

**STANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ATMOSFERDEKİ YAĞIŞA DÖNÜŞEBİLİR SU BUHARI MİKTARININ  
KÜRESEL KONUMLANDIRMA SİSTEMİYLE ÖLÇÜMÜNÜN  
DEĞERLENDİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**BÜŞRA KAYMAKLI**

**0909151010**

**Anabilim Dalı: Fizik**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. AYEGÜL YILMAZ**

**OCAK 2012**

## ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanabilmesi için olu turulan bilimsel ortam için KÜ ailesine ve tüm hocalarıma te ekkürlerimi sunarım.

Özellikle de bu alanda tez hazırlamam konusunda beni yönlendiren ve deste ini hiçbir zaman esirgemeyen Doç. Dr. Ay egül YILMAZ Hocam' a te ekkürlerimi sunarım.

Maddi ve manevi destekleri ile her zaman yanımda olan de erli aileme sonsuz te ekkürlerimi sunar, bilhassa beni sabırla dinlemi ve her zaman yüreklendirmi olan babama ALLAH' tan rahmet, mekânının Cennet olmasını diliyorum.

**Ocak, 2012**

**Bü ra Kaymaklı**

## Ç NDEK LER

Sayfa

ÖNSÖZ .....	ii
Ç NDEK LER .....	iii
KISALTMALAR .....	v
EK L L STES .....	vi
SEMBOL L STES .....	vii
ÖZET .....	viii
ABSTRACT.....	x
<b>1. G R</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS)</b> .....	<b>1</b>
1.1.1 Küresel Konumlandırma Sisteminde Sinyal Gecikmeleri .....	2
<b>1.2 GPS Meteorolojisi</b> .....	<b>4</b>
<b>1.3 GPS Meteorolojisinin Potansiyeli</b> .....	<b>5</b>
1.3.1 Mevcut Jeodezik GPS A larının Kullanımıyla (IWV) E le tirmesi. ....	5
<b>2. YA I A DÖNÜ EB L R SU BUHARI (PWV)</b> .....	<b>7</b>
<b>2.1 Atmosferik Su Buharının klım Sistemi çin Önemi</b> .....	<b>8</b>
2.1.1 Su Döngüsü ve Su Buharının Sera Etkisi .....	8
<b>2.2 Ya ı a Dönü ebilir Su Buharı Ölçümünün Önemi</b> .....	<b>10</b>
<b>3. YA I A DÖNÜ EB L R SU BUHARININ ÖLÇÜLMES</b> .....	<b>11</b>
<b>3.1 GPS Algılama Teknikleri</b> .....	<b>12</b>
3.1.1 Ya ı a Dönü ebilir Su Buharını Jeodezik A lar ile E le tirme .....	12
3.1.2 Uzak Merkezli GPS Okültasyonları. ....	12
<b>4. GPS VER LEME LKELER</b> .....	<b>13</b>
<b>4.1 Meteorolojik GPS A ları ile Troposferik Su Buharı Tomografisi</b> .....	<b>13</b>
<b>4.2 Troposferik Gecikmeler ve GPS</b> .....	<b>14</b>
<b>5. RADYO OKÜLTASYON YÖNTEM LE GPS/MET VER LER N N ELDE</b> <b>ED LMES</b> .....	<b>15</b>
<b>5.1 Nötr Atmosferdeki GPS/MET Verilerinin Analizi ve Geçerlili i</b> .....	<b>17</b>
<b>5.2 GPS/MET’ in Dü ey ve Yatay Çözünürlü ü</b> .....	<b>19</b>
<b>5.3 GPS/MET Kırıcılı ından Su Buharı Profillerinin Hesaplanması</b> .....	<b>20</b>
<b>6. ATMOSFERE G R</b> .....	<b>21</b>
<b>6.1 A a ı Atmosfer</b> .....	<b>21</b>
6.1.1 Basınç.....	21
6.1.2 Sıcaklık .....	22
6.1.3 Su Buharı .....	22
<b>6.2 Atmosferik Gecikme Etkisi</b> .....	<b>23</b>
6.2.1 İyonosfer Etkisi.....	23
6.2.2 Troposfer Etkisi .....	23
<b>7. ATMOSFER F Z</b> .....	<b>24</b>
<b>7.1 Atmosfer Tabakaları</b> .....	<b>24</b>
<b>7.2 Atmosfer çin Fiziksel Yasalar</b> .....	<b>25</b>
7.2.1 İdeal Gaz ve Durum Denklemi .....	25
7.2.2 Hidrostatik Denge .....	27
<b>7.3 Su Buharı</b> .....	<b>28</b>
7.3.1 Karı ma Oranı.....	28
7.3.2 Doymu Havanın Kısmi Basıncı.....	29
7.3.3 Ba ıl Nem .....	30

