıcı arasındaki sinyal yolu boyunca m^2 'deki toplam elektron sayısı olarak da ifade edilebilir. TEC, genel olarak, yerel zamanla yaklaşık saat 14:00 civarında maksimum günlük değere ulaşmaktadır. Gece yarısı ile sabah 05:00 saatleri arasında minimum değere ulaşmaktadır. Gece süresince olan ortalama iyonosferik etki 10 nanosaniye (~ 3 metre), gündüz ise 50 nanosaniye (~15 m) kadardır (Spilker, 1980). Bunların dışında gözlenen uydunun yükseklik açısının da iyonosferik etkinin büyüklüğü üzerinde etkisi vardır. Örneğin, düşük yükseklik açılarında iyonosferik etki gündüz ve gece için verilen değerlerin yaklaşık üç katı kadardır. Yani, gündüz 150 nanosaniye, gece 30 nanosaniyedir.

İyonosferin GPS ile yapılan kod ve faz ölçülerine olan etkileri farklıdır. Kod ölçüleri için iyonosferik grup gecikme etkisi (group delay) söz konusu iken faz ölçüleri için faz hızlanması (phase advance) söz konusudur. İyonosfer, radyo dalgalarını dağıtıcı bir özelliğe sahip olup, bu bozucu etki radyo dalgalarının frekansına bağlı olarak değişim gösterir. Ölçülen uydu alıcı uzunluğunda iyonosferden dolayı bir azalma ya da fazlalık söz konusudur.

3.2. Troposfer Etkisi

GPS uydularından yayınlanan sinyaller atmosfere girmeden önce uzaydaki boşlukta ilerlerler. Bu sinyaller atmosfere girdiğinde içinden geçtikleri ilk tabaka iyonosferdir. GPS sinyallerinin iyonosferdeki ilerleme hızı, sinyal frekansına bağlıdır. Dolayısıyla, iyonosfer tabakasının GPS sinyallerine olan etkileri çift-frekanslı ölçülerle büyük oranda giderilebilmektedir. İyonosferden geçen sinyaller, sırasıyla mezosfer, stratosfer ve troposfer tabakalarından ilerlerler.

Troposfer (nötr atmosfer), havanın yeryüzü ile temas halinde olan en alt tabakasıdır. Kalınlığı kutuplarda yaklaşık 8 km, ekvatorada ise yaklaşık 18 km'dir. Meteorolojik olaylar (hava olayları) genel olarak troposferin 3-4 km'lik alt kısımlarında görülmektedir. İyonosfer tabakasının aksine troposfer tabakası elektrik yüklü olmadığından, yaklaşık 30 GHz'in altındaki radyo frekansları için dağıtıcı özelliğe sahip değildir. Bu nedenle, troposfer tabakasında GPS sinyallerinin yayılması frekans-bağımlı değildir. Dolayısıyla, troposferin faz ve kod ölçülerine olan etkisi aynı büyüklüktedir. Bu nedenle, GPS alıcılarının çift frekans özelliğinden yararlanarak bu etkiyi gidermek olanaklı değildir.

Nötr (iyonize olmamış) atmosferin radyo frekanslarında yayınlanan elektromanyetik dalgalara olan etkisi troposferik gecikme etkisi (ya da troposferik refraksiyon, zenit troposferik gecikme) olarak isimlendirilmektedir. Nötr atmosfer elektromanyetik dalgaların hızını ve yönünü değiştirir. Bu etki elektromanyetik dalganın yavaşlamasına ve eğilmesine neden olur. Her iki etkinin neden olduğu gecikme uydu ile alıcı arasındaki sinyal yolu boyunca ortam kırılma indisinin (n) değişimine bağlıdır. Bu gecikme miktarı ise "S" sinyal yolu boyunca,

$$\Delta S_{\text{trop}} = \int_a^b (n - 1) dS + (S - G) \quad (1)$$

eşitliği ile ifade edilebilir (Kahveci ve Yıldız 2005). Zenit doğrultusundaki gözlemlerde (1) eşitliğinde S=G olacaktır. Elektromanyetik dalganın eğilmesinden dolayı gelecek etkiyi ifade eden (S-G) terimi çok küçük olduğundan gözardı edilirse; problem (1) eşitliğindeki integralin alınması haline dönüşür. Böylece troposferik gecikme etkisi,

$$\Delta S_{\text{trop}} = \int_a^b (n - 1) dS \quad (2)$$

olarak yazılabilir. Burada, kırılma indisi (n) yerine kırıcılık (N) kullanılırsa (2) eşitliği,

$$\Delta S_{\text{trop}} = 10^{-6} \int_a^b N(s) dS \quad (3)$$

$$N=(n-1) \times 10^{-6}$$

halini alır. (3) eşitliğindeki atmosferik kırılma N(s); sıcaklık, basınç ve su buharının bir fonksiyonu olarak,

$$N(s) = k_1 \cdot \frac{P_d}{T} + k_2 \cdot \frac{e}{T} + k_3 \cdot \frac{e}{T^2} \quad (4)$$

ile ifade edilebilir. Burada P_d , kuru havanın toplam atmosferik basıncını (mbar), e , su buharı kısmi basıncını (mbar) ve T , kelvin biriminde atmosferik sıcaklığı göstermektedir. k_1 , k_2 ve k_3 katsayıları Tablo-1'de verilmiştir.

Tablo-1: k_1 , k_2 , ve k_3 için deneysel olarak belirlenmiş değerler.

k_1 (K/mbar)	77.604 ± 0.014
k_2 (K/mbar)	64.790 ± 0.080
k_3 (K ² /mbar)	$(3.776 \pm 0.004) \times 10^5$

Nötr atmosfer (zenit troposferik gecikme), iki ideal gazın karışımı (kuru hava ve su buharı) olarak düşünülürse, (4) eşitliği,

$$N = N_d(s) + N_w(s) \quad \text{yada} \quad ZTD = ZHD + ZWD \quad (5)$$

$$N_d(s) = ZHD = 77.6(P/T) \quad (6)$$

$$N_w(s) = ZWD = 3.73 \times 10^5 (e/T^2) \quad (7)$$

ZHD: Zenit hidrostatik gecikme

ZWD: Zenit Islak gecikme

olarak iki ana bileşenle ifade edilebilir. Bunlardan $N_d(s)$ hidrostatik bileşen, $N_w(s)$ ise ıslak bileşen olarak adlandırılmaktadır.

Troposferik gecikmenin yaklaşık %90'ı hidrostatik bileşen ve geri kalan %10'luk kısmı ise ıslak bileşenden oluşmaktadır. $N_d(s)$ 'nin troposferdeki değişimi çok küçük olup, 40 km ve daha yukarı yüksekliklerde gözardı edilebilir. $N_w(s)$ ise yalnızca yere yakın yükseklikler (0-5 km) için önemlidir (Davis ve diğ. 1985).

Troposferik gecikme hesabında kullanılan atmosferik parametreler standart troposferik modellerden, gözlem noktasında ölçülen meteorolojik verilerden (basınç, kuru termometre sıcaklığı ve ıslak termometre sıcaklığı) veya su buharı radyometrelerinden ve radyosonde verilerinden yararlanarak elde edilmektedir.

Günümüzde en çok kullanılan troposferik etki hesabı modelleri Saastamoinen ve Hopfield modelleridir. Bunlardan Saastamoinen modeli aşağıdaki şekilde verilmektedir, (Saastamoinen 1973).

$$\Delta S_{\text{trop}}^z = 0.002277 \cdot \frac{1}{\cos Z} \cdot \left[P + \left(\frac{1255}{273.15 + T} + 0.05 \right) \cdot e - B \cdot \frac{1}{\tan^2 Z} \right] + \delta L \quad (8)$$

Burada,

ΔS_{trop}^z : metre biriminde uydu-alıcı uzaklığına getirilecek olan düzeltmeyi,

Z: uydu zenit uzaklığı,

P: atmosferik basınç (mbar),

T: mutlak sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$),

e: su buharı basıncı (mbar),

B: noktanın yüksekliğinden dolayı tablodan alınacak katsayı,

δL : uydu zenit açısına ve nokta yüksekliğine bağlı olarak tablodan alınacak olan düzeltme değeri (metre) olup,

$$TD = 273.15 + T$$

yazılırsa,

$$e = \frac{H}{100} \cdot \exp(-37.2465 + 0.213166 \cdot TD - 0.000256908 \cdot TD^2) \quad (9)$$

elde edilir. (9) eşitliğindeki H, nisbi nemi ifade etmektedir.

4. GPS METEOROLOJİSİ

GPS meteorolojisi ile, GPS verilerinin atmosferik durumların analizi ve izlenmesi amacıyla kullanılması ifade edilmektedir. Başka bir ifadeyle GPS meteorolojisi, GPS yardımıyla elde edilen su buharı verilerinin, orta vadeli (mesoscale) modelleme, veri birleştirilmesi, kuvvetli hava hadiseleri, bulut dinamikleri, klimatoloji, hidroloji vb. alanlarda kullanımını konu edinir (Ware ve diğ., 2000). Yukarıda da kısaca anlatıldığı gibi GPS uyduları radyo sinyalleri yayınlamaktadır. Yeryüzündeki alıcılarda kaydedilen bu sinyallerin analizi ile atmosferik kırılma (refractivity) profil verileri elde edilebilmektedir. Bu profiller ise, eğer ölçü noktasına ait sıcaklık profili mevcutsa, troposferik nem profiline dönüştürülebilmektedir.

Yeryüzünde tesis edilmiş olan sabit GPS istasyonlarında sürekli gözlem yapılarak toplanan veriler yağışa dönüşebilir su buharı (IPWV; Integrated Precipitable Water Vapor)'nın belirlenmesinde kullanılabilir. Yurt dışındaki birçok meteoroloji kuruluşunca yapılmış olan çalışmalarda, GPS gözlemlerinden yararlanarak belirlenmiş atmosferik verilerin hava tahmininin iyileştirilmesine olumlu katkısı olduğu kanıtlanmıştır (Ferretti ve diğ. 2005).