<b>7.4 Yayılım Gecikmesi ve Kırılma</b> .....	<b>31</b>
<b>7.5 Ya ı a Dönü ebilen Su Buharı Miktarının Ölçülmesine li kin Metodlar</b>	<b>34</b>
7.5.1 Ortalama Sıcaklık ve Dönü üm Faktörü.....	36
<b>8. ÇALI MADA ZLEN LEN YOL</b> .....	<b>38</b>
<b>9. SONUÇ VE ÖNER LER</b> .....	<b>40</b>
<b>9.1 Olu turulan Grafiklerin Sayısal De er Aralıklarının Kar ıla tırılması. .</b>	<b>41</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>47</b>
<b>EKLER</b> .....	<b>52</b>
<b>EK A : Model Denklem ile Mendes Modeli PWV Grafiklerinin</b> <b>Kar ıla tırılması</b> .....	<b>53</b>
<b>EK B : Model Denklem ile Mendes ZWD Modeli Grafiklerinin</b> <b>Kar ıla tırılması</b> .....	<b>65</b>

## KISALTMALAR

CORS – TR	: Sürekli Gözlem Yapan Referans stasyonları – Türkiye
COSMIC	: Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate ( yonosfer ve klim Meteorolojisi için Uydu Gözlemeleme Sistemi)
DM	: Devlet Meteoroloji leri Genel Müdürlü ü
EPS	: EUTMETSAT Polar System (EUTMETSAT Kutupsal Sistem)
EUTMETSAT	: European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
GAO	: Government Accountability Office ( Devlet Saymanlık Dairesi) (Avrupa Meteorolojik Amaçlı Uydulardan Yararlanma Te kilatı)
GNSS	: Global Navigation Satellite System ( Küresel Navigasyon Uydu Sistemi)
GPS	: Global Positioning System (Küresel Konumlandırma Sistemi)
GRAS	: Global Navigation Satellite System Receiver for Atmospheric Sounding (Küresel Navigasyon Uydu Alıcıları ile Atmosferik Sondaj)
IGS	: International GPS Service (Uluslararası GPS Servisi)
ILW	: Integrated Liquid Water ( ntegre Sıvı Su)
IPWV (IWV)	: Integrated Water Vapor ( ntegre Su Buharı)
ISTA	: stanbul istasyonu
JPL	: Jet Propulsion Laboratory (Jet tki Laboratuvarı)
LEO	: Low Earth Orbit (Alçak Dünya Yörüngesi)
L1	: GPS Uydu Frekansı 1
L2	: GPS Uydu Frekansı 2
MAGIC	: Meteorological Applications of GPS Integrated Water Vapor Measurements in the Western Mediterranean (Batı Akdeniz GPS ntegre Su Buharı Ölçümleri Meteorolojik Uygulamalar)
MATLAB	: Math Laboratory Programme ( Matematiksel Program)
MET	: Meteorolojik
NAVSTAR	: Navigation system with Time and Ranging (Navigasyon Sistemi ile Zamanlama ve Uzaklık Tespiti)
NCAR/Pennsate	: Orta ölçekli hava modeli
NWP	: Numerical Weather Prediction (Sayısal Hava Tahmini)
PPP	: Precise Point Positioning ( Hassas Konumlandırma)
PWV	: Precipitable Water Vapor (Ya ı a Döne ebilen Su Buharı)
SOPAC	: Scripps Orbit and Permanent Array Center (Scripps Yörünge ve Sürekli Dizin Merkezi)
TEC	: Total Electron Content (Toplam Elektron çeri i)
UCAR	: University Corporation for Atmospheric Research (Atmosferik Ara tırmalar için Üniversite birli i)
VLBI	: Very Long Baseline Interferometry
WVR	: Water Vapor Radiometers (Su Buharı Radyometresi)
ZHD-ZDD	: Zenith Hidrostatic Delay (Zenit Kuru Gecikme)
ZTD	: Zenith Total Delay (Zenit Toplam Gecikme)
ZWD	: Zenith Wet Delay (Zenit Islak Gecikme)

## EK L L STES

ekil 1.1	: GPS uydu takımı.....	1
ekil 1.2	: Atmosfer tabakaları .....	2
ekil 1.3	: GPS uydusu .....	4
ekil 1.4	: EUTMETSAT sinyal vericisi .....	6
ekil 1.5	: EUTMETSAT sinyal alıcısı.....	6
ekil 2.1	: Troposferden bir görünüm.....	7
ekil 2.2	: Ekosistemde su döngüsü.....	9
ekil 2.3	: Dünya atmosferinin içerdiği gazlar .....	10
ekil 5.1	: Okültasyon tekniğinin matematik gösterimi.....	15
ekil 5.2	: GPS okültasyon kavramının matematik diyagramı.....	16
ekil 6.1	: Troposfer, Stratosfer ve Tropoz' un matematiği.....	22
ekil 7.1	: Atmosfer tabakaları.....	24
ekil 7.2	: Hidrostatik dengede kesite uygulanan dikey yönde kuvvet.....	27

## SEMBOL LİSTESİ

	: Özgül hacim
$c$	: $I_1$ ın bo luktaki hızı
$e$	: Kısmi su buharı basıncı
$e_{sat}$	: Doygun kısmi su buharı basıncı
$\epsilon$	: Sabit katsayı
$g$	: Yerçekim ivmesi
$\rho$	: Yo unluk
$\rho_v$	: Su buharı yo unlulu ğu
$\rho_d$	: Kuru hava yo unlulu ğu
$h$	: Yükseklik
$k_1, k_2, k_3$	: Kırınım sabitleri
$l$	: Geometrik yol
$L$	: Geometrik mesafe
$L$	: Gizli erime ısısı
$m$	: Kütle
$m_v$	: Su buharı kütlesi
$m_d$	: Kuru hava kütlesi
$M_i$	: Ortalama moleküler kütle
$n$	: Kırılma indeksi
$N$	: Kırılma terimi
$P$	: Toplam basınç
$P_d$	: Kuru hava kısmi basıncı
$Q$	: Dönü şüm faktörü
$R$	: Evrensel gaz sabiti
$R_d$	: Kuru havanın özgül gaz sabiti
$R_i$	: Özgül gaz sabiti
$R_v$	: Su buharının özgül gaz sabiti
$rh$	: Ba ıl nem
$s$	: Elektromanyetik yol
$S$	: Elektromanyetik mesafe
$\delta\rho_{tro}$	: Toplam troposferik gecikme bile eni
$\delta\rho_h$	: Kuru gecikme bile eni
$\delta\rho_w$	: Islak gecikme bile eni
$T$	: Sıcaklık
$T_M$	: Ortalama troposfer sıcaklığı
$v$	: $I_1$ ın ortamda yayılma hızı
$V$	: Hacim
$w$	: Karı ım oranı
$w_{sat}$	: Doygun karı ım oranı
$Z_d^{-1}$	: Kuru havanın sıkı ma faktörü
$Z_v^{-1}$	: Islak havanın sıkı ma faktörü
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	: Model denklem katsayıları

**Enstitüsü** : **Fen Bilimleri**  
**Anabilim Dalı** : **Fizik**  
**Tez Danımanı** : **Doç. Dr. Ay egül Yılmaz**  
**Tez Türü ve Tarihi** : **Yüksek Lisans – Ocak 2012**

**ATMOSFERDEKİ YAĞI A DÖNÜMLERİNİN SU BUHARIM KANTARININ  
KÜRESEL KONUMLANDIRMA SİSTEMİYLE ÖLÇÜMÜNÜN  
DEĞERLENDİRİLMESİ**

**ÖZET**

Küresel konumlama sistemi (GPS) kesin bir yön bulma ve jeodezik konumlama için kurulmuştur. Sistem, yerkürenin etrafındaki yörüngede hareket eden uydulardan ve zamanı güncellemesi açısından destek istasyonlarının zemin tabanlı ağlarından oluşur.

Uydu takımından oluşan GPS, atomik saat ile kontrol edilen L bant sinyallerini yer yüzündeki alıcılara iletirler. Sinyalde meydana gelen zaman gecikmesi alıcıdaki konumunu oluşturmak için birden çok uydudan tek bir alıcıya doğru hareket eder. Sabit konumdaki GPS alıcılarından elde edilen bilgiler sinyal yolu gecikmesine birçok faktörün etkide bulunduğunu gösterir. GPS sinyal gecikmelerinin büyük bir kısmı sinyallerin iyonosfer ve nötr atmosferden geçişlerinde gerçekleşmektedir. GPS sinyalleri troposfer boyunca ilerlerken yayılım gecikmesine neden olan bir çeşit kırılmaya uğurlar ve bunun dönümünde ise GPS ölçümlerinde troposferik hata ortaya çıkar. Troposfer GPS sinyallerinde saçıcı bir etki oluşturmayan bir ortamdır. Bu nedenle yayılım gecikmesi, sinyallerin frekansına bağılı değildir. Bilinen bir lokasyondaki alıcıyı ele alarak ardından uydunun bu lokasyona uzaklığı hesaplanarak anten ölçümlerinin verdiği uzaklık değerlendirilerek toplam atmosferik gecikme hesaplanmaktadır. Genellikle su buharının sebep olduğu nemin gecikmesi ile kuru hava ve su buharının karışımıyla meydana gelen hidrostatik denge olduğu düşünülen kuru gecikme arasında bir ayrım yapılmaktadır. Zaman içinde yavaş yavaş meydana gelen bu değişimin %90' ı kuru bileşenlerde meydana gelir. Kuru gecikme atmosferik şartlara özellikle basınçla bağlıdır ve sadece nem gecikmesini ihmal ederek kolaylıkla toplam troposferik gecikmeden ayrıtılabılır. Kuru gecikme zenit (başucu) yönünde 2.2 - 2.4 cm' den daha fazladır. Ancak yüzey basınç gözlemlerine dayanan yüksek doğruluk ile tahmin edilebilir.