GPS sinyalinin atmosferik gecikmesinin nedeni; atmosferik kırılmanın (refraksiyonun) sıcaklık, basınç ve neme olan duyarlılığından kaynaklanmaktadır. GPS uydusu ile GPS yer istasyonu arasındaki sinyal boyunca meydana gelen toplam gecikme, esas olarak, toplam atmosferik kitleye (yüzey basıncı ve sütun atmosferik nem hacmi) bağlıdır. Normal olarak GPS veri işleme aşamasında, ölçü noktası etrafındaki ortalama atmosferik özellikleri yansıtan tek bir gecikme değeri elde edilmektedir. Bu nedenle, yer istasyonundan her bir uyduya olan gecikmeyi belirleyecek daha gelişmiş yöntemlere gereksinim vardır. Bu sağlandığı takdirde, nem hakkında elde edilecek bilginin mevcut durumdan yaklaşık 10 kat daha fazla olacağı düşünülmektedir. Bu konuyla ilgili olarak Avrupa'da bir çok proje çalışması yürütülmektedir. Bunlara **COST Action 716** (Exploitation of Ground-based GPS for Climate and Numerical Weather Prediction Analysis) ve **MAGIC** (Meteorological Applications of GPS Integrated Water Vapor Measurements in the Western Mediterranean) projeleri örnek olarak verilebilir (Haase vd. 2001). Ayrıca, Türkiye'den DMI'nin de üyesi olduğu "Avrupa Meteorolojik Amaçlı Uydulardan Yararlanma Teşkilatı" (EUMETSAT, European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites) meteorolojik gözlemlerde yeni bir dönem açacağı kabul edilen EUMETSAT Kutupsal Sistemi'ni (EPS, EUMETSAT Polar System) gerçekleştirme çabasıdır. Bu sistem, üç adet meteorolojik uydudan (MetOp) oluşmakta ve yeryüzü ikliminin izlenmesi ile hava olaylarının gözlenmesi amacıyla çok sayıda farklı aletleri taşımaktadır. Bu aletlerden bir tanesi de GRAS (Global Navigation Satellite System Receiver for Atmospheric Sounding) alıcısıdır. Bu projenin alt aşaması olan ve Danimarka Meteoroloji Enstitüsü sorumluluğunda yürütülen GRAS Meteoroloji SAF (Satellite Application Facilities) projesi, GRAS alıcılarından elde edilecek verilerle ilgilenmektedir. GRAS alıcıları ile, GPS uydu sinyalleri de kullanılarak atmosferdeki sıcaklık, basınç ve su buharı değerleri elde edilmektedir. (Söz konusu proje hakkında ayrıntılı bilgiye "grassaf.dmi.dk" internet adresinden ulaşılabilir.)

Zenit troposferik gecikme (ZTD; Zenith Tropospheric Delay) değerleri sayısal hava tahmin modellerine (NWP: Numerical Prediction Model) doğrudan girdi olabilmesine karşın, ZTD bileşeni olan ZWD'nin IWV'ye dönüştürülerek kullanılması iklim araştırmalarında önemli bir yer tutmaktadır. ZWD'nin IWV'ye dönüştürülebilmesi için çalışma bölgesi üzerindeki ortalama sıcaklığın bilinmesi gerekmektedir. Bu değer kesin olarak bilinemediğinden, bu amaçla yüzey sıcaklık değerlerinden yararlanarak regresyon analizi ile ortalama sıcaklık değerleri elde edilmektedir. Araştırılan büyüklüklere bakıldığında; ZTD değerlerinin metre, ZWD değerlerinin santimetre ve IWV değerlerinin milimetre mertebesinde olduğu görülecektir. Örnek olarak, Avrupa için IWV değerlerinin büyüklüğü 0 ile 40 mm arasında değişim göstermektedir.

Gözlenen zenit ıslak bileşeni (ZWD) ile düşey kesitteki IWV arasındaki matematiksel ilişki ;

$$I WV = \int \rho_v dz \approx \kappa \cdot ZWD \quad (10)$$

$$\frac{1}{\kappa} = 10^{-6} (k_3/T_m + k_2') R_v$$

$$T_m = \frac{\int (P_v/T) dz}{\int (P_v/T^2) dz}$$

ile verilmektedir. Burada R_v , su buharının kısmi basıncı (gaz sabitesi), $k_3=(3.776 \pm 0.004) \cdot 10^5$ (K/mbar) ve $k_2'=22.1 \pm 2.2$ (K/mbar) dir. Atmosferdeki su buharı hacmi, bazı durumlarda sıvı suyun eşdeğer sütun yüksekliği olarak da isimlendirilmektedir. Bu sıvı suyun eşdeğer sütun yüksekliği yağışa dönüşebilir su (PW; Precipitable Water) olarak bilinmektedir. Başka bir ifadeyle, suyun yoğunluğu (ρ) ile PW'nin çarpımı sonucu IWV elde edilmektedir (Bevis vd. 1992). ρ değerinin yaklaşık 1.0 g/cm^3 olduğu dikkate alınırsa, $PW=IPW$ demektir. IWV değeri, su buharının düşey dağılımı hakkında bilgi vermemekle birlikte atmosferdeki nem kapasitesi hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Bu bilgiler ise özellikle yağış tahminlerinin iyileştirilmesinde kullanılmaktadır.

Gözlenmiş olan zenit değerlerinden en iyi olasılıklı IPWV yada PW değerlerini elde edebilmek amacıyla κ sabitinin, belirli bir bölge ve zaman dilimi için geçerli T_m değerini kullanarak hesaplanması gerekmektedir. Bu ise çok sayıda radyosonde profilinin istatistik analizi ile olanaklıdır (Anthes 1983, Bai ve Feng 2003, Bevis vd. 1992).

5. GPS IPWV DEĞERLERİNİN DOĞRULAMASINA İLİŞKİN SAYISAL UYGULAMA

Bu çalışmada, GPS gözlemlerinden yararlanarak toplam ıslak zenit gecikme değeri (ZWD; Zenith Wet Delay) ve yağışa dönüşebilir toplam su buharı (IPWV; Integrated Precipitable Water Vapour) miktarının hesaplanması ve elde edilen sonuçların, Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğüne (DMİ) hava tahmini amaçlı kullanılan MM5 (Fifth Generation Mesoscale Modelling System) sayısal hava tahmin modelinden elde edilen IPWV değerleri ile karşılaştırılması hedeflenmiştir.

Bu çalışmada ilk olarak, GPS gözlemlerinden yararlanarak, 01 Mart - 30 Nisan 2006 dönemine ait toplam ıslak zenit gecikme değeri (ZWD: Zenith Wet Delay) ve yağışa dönüşebilir toplam su buharı (IPWV: Integrated Precipitable Water Vapour) miktarı hesaplanmıştır (Gözlem_IPWV). Daha sonra, bu verilerin aynı döneme ait radyosonde istasyon değerleri ile karşılaştırması yapılmış ve bir doğrulama sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, GPS'den elde edilen IPWV değerleri ile Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ) tarafından kullanılan MM5 sayısal hava tahmin modelinden elde edilen IPWV değerleri (Model_IPWV) karşılaştırılmıştır.

GPS gözlemlerinden toplam zenit gecikme (ZTD; Zenith Total Delay) değerleri elde edilebilmektedir. (5) eşitliğinde de verildiği gibi toplam zenit gecikme değeri, zenit hidrostatik gecikme (ZHD; Zenith Hydrostatic Delay) ve ZWD olarak iki bileşenle ifade edilmektedir. Ölçülmüş yüzey sıcaklık ve basınç değerleri kullanılarak, ZHD büyüklüğü yüksek doğrulukta hesaplanabilmektedir. Bu amaçla (8) eşitliği daha basit bir ifade olarak,

$$\Delta S_{trop}^z = 0.2277 * \frac{P}{f(\varphi, H)} \quad (11)$$

$$f(\varphi, H) \equiv 1 - 0.0026 * \cos 2\varphi - 0.00028 * H$$

şeklinde yazılabilir. Burada H, ölçü noktasının ortalama deniz seviyesinden olan yüksekliğini (ortometrik yükseklik), ϕ ise noktanın enlemini ifade etmektedir. (11) eşitliği ile ZHD hesaplandıktan sonra (5) eşitliğinden ZWD değeri;

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (12)$$

ile kolayca hesaplanabilir. Daha sonra ZWD'den yararlanarak IPWV değerleri (10) eşitliği ile hesaplanır.

(11) eşitliği incelendiğinde, bu ifadenin ölçülen yüzey basıncının bir fonksiyonu olduğu görülmektedir. Bu eşitliğin kullanılması durumunda basınç ölçüsünün etkisi varyans yayılma yasası uygulanarak;

$$\sigma_{ZHD} = \frac{0.2277}{f(\phi, H)} * \sigma_P \quad (13)$$

ile elde edilebilir. Buna göre, IPWV değerleri için milimetrik doğruluk elde edilmek isteniyorsa basınç ölçümünden dolayı ZHD hesaplamalarında oluşacak hata, diğer hata kaynakları ile karşılaştırıldığında göz ardı edilebilecek kadar küçük olmalıdır. IPWV'nin farklı araştırmacılar tarafından belirlenen standart doğruluğu 1 mm olup, IPWV hatasını 1 mm'nin altında tutabilmek için ölçülen basınç hatasının 1.20 hPa (mbar)'nın altında olması gerektiği farklı araştırmacılar tarafından ifade edilmektedir (Tregoning vd. 1998; Liu vd. 2000; Feng vd. 2001; Bai ve Feng 2003).

5.a. GPS IPWV Hesabı İçin Değerlendirme Stratejilerinin Belirlenmesi

Bu çalışmada GPS verilerinden yararlanarak IPWV değerlerinin hesabı ve elde edilen doğruluklar hakkında ön fikir elde edebilmek amacıyla ANKR (Ankara) ve ISTA (İstanbul) GPS noktalarındaki 24 saatlik veriler kullanılmıştır. Hesaplamalarda GAMIT (MIT ve SIO, 2000) GPS ölçülerini değerlendirme yazılımı kullanılmış olup, hesaplamalara ilişkin bilgiler Tablo-2'de verilmiştir.