Kuru bölümün aksine nemli olan kısım daha zamansal ve uzaysal değişkenlere sahiptir. Nem gecikmesinin bireysel uydulara olan etkileri, zenit yönünde belirlenen anten lokasyonundaki zenit ıslak gecikmesinin bir değişimine 10 - 40 cm arasında değişen karmaşık haritalandırma yöntemlerini kullanarak belirlenebilir. Öte yandan, hissedilir derecedeki su buharı içeriğinin ve bulutların bütünüyle troposfere hapsolme durumunda oldukları bilinmektedir. Böylelikle troposfer tüm önemli hava olaylarının gerçekleştiği, yüzey ve atmosfer arasında yer alan su kaynaklarının buharlaşması ve yağış (yağmur, kar) yüzünden yer değiştirmelerine yer aldığı bölgedir.



Hava durumu tahmin keskinliğini önemli ölçüde artırmak için ise yağışa dönüşebilen su buharı (PWV) ölçümleri kullanılabilir.

Bu çalışmada troposferik nem gecikmesini biçimlendirmek için GPS gözlemlerinden elde edilen meteorolojik (GPS / MET) verilerden yararlanılarak su buharının kısmi basınç fonksiyonu için geliştirilen PWV model denklemini de kullanarak alternatif bir yaklaşım sunulmaktadır.

Çalışmada Uluslararası GPS servisinden (IGS) alınan meteorolojik (GPS / MET) verilerinin ISTA istasyonu için iyi bir biçimde aktarılması olmasına dikkat edilerek, belirli bir yılın bütün aylarının seçilmiş günleri için veriler kullanılmıştır. Özellikle sıcaklık ve bağıl nem verileri, geliştirilen model denkleminde kullanılmak üzere uygun formata getirilmesinin ardından MATLAB programından yararlanılarak sonuca ulaşılmıştır. Sıcaklık ve bağıl nem verileri doğrudan kısmi buhar basınç denkleminin birimlerine uygun hale getirilmiştir. Yağışa dönüşebilen su buharı bilgisine ulaşabilmek için geliştirilen model denkleminde kısmi buhar basıncı faktörünün yanında hata oranını düşürmeye yönelik katsayılar kullanılmıştır. Bu katsayılar İstanbul il sınırının koordinat sisteminin enlem verilerinden yararlanılarak elde edilmiştir. Aynı veri ve yöntemle zenit ıslak gecikme tahmini yapabilmek için MATLAB programında uygun formüller kullanılarak zenit ıslak gecikme verilerine ulaşabilmek için işlemler yapılmıştır. Modelin sonucu halen geçerli olan Mendes ıslak gecikme modeliyle karşılaştırılmıştır. Yapılan işlemlerin geçerliliğini test etmek amacıyla IGS- ANKR istasyonundan alınan verilerle de benzer işlemler yapılarak, Mendes modeliyle kıyaslandığında sonuçların anlamlı olduğu görülmüştür.

Mendes' in ıslak gecikme modeli ve tezde oluşturulan yaklaşım model denkleminin yağışa dönüşebilen su buharı ölçümleri (PWV) elde etmek için kullanılmaktadır. PWV kısmi su buharı basıncı ile karşılaştırılarak elde edilen model denklemin sonucunun açık ve net olduğu görülmüştür. Ayrıca, kısmi su buharı verilerini nem gecikmesini (ZWD), model denklemindeki PWV ile ilişkilendirilerek doğrudan tahmin ve hataya sebep olan faktörler hakkında bilgiye ulaşılmıştır. Geliştirilen modelin geçerli olan Mendes modeliyle aynı özelliklere ve benzer sayısal değerlere sahip olduğu ortaya çıkmıştır.

**Institute** : **Institute of Sciences**  
**Department** : **Physics**  
**Supervisor** : **Assoc. Prof. Dr. Ay egül Yılmaz**  
**Degree Awarded and Date** : **MSc – January 2012**

**EVALUATION OF THE MEASUREMENT OF THE AMOUNT OF  
PRECIPITABLE WATER VAPOR IN ATMOSPHERE WITH GLOBAL  
POSITIONING SYSTEM**

**ABSTRACT**

The Global Positioning System (GPS) tracking network was established to provide high precision navigation and geodetic positioning. The system consists of satellites in orbit around the earth and a ground-based network of support stations to update the ephemerides and clocks.

A constellation of GPS satellites transmit atomic-clock controlled L-band signals to receivers on the earth. Time delays of the signal travel paths from multiple satellites to a single receiver are used to establish the ground position of the receiver. Data recorded by GPS receivers at fixed locations will show signal path delays caused by a variety of effects. One class of GPS-signal delays can be directly attributed to the passage of the signals through the Earth's ionosphere and atmosphere. As the GPS signals travel through the troposphere, they are subjected to the refraction that causes propagation delay, in turn, tropospheric error in GPS measurements. The troposphere is a non-dispersive medium at the GPS frequencies, which means that the propagation delay does not depend on the frequency of the signal. By taking a receiver at a known location, then calculating the distance to a satellite's known location, and evaluating the measured distance to a satellite given by the antenna's measurements, a total atmospheric delay is calculated. Usually a distinction is made between a wet delay caused by water vapor, and a hydrostatic delay caused by a mixture of dry air and water vapor that is considered to be in hydrostatic equilibrium. Almost 90 % of the total occurs in the hydrostatic component, which varies slowly with time. The hydrostatic delay is dependent on atmospheric conditions, mainly pressure, and can easily be removed from the total tropospheric delay, leaving only the wet delay by easily modeling with the assumption of hydrostatic equilibrium to an accuracy at a millimetre level Mendes and Langley. The hydrostatic delay is much larger, 2.2 - 2.4 cm in the zenith direction. However, it can be predicted with high accuracy based on the surface pressure observations.