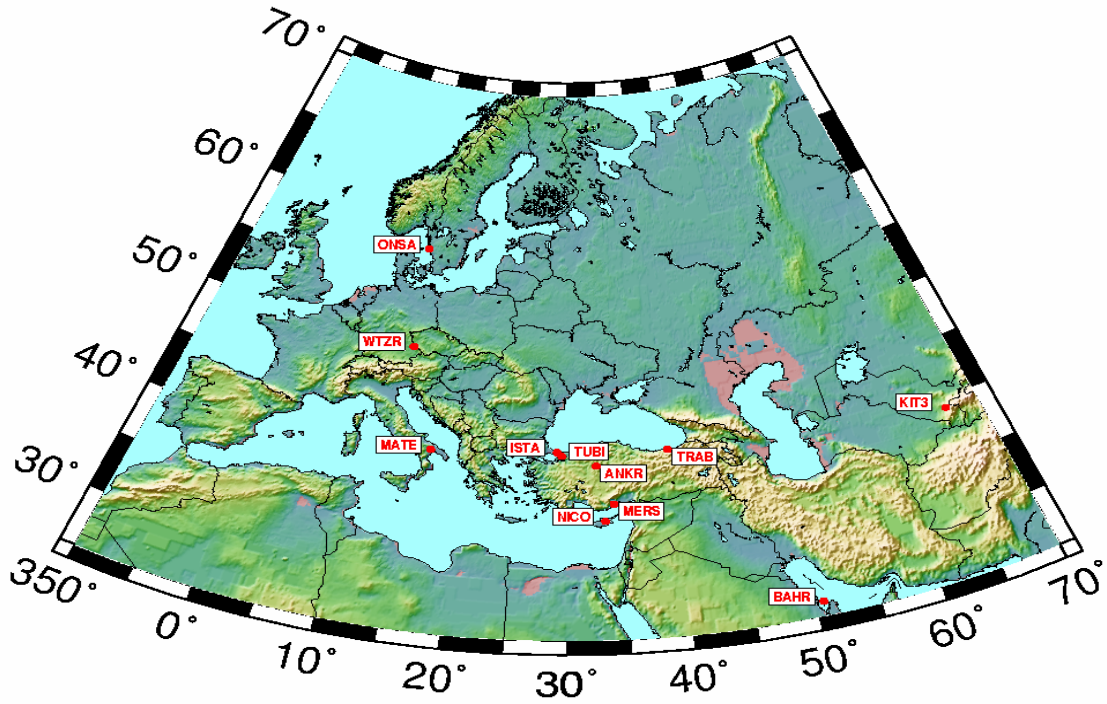
Tablo-2: Hesaplamalarda kullanılan parametreler ve sabit noktalar

Yazılım	GAMIT
Yörünge Bilgisi	IGS Tahmin (predicted)
Sabit Alınan IGS Noktaları	ANKR, ISTA, MATE, WTZR, BAHR, KIT3, ONSA, TUBI, TRAB, MERS, NICO.
Koordinat Sistemi	ITRF2000 (1997.0)
Troposferik Gecikme Modeli	Saastamoinen (1973)
Veri Uzunluğu	24 saatlik GPS verileri
Troposferik İndirgeme Fonksiyonu (mapping function)	Niell
Sinyal Yükseklik Açısı	10 derece

GPS hesaplamalarında koordinatları sabit alınan (5 mm.lik sıkı koşul konan) Türkiye ve diğer ülkelerde bulunan Jeodinamik amaçlı Uluslararası GPS Servisi (IGS; International GPS Service for geodynamics) noktalarının ANKR IGS noktasına olan yaklaşık uzaklıkları Tablo-3'de, bu noktaların konumları ise Şekil-1'de verilmiştir. Tablo-3'den de görüleceği gibi, hesaplamalarda 1000 km'nin üzerinde (örn. ONSA-ANKR, KIT3-ANKR, BAHR-ANKR) uzaklığı olan istasyonların verileri de kullanılmıştır. Bunun nedeni, söz konusu tablodaki nokta koordinatları GPS hesaplamalarında sabit alındığından, noktalar arasındaki korelasyonu en az seviyede tutabilmektir.

Tablo-3: IGS noktalarının ANKR noktasına olan uzaklıkları

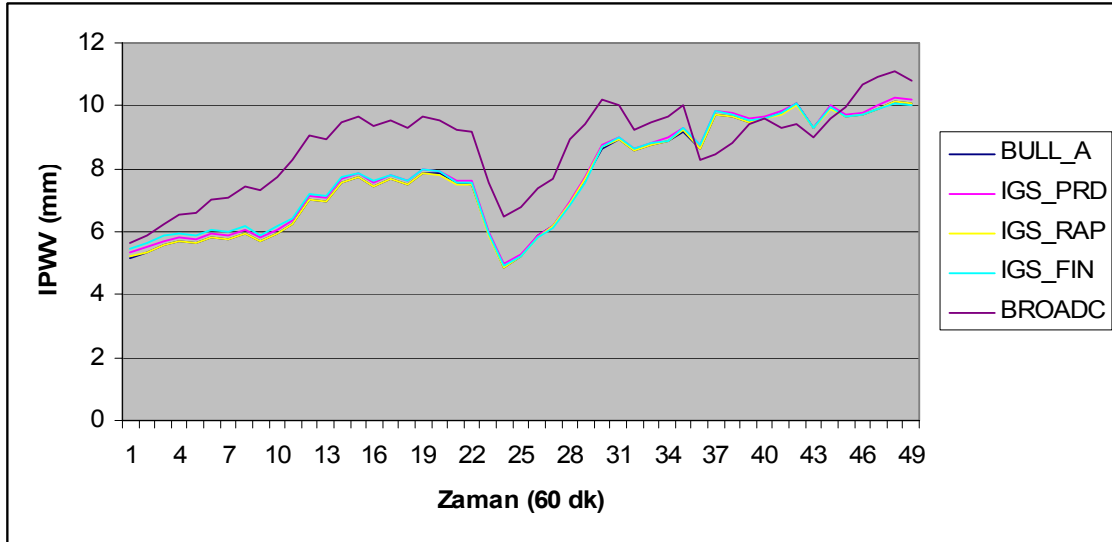
Uzaklık (den - e/a)	Uzaklık (km)
KIT3-ANKR	2918
ONSA-ANKR	2457
BAHR-ANKR	2246
WTZR-ANKR	1876
MATE-ANKR	1366
TRAB-ANKR	607
NICO-ANKR	529
MERS-ANKR	391
TUBI-ANKR	297
ISTA-ANKR	332



Şekil-1: GPS hesaplamalarında kullanılan IGS noktaları

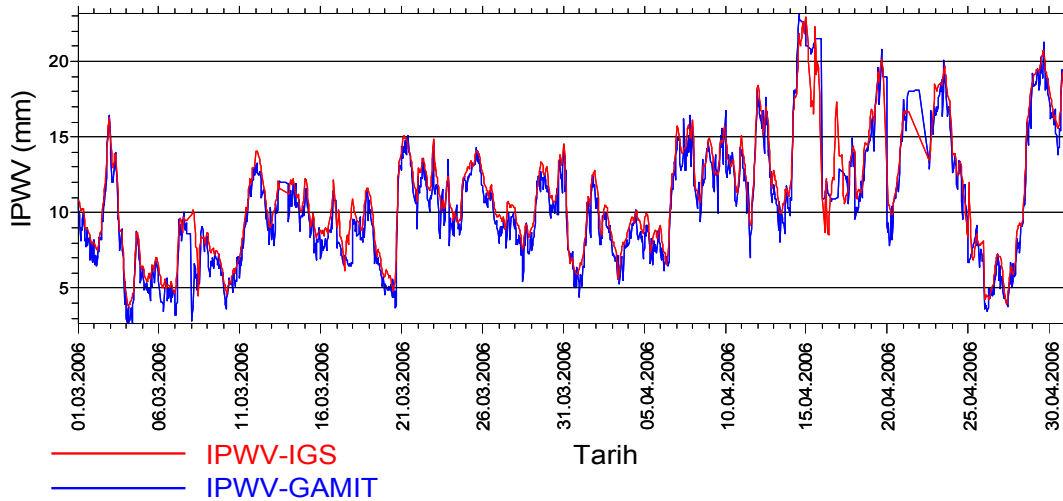
GPS verilerinden IPWV değerlerinin hesaplanmasından önce GPS'in iç doğruluğunu sağlayabilmek için hesaplamalarda kullanılacak uydu yörünge bilgisinin sonuçlara olan etkisini araştırmak amacıyla bir deneme yapılmıştır. Kahveci ve Yıldız (2005)'de ayrıntılı olarak anlatıldığı gibi, GPS hesaplamalarında birçok uydu yörünge bilgisi kullanmak olanaklıdır. Bunlardan hangisinin kullanılacağını; hesaplamaların yapılacağı zaman (gerçek zamanlı ya da daha sonra büroda) ile hesaplamaların sonucunda umulan doğruluğu belirlemektedir. Başka bir ifadeyle, eğer çok yüksek doğruluk (mm mertebesinde) isteniyorsa ölçü tarihinden itibaren yaklaşık 15 gün içerisinde kullanıma sunulan "IGS sonuç (IGS final)" yörünge bilgilerinin kullanılması en doğru tercih olacaktır. Ancak, bu uzun-vadeli çalışma gerektiren iklim modelleri dışında, yaklaşık yarı gerçek zamanlı hesaplamaların yapıldığı meteorolojik çalışmalarda uygun bir seçenek değildir. Diğer taraftan, ölçü anı ile birlikte yayınlanan yörünge bilgileri (broadcast ephemeris; yayın efemerisi) gerçek-zamanlı uygulamalar için uygun olmakla birlikte yüksek doğruluk isteyen çalışmalarda tercih edilmemektedir. Hava tahminine yönelik meteorolojik çalışmalarda hangi yörünge bilgisinin uygun olduğunu belirlemek için yapılan hesaplama sonuçları Şekil-2'de görülmektedir. Bu hesaplamalarda IGS sonuç yörünge bilgileri hatasız kabul edilerek (doğruluğu 5 cm'den küçük), diğer yörünge hesaplama sonuçları bununla

karşılaştırılmıştır. Şekil-2'den de görüleceği gibi, hava tahminine yönelik meteorolojik çalışmalarda en uygun yörünge bilgisi gözlenmiş verilerden yararlanarak tahmin yönteminin kullanıldığı ve doğruluğu yaklaşık 10 cm olan "IGS tahmin (IGS predicted)" yörünge bilgisidir. IGS sonuç yörünge bilgileri ile IGS tahmin yörünge bilgilerinin kullanıldığı IPWV sonuçlarının farklarının standart sapması 0.1 mm olarak hesaplanmıştır. Bu da hava tahminine yönelik çalışmalarda IGS tahmin yörünge bilgisinin yaklaşık gerçek zamanlı (~ 45 dakika) ve yüksek doğruluklu olarak kullanılabilceğini göstermektedir.