Unlike the hydrostatic part, the wet part has strong spatial and temporal variations. The effects of wet delays to the individual satellites are mapped to the zenith direction using sophisticated mapping functions that give one value of zenith wet delay, ZWD,

with the range can 10-40 cm, for a give antenna location. On the other hand, it is well-known that appreciable water-vapor contents and clouds are almost entirely confined to the troposphere.

Hence troposphere is the seat of all important weather processes and the region where interchange by evaporation and precipitation (rain, snow, and so forth) of water substance between the surface and the atmosphere takes place.

Recently atmospheric scientists have shown that to improve weather forecasting accuracy significantly, measurements of Precipitable Water Vapor (PWV), which is defined as the height of liquid water that would result from condensing all the water vapor in a column from the surface to the top of the atmosphere, can be used.

In this study, we present an alternative approach to model the tropospheric wet delay by using our model equation for PWV developed as a function of partial pressure of water vapor, only and GPS/MET data, a purely independent data set, instead of GPS observables.

In this study, by taking into consideration the suitability of meteorological data (GPS / MET) which has been obtained from International GPS Station (IGS), the data for a specific year's all months' s selected days is used. Especially, after making suitable temperature and relative humidity data to use in developed model, by benefitting from MATLAB programme the desired result is attained. Temperature and relative humidity data has been made suitable to equation of saturated local vapor pressure units. In the model equation which has been developed in order to reach the information of precipitable water vapor the ratio which is for reducing error rate beside local vapor pressure factor is used. The ratio is obtained by benefitting from latitude data in coordinate system of Istanbul' s provincial border. With the same data and method in order to predict zenith wet delay in MATLAB programme by using suitable formulas some operation is made. The result of the model has been compared with the available and valid result of MENDES wet delaying model. In order to test the validity of operations the same operation is made with the data which is taken from IGS- ANKR stations, and then it is seen that the results are meaningful.

Mendes' s wet delay model and the approaching model equation, which is created in this study, are used to obtain Precipitable Water Vapor measurements (PWV). When it is compared with PWV water vapor pressure it is seen that the model equation's result is loud and clear. In addition, by associating local water vapor data, wet delay (ZWD) with PWD in model equation, the information about factors, which lead to error for wrong prediction, is reached. It is learned that both ISTA station model and valid Mendes model have same characteristics and similar numerical values.

## 1. G R

### 1.1 KÜRESEL KONUMLANDIRMA SİSTEMİ (GPS)

GPS, yüksek hassasiyette yön bulma ve jeodezik konumlama amaçlı kurulmuş bir sistemdir. Sistem, dünya etrafında yörüngedeki uydulardan ve saatlik güncellenen yer merkezli a ile desteklenen istasyonlardan oluşur.

GPS aslında yön bulma ve zaman aktarımı sistemleri şeklinde tasarlanmıştır ancak jeodezik konumlama alanında (çok hassas araştırmalarda) köklü değişimler olmaktadır. Küresel konumlama sistemi (GPS) L bandında (1.2 and 1.6 GHz) radyo sinyallerini GPS alıcılarıyla donatılmış ve bu sistemi navigasyon (yön bulma), zaman transferi ve görelilik (bağıl) konumlama için kullanan çok sayıda kullanıcıya ileten uydular takımından oluşmaktadır. GPS uydularını 55° lik 6 yörünge düzlemi üzerine yerleştirilmiş 21 aktif ve 3 yedek olmak üzere toplam 24 uydular olmaktadır.



Şekil (1.1): GPS uydular takımı [GAO].