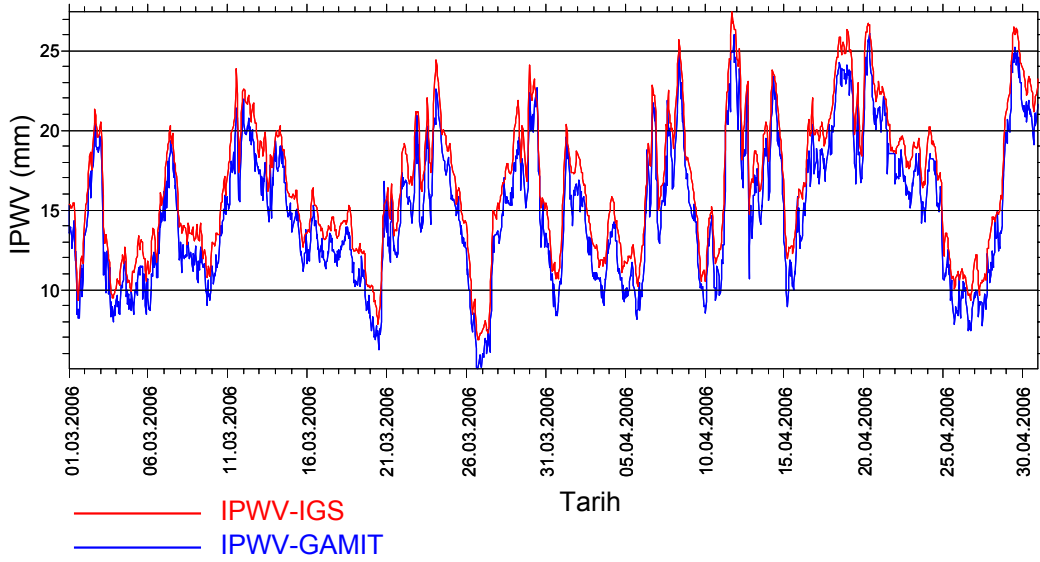


Şekil-2: Farklı yörünge bilgilerinin karşılaştırılması

Ayrıca, GAMIT yazılımı kullanılarak hesaplanan ZWD (ve dolayısıyla IPWV) değerlerinin bağımsız bir kaynak veri ile de doğrulaması yapılmıştır. IGS Analiz Merkezlerinde Tüm dünyadaki IGS noktalarındaki veriler kullanılarak günlük ZWD hesaplamaları yapılmakta ve sonuçlar internet ortamında ücretsiz olarak tüm kullanıcılara sunulmaktadır. Bu amaçla, Mart ve Nisan 2006 tarihleri için Ankara ve İstanbul GPS noktalarına ilişkin IPWV değerleri, aynı noktalarda IGS tarafından hesaplanmış ZWD değerleri kullanılarak elde edilen IPWV değerleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları grafik olarak Ankara noktası için Şekil-3'de ve İstanbul noktası için Şekil-4'te sunulmuştur.



Şekil-3: Ankara Noktası İçin IPWV karşılaştırması



Şekil 4: İstanbul Noktası İçin IPWV karşılaştırması

5.b. GPS IPWV Verileri İle Radyosonde Ölçüm Verilerinin Karşılaştırılması

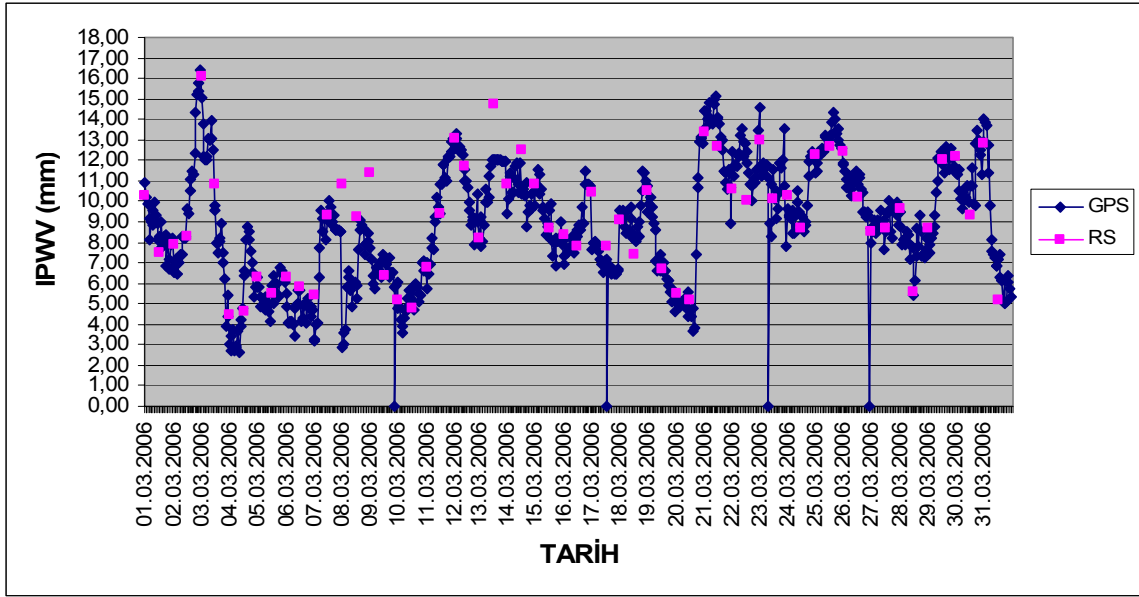
Bu çalışmada, 01 – 31 Mart 2006 ve 01 – 30 Nisan 2006 tarihleri arasında, Ankara (17130) ve İstanbul (17062) radyosonde istasyonlarından 00.00 UTC ve 12.00 UTC’de elde edilen PWV değerleri ile GPS’den elde edilen saatlik IPWV değerlerinin zaman serileri oluşturularak karşılaştırması yapılmış olup, sonuç grafikler Mart ve Nisan 2006 ayları için Şekiller 5-8’de verilmiştir. Diğer taraftan, GPS ve radyosonde istasyonlarının yaklaşık koordinatları Tablo-4’de, aralarındaki uzaklık ve yükseklik farkları ise Tablo-5’de verilmektedir.

Tablo-4: GPS ve radyosonde istasyonlarının yaklaşık koordinatları

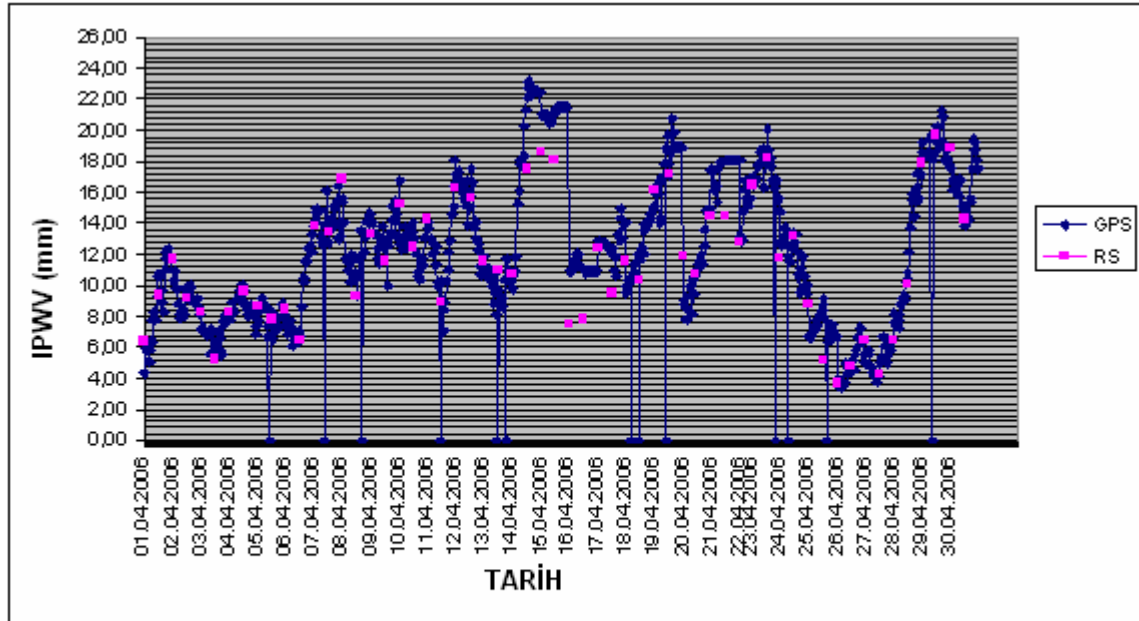
İstasyon Adı	Ait Kurum	Olduğu	Enlem	Boylam	Ortometrik Yükseklik (metre)
ANKR(Ankara)	HGK		39° 53' 15"	32° 45' 31"	939.2
İSTA(İstanbul)	TUBİTAK		41° 06' 16"	29° 01' 09"	110.4
17062 LTBB (İstanbul)	DMİ		40° 58' 42"	29° 03' 21"	39
17130 ANKA (Ankara)	DMİ		39° 57' 00"	32° 53' 00"	891

Tablo-5:GPS ve Radyosonde İstasyonları uzaklık ve yükseklik farkları

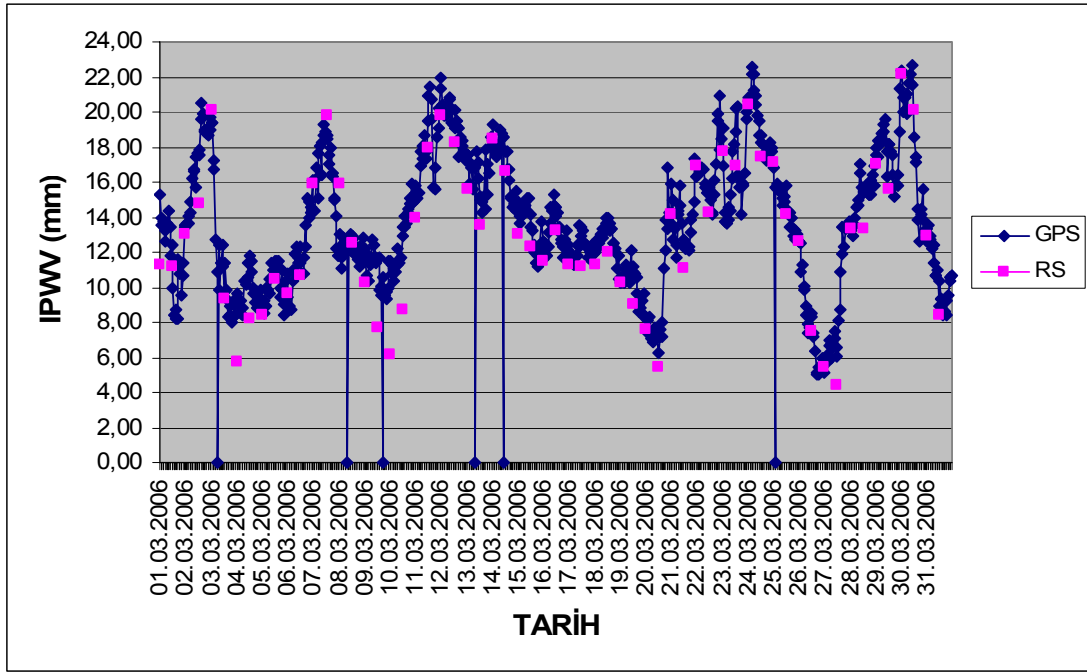
-den	-e/a	ΔH (m)	ΔS (km)
ANKR (HGK)	17130 ANKA (DMİ)	48.2	12.724
İSTA (TUBİTAK)	17062 LTBB (DMİ)	71.4	14.340



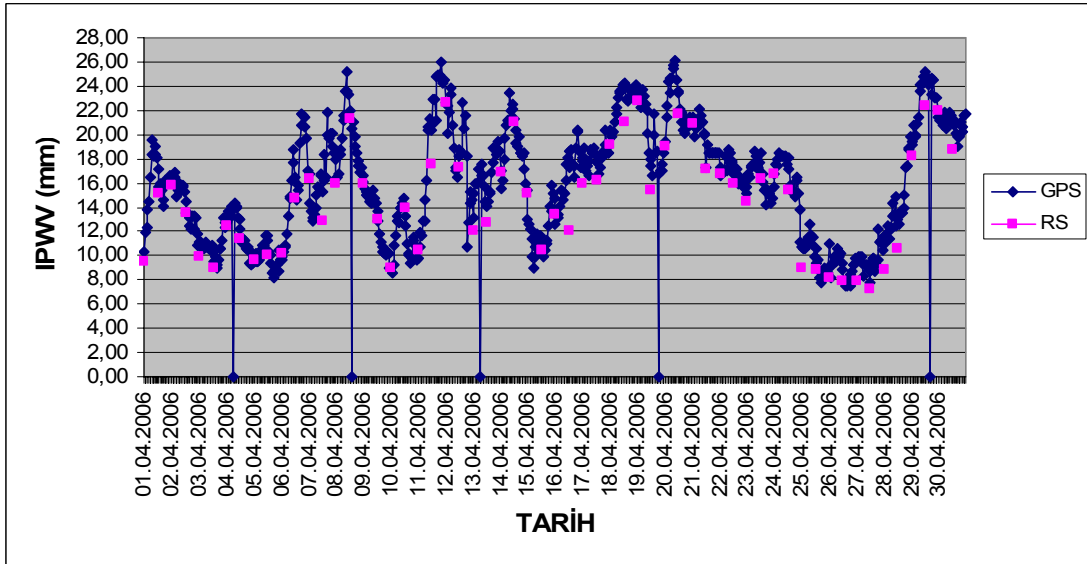
Şekil-5: Ankara Mart 2006 ayı için karşılaştırma



Şekil-6: Ankara Nisan 2006 ayı için karşılaştırma



Şekil-7: İstanbul Mart 2006 ayı için karşılaştırma



Şekil-8: İstanbul Nisan 2006 ayı için karşılaştırma

Grafikler incelendiğinde, GPS IPWV değerleri ile radyosonde verilerinin uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Bu şekillerde dikkat çeken nokta, bazı günlerde GPS-IPWV ile radyosonde değerleri arasında büyük farklar görülmesidir. Örneğin; Şekil-5'de, 8, 9 ve 13 Mart günleri, Şekil-6'da 15 ve 16 Nisan günleri, Şekil-7'de 04, 09 ve 10 Mart günleri için bu farklar yaklaşık 3-7 mm arasında değişmektedir. IPWV hesabında 1 mm'nin üzerindeki farklılıklar önemli olduğu için, bunun nedeni araştırılmıştır. İlk olarak bu günler için IGS tahmin yörünge bilgileri yerine IGS sonuç yörünge bilgileri kullanılarak hesaplamalar tekrar edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil-2'deki bulguları doğrulamıştır. Başka bir ifadeyle, söz konusu farklılıkların yörünge bilgisinden kaynaklanmadığı bir kez daha görülmüştür. Yapılan daha ayrıntılı incelemeler sonucunda, yukarıda verilen günlerde GPS istasyonlarında meteorolojik parametrelerin (ısı ve basınç) mevcut olmadığı belirlenmiştir. Meteorolojik parametrelerin olmadığı durumlarda, GPS yazılımlarında standart atmosfer modeli kullanılarak teorik ZWD (dolayısıyla IPWV) değerleri hesaplanmaktadır. Standart atmosfer modeli olarak genellikle Saastamoinen (1973) yada

Hopfield (1977) modelleri kullanılmaktadır. Bu hesaplamalardan çıkan önemli bir sonuç, GPS istasyonlarında hiçbir meteorolojik parametre ölçülmesi bile standart atmosfer modeli kullanılarak elde edilecek sonuçların doğruluğunun oldukça yüksek çıkmasıdır. Bu sonuç ise, özellikle konum belirleme amaçlı olarak GPS kullanan jeodezi ve jeofizikçiler için oldukça önemli bir doğrulamadır. Ancak, meteorolojide bu farklar önemli olduğundan, söz konusu grafiklerde bu şekildeki farklar bulunan günlere ait IPWV değerleri dikkate alınmamalıdır.

GPS_IPWV ile radyosonde değerleri arasındaki farklara (Şekil 5–8) ilişkin istatistik bilgiler hesaplanmış olup, Tablo-6'da verilmiştir.

Tablo-6: GPS-Radyosonde Karşılaştırma İstatistikleri

	MAKSİMUM (mm)	MİNİMUM (mm)	ORTALAMA (mm)	STANDART SAPMA (mm)
ANKR MART	2.03	-2.74	-0.08	1.09
ANKR NİSAN	1.89	-1.95	0.06	0.99
İSTA MART	3.30	-1.54	1.14	0.90
İSTA NİSAN	3.17	-2.16	0.93	1.06

Yukarıda verilen grafikler ve Tablo-6 birlikte incelendiğinde ortalama farkların yaklaşık 1 mm, en büyük farkın 3.30 mm, en küçük farkın -1.54 mm, standart sapmalarının ise yaklaşık 1 mm mertebesinde olduğu görülmektedir. Bu değerler literatürde farklı araştırmacılar tarafından yapılmış olan çalışmalarla uyum göstermektedir. Bu sonuçlardan da görüleceği gibi GPS gözlemlerinden yararlanarak elde edilen IPWV değerlerinin doğruluğu oldukça yüksek olup, bunlardan sayısal hava tahmin modellerine girdi olarak yararlanılabileceği düşünülmektedir. Diğer taraftan, maksimum ve minimum farklara bakıldığında, bunların kabul edilebilir sınır değerleri zorladığı da görülmektedir. Bu farkların nedeninin, özellikle Ankara ve İstanbul'da bulunan GPS istasyonlarında kullanılan sıcaklık ve basınç ölçen aletlerin kalibrasyonlarının uzun süredir yapılmamış olmasından ve kısmen de bu aletlerin meteorolojik amaçlı çalışmalarda kullanılabilecek kadar duyarlı ölçüm yapamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

5.c. GPS IPWV Verileri İle MM5 Model Ürününün Karşılaştırılması

GPS verilerinden yararlanarak elde edilen GPS_IPWV değerleri, DMI tarafından kullanılan sayısal hava tahmin modelinden (MM5-V3) elde edilen IPWV değerleriyle de karşılaştırılmıştır.

MM5-V3 (Mesoscale Model) modeli; Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan Pensilvanya Üniversitesi ve NCAR (National Center for Atmospheric Research) tarafından birlikte geliştirilmiş bir sınırlı alan modelidir. En önemli özelliği hidrostatik olmayışı ve sigma koordinatlarında ürün üretmesidir. MM5 model sisteminin kodları Fortran ağırlıklı yazılmış olup, bunlara internet ortamında ücretsiz olarak erişilebilmektedir. DMI'de MM5 modeli; 00, 06, 12, 18 UTC saatleri için günde 4 kez operasyonel olarak çalıştırılmaktadır. Her bir çalıştırma 48 saatlik tahmin üretmektedir. Bu modelin operasyonel ürünleri;

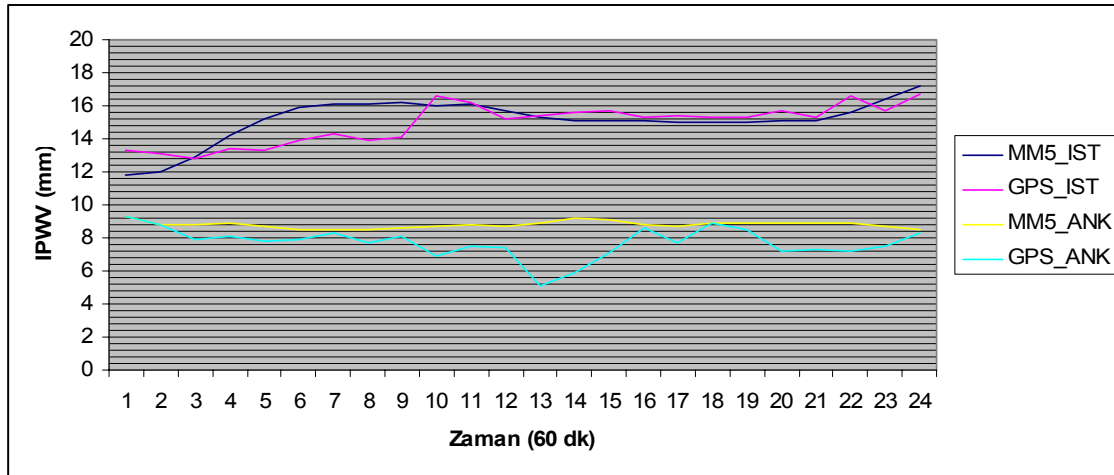
- Bütün basınç seviyelerinde: sıcaklık, rüzgar, jeopotansiyel yükseklik, nem, düşey hız, akış çizgileri, kalınlık v.b.
- Yer seviyesi: MSLP, 2 m sıcaklığı, 10 m rüzgarı, toplam yağış, kar karışma oranı, yağışa geçebilir su miktarı v.b.
- İstasyon bazlı ürünler: Meteogramlar, Temp diyagramlarıdır.

GPS zenit troposferik gecikme değerleri GAMIT yazılımı kullanılarak ve 24 saatlik verilerden yararlanarak her saat için bir tane hesaplanmıştır. GPS verilerinden yararlanarak istenilen sıklıkta (örneğin 15 sn, 15 dk, 30 dk. vb.) IPWV değeri hesaplamak olanaklıdır. Oysa, MM5 modelinden saatte bir IPWV değerleri elde edilebilmektedir. Dolayısıyla, 60 dakikalık meteorolojik veri aralığı ile uyum sağlamak için GPS_IPWV değerleri de her saat için hesaplanmıştır.