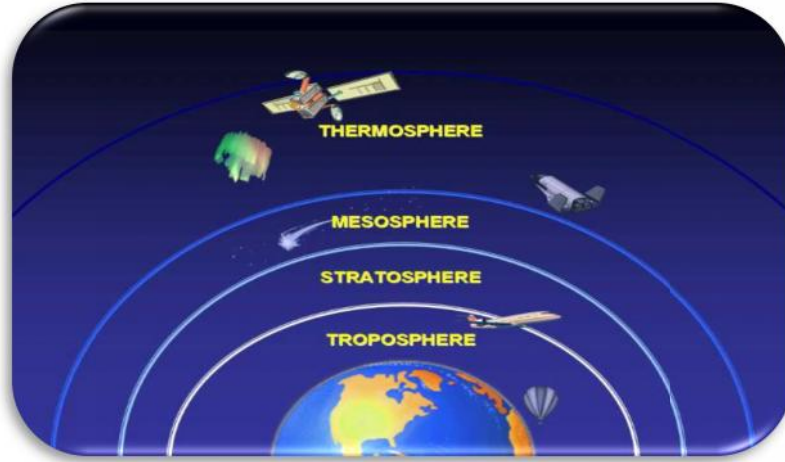
Ancak ortalama ömrü 7.5-10 yıl olarak hesaplanmıştır olan bazı uyduların hala sorunsuz olarak çalışmaya devam etmeleri nedeniyle toplam 30 GPS uydusu faaliyet göstermektedir. Uydular yeryüzünden 20.200 km yükseklikte olup 11 saat 58 dakikada bir tam devir yapmaktadır. Yeryüzünde herhangi bir yer ve zamanda gözlenebilecek en az uydular sayısı 4'dür ve her bir uydular yaklaşık 5 saat ufuk hattı üzerinde kalır. Türkiye bölgesinde enleme göre değişimle birlikte gözlenebilen uydular sayısı en çok 10'dur. GPS takımı uydularından iletim, atomik saat kontrolüyle L bandındaki sinyaller yerdeki alıcıya iletilerek oluşur. Zaman gecikmesiyle birden fazla uydudan tek bir alıcıya sinyal geçiş yolları alıcının zemin pozisyonunu oluşturmak için kullanılır. Konum belirlenmesinde GPS alıcıları tarafından kaydedilen verinin, çeşitli etkenler tarafından sinyal yolu gecikmelerine sebep olduğu görülmüştür.

Bu konuda jeodeziciler, jeofizikçiler ve ara tırmacılar geni çaplı çalışmaktadır. [Leick, 1990; Dixon, 1991]. GPS jeodezide GPS uyduları ile alıcıları arasındaki mesafe, ya radyo sinyallerinin uçuş zamanını ölçerek ya da interferometrik teknik (faz ölçümü) ile ortak yol uzunluğunu bularak belirlenir. Bu yaklaşımların ikisi de uydu ve alıcılar arasındaki optik yol uzunluğunu artıran atmosferin varlığı yüzünden karıştırılmaktadır. Jeodetik GPS işlem yazılımının en önemli noktalarından biri alıcılar ve uydular arasındaki uzaklığı düzeltmektir. Böylelikle atmosferin etkileri de azaltılabilir. Bu düzeltmeler ağırlık yol uzunluğu, sinyal gecikmeleri ve faz deplasmanı açısından formüle edilebilir.

### 1.1.1 Küresel Konumlandırma Sisteminde Sinyal Gecikmeleri

GPS sinyal gecikmeleri, sinyallerin Dünya'nın iyonosfer ve nötr atmosferinden geçiş sırasında ortaya çıkar.

iyonosferik gecikme frekansa bağımlı olarak sinyal saçıcıdır ve GPS uyduları (L1 & L2) kullanılarak, çift grüplü bir GPS alıcısı tarafından her iki frekans aktarımı elde edilerek belirlenebilir [Spilker, 1980; Brunner, 1993]. Troposferik gecikme tahmininde iyonosferik yayılım gecikmesini net bir biçimde ortadan kaldırmak için yüksek kalitedeki iki frekans alıcısı gerekir. Bu iyonosferik gecikmede diğer GPS alıcılarıyla kaydedilen gözlemler referans olmadan elimine edilebilirler.



Şekil (1.2): Atmosfer tabakaları [Williams, 2008].

Geriye kalan atmosferik gecikme yada nötr gecikme saçıcı değildir ve tek istasyon gözlemlerinden tahmin edilemez. Ancak GPS alıcılarının ağırlıklarındaki her bir istasyonu etkileyen nötr gecikme parametrelerle ifade etmek ve bu parametreleri ağırlık geometrisi için olan genel jeodezik tersinmesinin bir parçası olduğunu ve uydularında kesin yörüngeleri olduğunu tahmin etmek mümkündür [Hofmann-Wellenhof; 1993]. Zenit ıslak gecikmeyi tahmin etmedeki fiziksel temel, GPS alıcılarını 4' ten 8 uyduya kadar eş zamanlı bir şekilde izlenerek ve azimut veya yükselmeyi hesaba katmadan zenit ıslak gecikme belirlenebilmektedir.

Nötr gecikme "kuru atmosferle" ilişkilendirilen kuru (hidrostatik) gecikmeye ve su buharının kalıcı dipol moment ile ilişkilendirilen "ıslak (nemli)" gecikmeye ayrılmıştır.

Nötr atmosfer kuru gaz ve su buharının bir karışımıdır. Su buharı bu karışımında iki kutuplu momente sahip olan tek ödedir. Troposferin büyük bir kısmı boyunca atmosferik kırılma indeksi, çift kutuplu (dipol) bileşenin atmosferik kırılma indeksinden yaklaşık 20 kat daha fazladır. Bu sebeple su buharı nedeniyle oluşan kırılma çift kutuplu bileşeni çift kutuplu olmayandan ve atmosferdeki diğer öedlerden ayrı ele alınmaktadır. Her iki bileşeni “ıslak” ve “kuru” gecikme denmektedir. Her iki gecikme de zenit yönünde jeodezik yol boyunca küçüktür ve yükseklik açısının sinüsüyle ters olarak artmaktadır. Yani bu her iki gecikme de zenit doğrultusunda, 15° ye kadar yükselmektedir. Gecikme için belirtilen ifadelerin çoğu atmosferde alınan yol boyunca ele tirme (haritalandırma) fonksiyonlarından oluşmaktadır. Ele tirme fonksiyonu açısız yüksekliğe bağılı olarak tanımlanır [Davis, 1985].