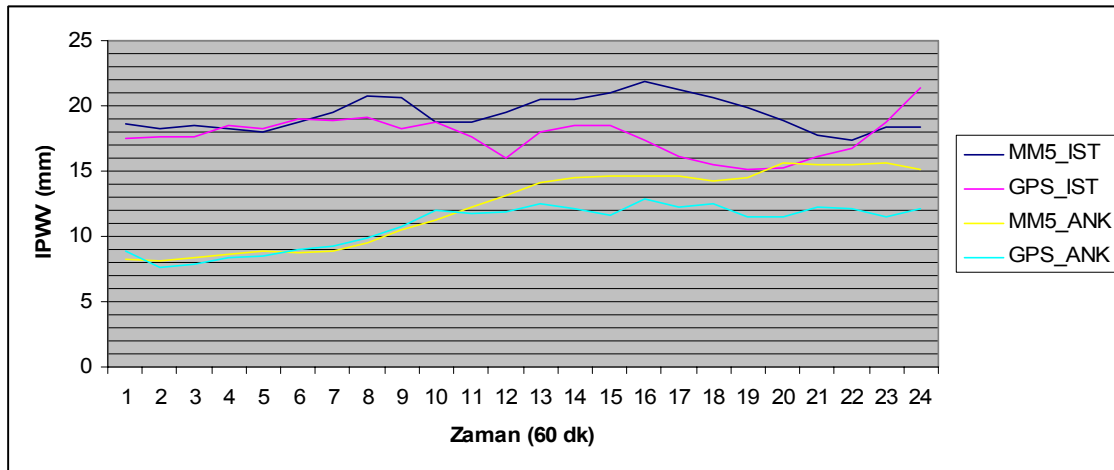
Yukarıda kısaca sözü edilen denemeler yapılarak GPS hesaplamalarında kullanılacak standartlara karar verildikten sonra, elde edilen GPS_IPWV sonuçları ile MM5 modelinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar; yağışlı ve yağışsız bazı günler seçilerek gerçekleştirilmiştir (Tablo 7). Bu tabloya göre yapılan karşılaştırmalar ise (Şekil 9- Şekil 16) sunulmuştur.

Tablo-7: IPWV hesabı yapılan günler

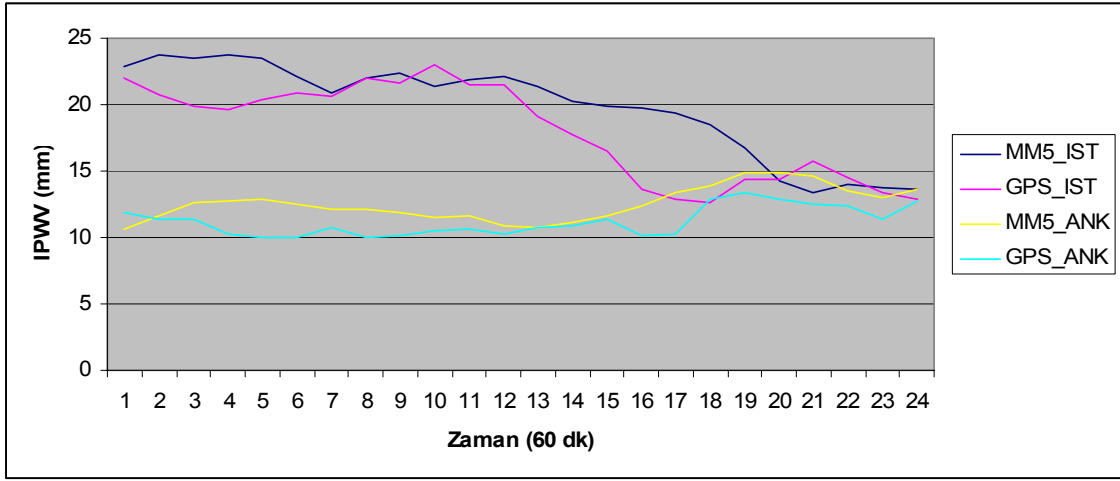
Tarih	GPS İstasyonu	Radyosonde İstasyonu
16-17-18 Mart 2006	ANKR, ISTA	17062 İstanbul
28-29-30 Mart 2006	ANKR, ISTA	17130 Ankara
23-24 Mart 2006	ANKR, ISTA	17062 İstanbul



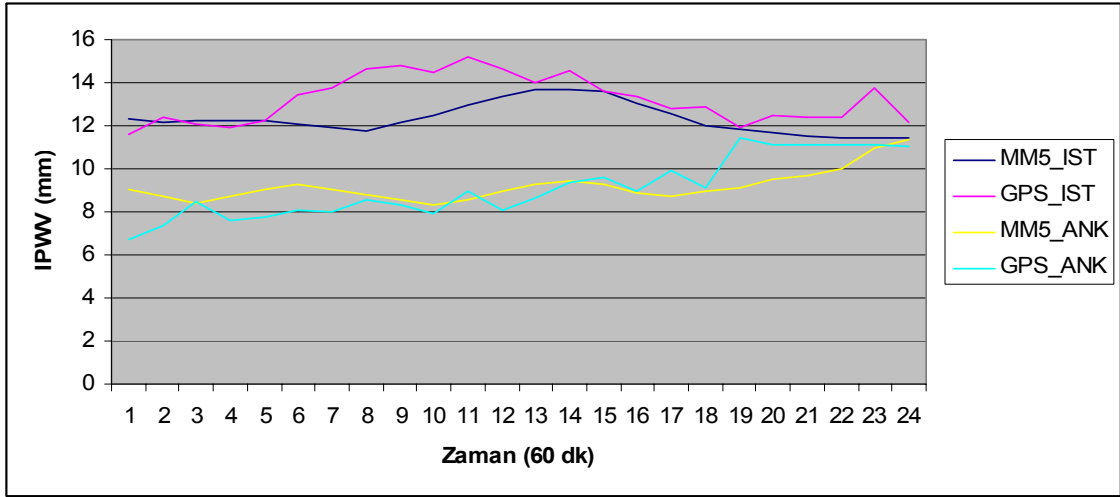
Şekil-9: 28 Mart 2006, ANKR ve ISTA yağışsız.



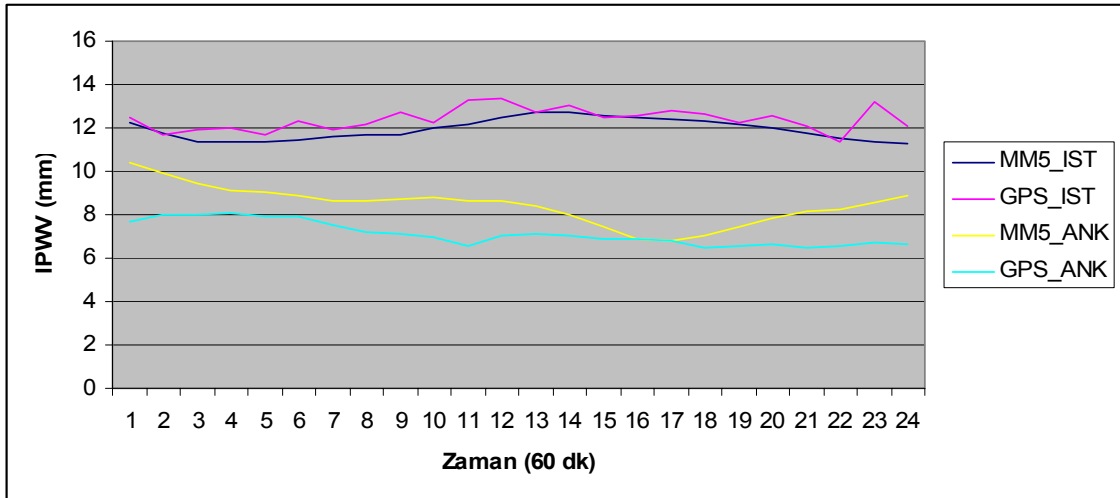
Şekil-10: 29 Mart 2006, ANKR ve ISTA yağışsız.



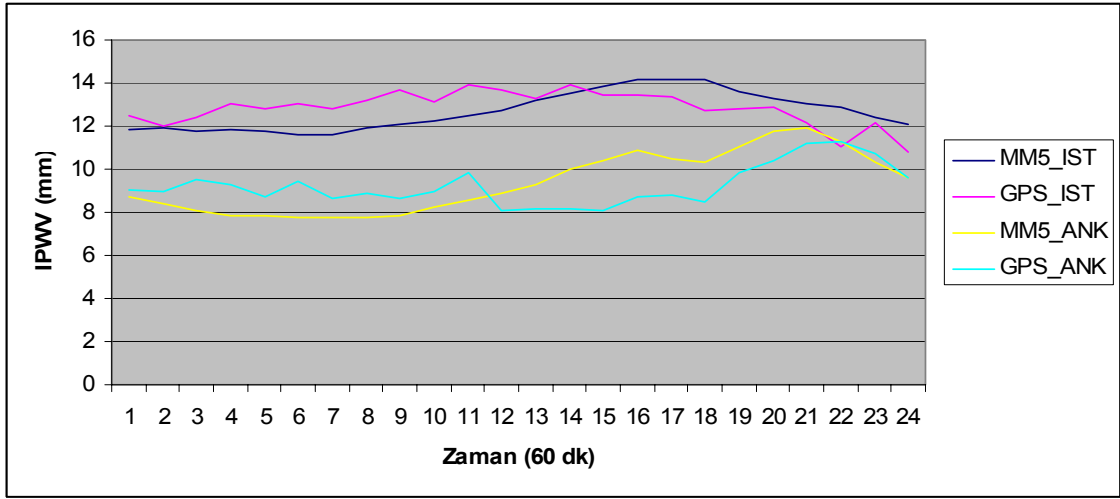
Şekil-11: 30 Mart 2006, ANKR ve ISTA yağışsız.