Jeodeziciler ve jeofizikçiler bu gecikmeleri, GPS ve VLBI (Very Long Baseline Interferometry) gözlemlerinden kaldırma amacıyla biçimlendirme çalışmaları yapmaktadır [Tralli ve Lichten, 1990; Herring ve diğeri, 1990].

Kuru gecikmeler zenit yönünde 2.3 m'ye ulaşmaktadır. Verilen yüzey basıncı ölçümlerinden sonra kuru gecikmeleri ortadan kaldırmak mümkündür. Zenit ıslak gecikme kurak bölgelerde birkaç santimetreden daha küçük ama nemli yerlerde 35 cm'den fazla olabilir. Her zaman ıslak gecikme kuru gecikmeden küçük olmasına rağmen genellikle daha çetlidir ve ortadan kaldırılması da zordur. Bu sebeple yüzeyden yapılan meteorolojik ölçümlerle kesin ıslak gecikme tahmininde bulunmak neredeyse mümkündür (Resch, 1984; Tralli ve diğeri, 1988). Ancak jeodeziciler yüzey ölçümlerinden hidrostatik gecikmeyi ve nem gecikmesini tahmin edebilirler. Nem gecikmesini ölçen zemin tabanlı su buharı radyometre gözlemleri kullanmaktadır [Ware ve diğeri, 2001; Elgered ve diğeri, 1991].

Ancak diğer bir yaklaşımda ise GPS ve VLBI jeodesistleri zamanla değişen zenit ıslak gecikmesini belirleyen, GPS ve VLBI verilerinden yararlanarak tahmin teknikleri geliştirmişlerdir [Tralli, 1988]. Bu tahmin teknikleri atmosferin azimutal simetrisini kabul eder ve nemin yükseliş bağıntısını (ele tirme fonksiyonunu) ortadan kaldırır. Böylelikle bu gecikme çok kısa bir zamanda değişir. Bu analizler, yılın zamanına ve konumuna bağılı olarak tipik zenit ıslak gecikme değişikliklerini saatte 1 ile 20 mm arasında olduğunu göstermektedir. Zenit ıslak gecikme GPS ve VLBI verileri ile 5 ile 20mm arasında kesinlikle yenilenebilir. Jeodeziciler iyonosferik ve troposferik gecikmeleri ortadan kaldırmak için tahminlerde bulunurlar. Fakat iyonosferik fizikçiler, iyonosfer çalışmaları ve araştırmalarında da GPS kullanmaya başlamışlardır [Coco, 1991].

Bu da meteorologların da aynı yöntemle atmosferik kırılma indeksini ve troposferik su buharı dağılımını belirleyebileceklerini göstermektedir. Fakat bu durum ıslak ve kuru troposferik gecikmeleri biçimlendirmek için yenilikler gerektirir. Jeofizikçiler ve jeodeziciler tarafından uygulanan modeller bir şekilde idealleştirilmiştir [Rocken, 1991].

Son VLBI çalı maları çok kullanılmamasına ra men azimutal asimetri modellerini birle tirmeye ba lamı tır [ Herring, 1990]. Üstelik kuru ve ıslak gecikmeyi tahmin etmek için kullanılan teknikler izole edilmi bir alıcı tarafından kaydedilen sinyalleri düzeltmeye odaklanmı tır.



ekil (1.3): GPS uydusu [GAO].

Meteorologlar ve GPS uzmanları beraber çalı arak troposferi daha detaylı bir ekilde karakterize eden prosedür tasarlama çalı ması sürdürmektedirler. Troposferik gecikmenin geli tirilmi modeli GPS jeodezisinin dü ey do rulu unu arttırmak için gereklidir. Arttırılmı dü ey do ruluk jeodezicilerin oldu u kadar küresel iklim de i ikli i kapsamında deniz, kara ve hava ile ilgilenen jeofizikçilerin de çalı ma alanı içine girmektedir [National Research Council, 1990]. Ayrıca volkanlar ve plaka tektoni i, kabuk hareketi ve depremlerle meydana gelen deformasyonlar üzerinde çalı an jeofizikçilerin çalı malarını sürdürdükleri alanda farklı yakla ım olu turabilecek öneme sahiptir [Hager ve di ., 1991; Dixon 1991].