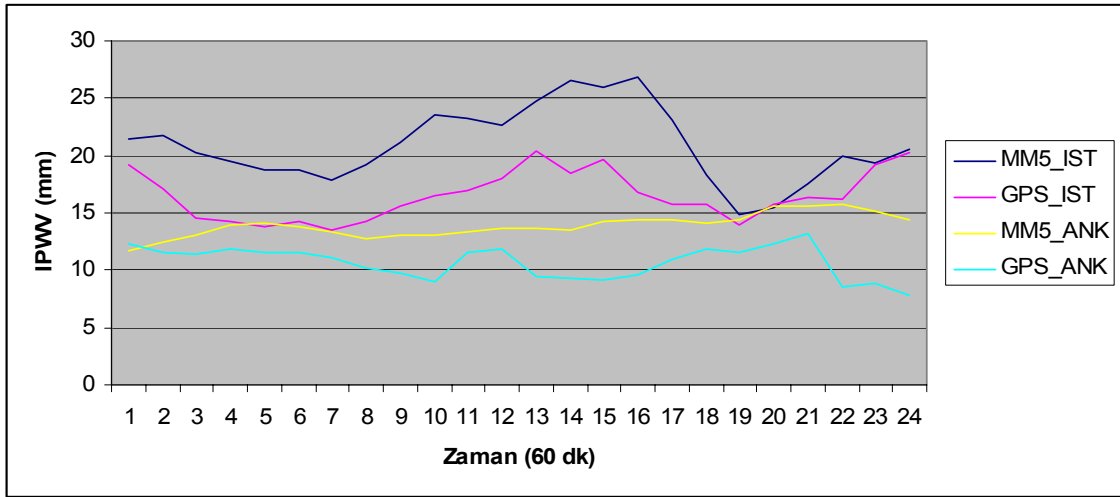
Şekil-12: 16 Mart 2006, ANKR yağışlı, ISTA yağışsız.



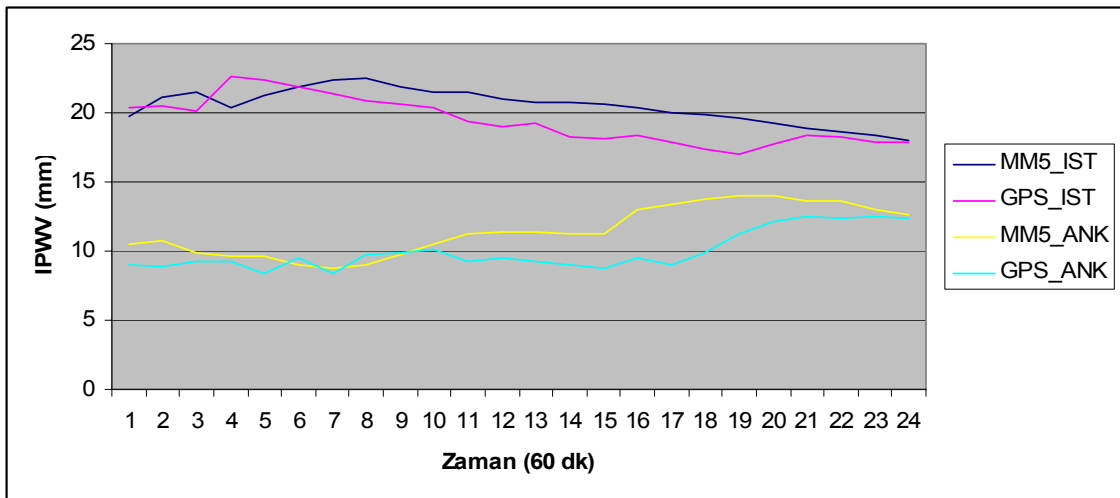
Şekil-13: 17 Mart 2006, ANKR yağışlı, ISTA yağışsız.



Şekil-14: 18 Mart 2006, ANKR yağışlı, ISTA yağışsız.



Şekil-15: 23 Mart 2006, ANKR yağışsız, ISTA yağışlı



Şekil-16: 24 Mart 2006, ANKR yağışsız, ISTA yağışlı

GPS'ten elde edilen ve zamansal çözünürlüğü son derece yüksek olan IPWV bilgisi, havadaki su buharı miktarını anlık olarak takip etmek ve bu bilgiyi hem gözlem değeri olarak hem de hava tahmininin iyileştirilmesi (ve asimilasyon) çalışmalarında kullanmak açısından son derece işlevseldir. Örneğin 16 Mart 2006 tarihinde Ankara'daki havanın anlık değişimi bunu göstermektedir. Klima istasyonu verilerine göre, Ankara'da 18.35 UTC'de (yerel saatle 20.35) hafif yağmur sağanağı başlamış; bu yağış 20.30 UTC'de (yerel saatle 22.30) karla karışık yağmura dönüşmüş; 23.30 UTC'de (yerel saatle 01.30) yeniden yağmura dönüşüp, 01.10 UTC'de (yerel saatle 03.10) yağış kesilmiştir. Bu durumu Şekil 12'de açıkça görmek mümkündür. GPS IPWV değerinin 18.35 UTC'de ani bir hamle yaptığı ve 1 saat içerisinde yaklaşık 2 mm. arttığı ve yağışın devam ettiği süre içerisinde PW değerinin düz bir çizgi izlediği görülmektedir. Fakat MM5 modelinin IPWV tahmin değerinin bu anlık değişimin zamanını yakalayamadığı, ancak genel bir IPWV artışını doğru tahmin ettiği görülmektedir.

Benzer bir sonucu, İstanbul örneğinde de görmek olanaklıdır. İstanbul ilinin farklı bölgelerinde 24 Mart tarihinde yağış görülmüştür. Kireçburnu, Florya ve Bahçeköy'de 23 Mart gecesinden itibaren yağış devam etmektedir. Kumköy'de yerel saatle 06.19'da, Göztepe'de ise yerel saatle 03.09'da yağış başlamıştır. Bu durum, İstanbul'un farklı bölgelerinin, bir gün öncesinden yağışlı bir havanın etkisine girdiğini, fakat yağışın başlama saatlerinin, farklı yerlere göre değiştiğini göstermektedir. İstanbul- Göztepe (17062) klima istasyonu verilerine göre, 24 Mart 2006'da, bu istasyonda kuvvetli yağmur sağanağı, 03.09 UTC'de (yerel saatle 05.09) başlamış ve 06.04 UTC'de (yerel saatle 08.04) hafif sağanak yağmura dönüşmüş ve bu yağış da 08.04 UTC'de (yerel saatle 10.04) kesilmiştir. GPS istasyonu'nun bulunduğu Maslak İTÜ Kampusü ise bu iki istasyon arasında kalmaktadır. GPS istasyonunun yer aldığı bölgede klima rasadı yapan istasyon olmadığı için, yağışın bu yerel bölgedeki başlama zamanını belirleme olanağı yoktur. Ancak GPS IPWV değeri, bu konuda bir fikir verebilmektedir. Buna göre, GPS istasyonunun bulunduğu bölgede IPWV eğrisinin 03.09 UTC'de ani bir değişim yaptığı görülmektedir (Şekil-16). IPWV değerinin bir saat içerisinde 3 mm. artış gösterdiği ve yağış şiddetinin tedricen azalmasıyla birlikte de, IPWV değerinin de azalma gösterip, yağış başlamadan önceki değerlere indiği görülmektedir. MM5 modelinin IPWV tahmin değerinin ise, trend olarak IPWV değeri artışını yakaladığı, ancak modelin bu artışın zamanını yaklaşık 1 saat geç tahmin ettiği görülmektedir.

Bu iki örnek üzerinde yapılan çalışmadan şu sonuca ulaşılabılır: zamansal çözünürlüğü radyosonde cihazına göre çok iyi olan GPS'den elde edilen IPWV değeri sayesinde, havadaki su buharı miktarına (ve doğal olarak ilgili meteorolojik hadiselerle) ilişkin anlık bilgi elde etmek mümkündür. Buna ek olarak, (alansal çözünürlüğü de artırılmış) GPS IPWV değerinin "Nudging", "3D-VAR" veya 4D-VAR" gibi yöntemlerle modele asimile edilmesi durumunda, MM5 model ürünlerinin tahmin kalitesinin artacağı söylenebilir.

GPS_IPWV ile MM5_IPWV değerleri arasındaki farklara (Şekil 9-16) ilişkin istatistik bilgiler de hesaplanmış olup, Tablo-8'de bu hesaplamalar arasından yalnızca dikkat çekici olan iki güne ait değerler verilmiştir.

Tablo-8: ANKR-MM5 istatistik bilgileri (16 ve 28 Mart 2006 tarihleri için)

	MAKSİMUM (mm)	MİNİMUM (mm)	ORTALAMA (mm)	STANDART SAPMA (mm)
16 Mart 2006 ANKR-MM5	2.27	-2.28	-0.10	1.07
28 Mart 2006 ANKR-MM5	-0.02	-3.77	-1.09	0.96

Diğer taraftan, söz konusu şekiller incelendiğinde bazı yerlerde GPS_IPWV ile MM5_IPWV değerlerinin oldukça iyi uyum gösterdiği (~1 mm), bazı yerlerde ise bu uyumun 2-3 mm mertebesinde farklılaştığı görülmektedir. Bunun nedeni, MM5_IPWV değerlerinin 'tahmin' değerleri olmasıdır. Yani tahmin değerleri ile gözlem değerleri arasındaki farkın, özellikle de zamansal uzanım arttıkça artması normaldir.

Ayrıca Tablo-5'den de görüleceği gibi ANKR GPS istasyonu ile ANKA (DMI) radyosonde istasyonu arasında bulunan yaklaşık 13 km'lik uzaklık ile 50 metrelik yükseklik farkı da bu değerler arasındaki farkın bir nedeni olarak görülebilir. Aynı şekilde, İSTA GPS istasyonu ile LTBB (Göztepe) radyosonde istasyonu arasında da yaklaşık 14 km uzaklık ve 71 metrelik bir yükseklik farkı vardır. Bu yüzden, yukarıdaki grafiklerde görülen GPS_IPWV ile MM5_IPWV farklarının bir bölümünün bu uzaklık ve yükseklik farklarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Dolayısıyla, uzaklık, yükseklik farkı, basınç ve sıcaklık değişimine bağlı olarak IPWV hesaplamalarının ayrıntılı bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bu hesaplamaların en güvenilir şekilde yapılabilmesi için, bir bölümünün meteoroloji istasyonlarının yanında kurulması umulan sürekli gözlem yapan uydularla konum belirleme (GNSS) ağlarından yararlanılması esastır. Harita Genel Komutanlığı ile Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü'nün müşterek müşteri olduğu ve TÜBİTAK tarafından desteklenen "Geliştirilmiş Gerçek Zamanlı Kinematik Prensipli Sabit GPS İstasyonları Kurulması ve Hücresel Dönüşüm Parametrelerinin Belirlenmesi (TUSAGA-Aktif/CORS-TR)" konulu kamu ARGE projesi kapsamında bir sabit GNSS (Global Navigation Satellite System) ağının, İstanbul Kültür Üniversitesi'nin yürütücülüğünde Türkiye'de kurulması çalışmaları devam etmektedir. Bu ağ, proje için ayrılan malî desteğe bağlı olarak, Türkiye'ye dağılmış yaklaşık 100–150 istasyondan meydana gelecek olup, meteorolojik amaçlı çalışmalarda da yararlanılabilmesi için söz konusu istasyonlardan bir kısmının Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün sorumluluğundaki uygun olan meteoroloji istasyonlarının yakınlarında kurulması da planlanmıştır.

Diğer taraftan, yukarıda da belirtildiği gibi, gözlenmiş olan zenit değerlerinden en iyi olasılıklı IPWV değerlerini elde edebilmek için (10) eşitliği ile verilen κ sabitinin belirli bir bölge ve zaman dilimi için geçerli olan T_m değerini kullanarak hesaplanması gerekmektedir. Bu ise çok sayıda radyosonde profilinin istatistik analizi ile olanaklıdır. Bu hesaplamalarının yapıldığı GPS yazılımlarında kullanılan T_m değeri katsayıları belirli bir bölge ya da ülke için geçerli olan meteorolojik şartlara göre belirlenmektedir. Örneğin, GAMIT yazılımında bu değer A.B.D. için 27° ve 65° enlemleri ile 0 ile 1.6 km yükseklikleri arasında geçerli olan bir doğrusal regresyon modeli olarak

$$T_m \approx 70.2 + 0.72.T_s \quad (14)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Buradaki T_s , yüzeyde ölçülen sıcaklığı ifade etmektedir.

Sonuç olarak, Türkiye coğrafi bölgesine uygun bir T_m değerinin hesaplanması daha doğru IPWV değerlerinin hesabını sağlayabilir. GPS hesaplamalarında Türkiye için geçerli bir T_m değerinin kullanılmamış olması, yukarıdaki uygulama sonucu elde edilmiş olan GPS_IPWV değerleri ile radyosonde ve MM5_IPWV değerleri arasındaki farkların bir bölümünün nedeni olarak açıklanabilir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Su buharının atmosferdeki dağılımının doğru olarak bilinmesi, hava tahmini ve iklim çalışmalarında önemli bir konudur. Ancak, gerçek nem alanı konusundaki bilgiler, gözlem sayısının yetersiz oluşu ve veri birleştirmesi (asimilasyonu) sistemlerinde nem bilgisinin etkin olarak kullanılamaması nedenleriyle, eksik kalmaktadır. GPS sinyalleri su buharına oldukça duyarlıdır. GPS, su buharının düşey dağılımı ile ilgili bilgi sağlamamakla birlikte, radyosonde gözlemleri ile karşılaştırıldığında daha ekonomik, doğru, güvenilir ve her türlü hava koşulunda çalıştırılabilir bir sistemdir. Özellikle, çok sayıda istasyondan oluşan sabit GPS ağlarından gerçek-zamanlı olarak elde edilen gözlemler birçok bilimsel çalışma için değerli bilgiler içermektedir.

Bu çalışmada, GPS'den elde edilen IPWV verilerinin doğrulaması yapılmış ve bu verilerin radyosonde gözlem değerleriyle uyumlu olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca GPS IPWV

değerinin anlık olarak elde edilmesinin, operasyonel meteorolojide ve araştırma çalışmalarında işlevsel olduğu da örnekler üzerinde gösterilmiştir. Diğer taraftan, literatürdeki çalışmalardan da görülebileceği gibi, GPS IPWV verisinin modele girdi olması (asimilasyon) durumunda, model tahminlerinin tutarlılık oranlarının artacağı da düşünülmektedir.

Yukarıda ifade edilenlere ek olarak, Jeodezik yöntemler kullanarak elde edilen su buharı bilgisinin meteorolojik amaçlı kullanımı jeodezi ve jeofizik bilimlerine de katkıda bulunacaktır. Çünkü, depremlerin önceden belirlenmesi ve yüksek doğruluklu GPS ağı kurulmasını amaçlayan jeodezik ve jeofizik çalışmalarda elde edilen en düşük doğruluklu koordinat bileşeni yükseklik bilgisidir ($\approx 3-5$ cm). GPS yükseklik bilgisinin yatay koordinatlara göre daha düşük doğrulukla belirlenmesinin nedenlerinden birisi de hesaplamalarda kullanılan troposferik modellerdeki hatalardır. Oysa NWP'den elde edilecek atmosferik parametreler (sıcaklık, nem ve basınç) yardımıyla yüksek doğruluklu ($\approx 1-2$ cm) koordinat (yükseklik) bilgisi elde edilebilecek, böylece gerçek zamanlı navigasyon uygulamalarının yanında jeodezik ve jeofizik çalışmalarda da önemli katkı sağlanmış olacaktır.

Bu konuyla ilgili çalışmalar Japonya, Avrupa, Avustralya ve ABD meteoroloji kuruluşları tarafından proje kapsamında oluşturulan araştırma çalışmaları ile son 10 yıldır yoğun bir şekilde sürdürülmektedir. Günümüzde yalnızca A.B.D. kontrolündeki GPS uyduları ile yapılabilen bu çalışmaların, 2012 yılına kadar faaliyete geçecek olan Avrupa uydu sistemi GALILEO ve modernizasyon çalışmaları devam eden Rus uydu sistemi GLONASS ile çok daha ileri bir boyut kazanacağı düşünülmektedir. Başka bir deyişle, gelecekte meteorolojik amaçlı olarak uzaya yerleştirilecek uydulardan yayınlanacak meteorolojik verileri GPS/GALILEO/GLONASS verileri ile eş-zamanlı kaydeden alıcılar (GNSS alıcıları) sayesinde bu çalışmaların daha da ileri seviyelere ulaşacağı düşünülmektedir. Bu nedenle, Türkiye'de meteoroloji ile uğraşan kurum/kuruluş ve üniversitelerin ilgili bölümlerinin bu konuların dışında kalmaması için;

- a. GPS verilerinin hava tahmini ve iklim çalışmalarında kullanılması ile ilgili çalışmalar yapılarak Türkiye şartlarına uygun modellerin geliştirilmesinin,
- b. GPS verilerinin Sayısal Hava Tahmin Modellerinde kullanılması olanaklarının (yaklaşık gerçek zamanlı ve sürekli IPWV ya da IWV haritalarının hazırlanmasının) daha ayrıntılı olarak araştırılmasının,
- c. Modelleme çalışmalarında, GPS verilerinin zamana bağlı çözünürlüğü de dikkate alınarak 4-boyutlu veri asimilasyonu ve GPS tomografisi çalışmalarının yapılmasının,
- ç. GPS verilerinin diğer meteorolojik çalışmalarda da kullanılabilirliğinin araştırılmasının (örn. iyonosferik modellendirme ve iklim modellemelerinde) yararlı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. **Anthes, R.A. (1983):** Regional Models of the Atmosphere in Middle Latitudes, *Monthly Weather Review.*, 111, 1306-1335.
2. **Bai,Z., Y.Feng (2003):** GPS water vapor estimation using Interpolated surface meteorological data from Australian Automatic Weather Stations. *Journal of GPS*, Vol.2, no 2:83-89.
3. **Bevis,M., S.Businger, T.A.Herring, C.Rocken, R.A.Anthes, R.H.Ware (1992):** GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System. *Journal of Geoph.Res.* Vol.97, No. D14, pp. 15787-15801.
4. **Bock,O., C.Flamant and T.Duquesnoy (2001):** Integrated water vapor estimated by GPS compared to independent observations during MAP. 8th international symposium on Remote Sensing, Toulouse, 17-20 Sept.2001.
5. **Bosart, L.F. (1990):** Degradation of the North American radiosonde network, *Weather and Forecasting.* 5, 527-528.
6. **Davis,J.L., Herring,T.A.,Shapiro, I.I., Rogers,A.E.,and Elgered G., (1985):** Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modelling errors on estimates of baseline length, *Radio Science*, 20, 1593-1607.

7. **Elliot,W.P.,and D.J.Gaffen (1991):** On the utility of radiosonde humidity archives for climate studies, *Bull.Amer.Met.Soc.*,72,1507-1520.
8. **Feng, Y., Z.Bai, P.Fang, A.Williams (2001):** GPS Water Vapor Experimental Results from Observations of the Australian Regional GPS Network (ARGN). *42nd Australian Surveyors Congress*, 18 pp.
9. **Ferretti, R., Faccani, C., Francia, M., Cucurull, L. (2005).** Operational Assimilation of a network of Ground-based GPS-PW and ZTD into the Weather Forecast. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 7, 06552, 2005.
10. **Haase,J., E.Calais, J.Tal7aya, A.Rius, F.Vespe, R.Santangelo, Z.-Y.Huang, J.M.Davila, M.Ge, L.Cucumll, A.Flores, C.Sciatetta, R.Pacione, M.Boccolari, S.Pugnaghi, H.Vedel, K.Mogensen, X.Yang, J.Garate (2001):** The Contributions of the MAGIC Project to the COST-716 Objectives of Assessing the Operational Potential of Ground-based GPS Meteorology on an International Scale. *Phys.Chem.Earth (A)*, Vol.26, No1.6-8, pp.433-438.
11. **Hopfield, H.S. (1977):** Tropospheric Correction of Electromagnetic Ranging Signals to a Satellite: A Study of Parameters. Paper presented at Symposium on Electromagnetic Distance Measurements and the Influence of Atmospheric Refraction, 23-28 May.
12. **House,D.C. (1960):** Remarks On the Optimum Spacings of Upper-Air Observations. *Monthly Weather Review*, pp.97-100.
13. **Kahveci,M., F.Yıldız (2005):** *Global Konum Belirleme Sistemleri (GPS): Teori-Uygulama*, Nobel Yayınevi, Geliştirilmiş 2.baskı, Ankara.
14. **Liou Y., C.Huang and Y.Teng (2000):** Precipitable Water Observed by Ground-based GPS Receivers and Microwave Radiometry. *Earth Planet Space*,52,445-450.
15. **Liu, Y., Y.Chen, H.Baki İz (2000):** Precision of Precipitable Water Vapor from Radiosonde Data for GPS Solutions. *Geomatica*, vol.54, no.2, pp.171-175.
16. **MIT and SIO (2000):** Documentation for the GAMIT GPS Analysis Software. *Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences*.
17. **Saastamoinen,J. (1973):** Contributions to the Theory of Atmospheric Refraction. Part II, Refraction Corrections in Satellite Geodesy. *Bull.Geod.No.107*, pp.13-34.
18. **Spilker, J.J. (1980):** GPS Signal Structure and Performance Characteristics. In Janiczek (Ed.), *Global Positioning System*. Vol.1, pp.29-54.
19. **Tregoning, P., R.Boers, D.O'Brien (1998):** Accuracy of Absolute Precipitable Water Vapour Estimates from GPS Observations. *J.Geophys.Res.*, 103, pp.28701-28710.
20. **Ware, et al., (2000):** SuomiNet: A Real-Time National Network for Atmospheric Research and Education. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81, 4, pp. 677–694.