## 1.2 GPS Meteorolojisi

GPS Meteorolojisi, GPS verilerinin atmosferik durum analiz ve gözetim amaçlı uygulamalarıdır. Di er bir deyi le GPS metorojisi, GPS yardımıyla elde edilen su buharı verilerinin, orta ölçekli modelleme, uydu verileri ile di er meteorolojik verilerin birle tirilmesi, iklim bilimi “klimatoloji”, kuvvetli hava olayları, bulut dinamikleri, hidroloji vb. alanlarda kullanımını konu edinir [Ware, Rocken ve di ., 2001]. Radyo sinyalleri yayınlayan GPS uydularıyla atmosferik gözlem, hem yer merkezli hem de uzay merkezli GPS uygulamaları ile yapılmaktadır. GPS uyduları yeryüzündeki alıcılara radyo sinyallerini iletirler. Yeryüzündeki alıcılarda kaydedilen bu sinyallerin analizi ile atmosferik kırılma profil verileri elde edilebilmektedir. Bu profiller e er ölçü noktasına ait sıcaklık profili mevcutsa, troposferik nem profiline dönü türülebilmektedir.

Sabit konumlardaki yer merkezli GPS alıcıları veri toplamak için kullanılabilir ve bu da integre (birle ik) ya 1 a dönü ebilir su buharının (IPWV; Integrated Precipitable Water Vapor) belirlenmesinde kullanılabilir. Atmosfer dinami i ile ilgili çalı an bilim adamlarının çalı malarında GPS ile belirlenen PWV gözlemlerinin, hava tahmin kesinli ini önemli ölçüde arttırabildi ini göstermi tir. Bununla birlikte yatay ve dü ey su buharı da ılım ölçümleri için geli tirilen tekniklerden biri olan meteoroloji balonları (radyosond) ile radyo sinyallerinden yararlanarak yer istasyonlarına atmosfer içindeki sıcaklık, basınç, nem ile rüzgâr hız ve yönü ile ilgili bilgi aktarımı sa lanmaktadır [Ferretti ve di ., 2005].

GPS sinyalinin atmosferde gecikme nedeni; atmosferik kırınımın sıcaklık, basınç ve neme olan duyarlılı ından kaynaklanmaktadır. GPS uydusu ile GPS yer istasyonu arasındaki sinyal iletimi boyunca meydana gelen toplam gecikme, yüzey basıncına ve atmosferik nem hacmine ba lıdır. Normal bir GPS veri i leme a masında, ölçüm noktası etrafındaki ortalama atmosferik özellikleri yansıtan tek bir gecikme de eri elde edilmektedir. Bu nedenle, yer istasyonundan her bir uduya olan gecikmeyi belirleyecek daha geli mi yöntemlere gereksinim vardır. Ara tırmacılara göre bu sa landı ı takdirde, nem hakkında elde edilecek bilginin mevcut durumdan yakla ık 10 kat daha fazla olaca ı belirtilmektedir (Rocken, 1995).

### **1.3 GPS Meteorolojisinin Potansiyeli**

Meteorolojik hava tahminleri GPS kaynaklı su buharı verileri ile yapılabilir. Atmosfer kimyası, küresel iklim de i ikli i, cephesel sistemler ve fırtına olu umu ve mekanizmaları gibi konuları da içeren GPS meteorolojisinin potansiyelini GPS a ları aracılı ıyla “IWV (IPWV)” e le tirmesi olu turmaktadır (Bevis, 1992).

#### **1.3.1 Mevcut Jeodezik GPS A larının Kullanımıyla ntegre Su Buharı (IWV) E le tirmesi**

GPS son yüzyılın haritacılık ve navigasyon alanlarındaki en önemli yenili idir. GPS tekni i ile elde edilen veriler, zenit ıslak gecikme nedeniyle olu an kayıp zamanı yeniden kazanmak ve gözlenen zenit ıslak gecikmesinden IWV haritalandırması için kullanılabilirler. GPS alıcılarından elde edilen verileri kullanarak IWV haritalandırması GPS istasyonlarına uygulanabilir. Alıcıların a ları verildikten sonra IWV da ılımını detaylı bir ekilde olu turmak mümkündür. GPS veri i leme a masında, ölçü noktası etrafındaki ortalama atmosferik özellikleri yansıtan tek bir gecikme de eri elde edilmektedir. GPS verilerini kullanarak ZWD’ yi yeniden yapılandırmak mümkün oldu undan bu büyüklükte meydana gelen çe itli de i imler de kolaylıkla çözülebilir (Bevis, 1992).

Bu konuyla ilgili olarak Avrupa’ da bir çok proje çalı ması yürütülmektedir. Buna MAGIC (Meteorological Applications of GPS Integrated Water Vapor Measurements in the Western Mediterranean) projesi bir örnektir (Haase ve di ., 2001).



Ayrıca, Türkiye’ den DM ’ nin de üyesi oldu u “Avrupa Meteorolojik Amaçlı Uydulardan Yararlanma Te kilatı” (EUMETSAT) tarafından meteorolojik gözlemlerde yeni bir dönem açaca ı kabul edilen EUMETSAT Kutupsal Sistemi’ nin (EPS, EUMETSAT Polar System) kurulum çalı maları devam etmektedir.

Bu sistem, üç adet meteorolojik uydudan olu maktadır ve Dünya ikliminin izlenmesi ve hava olaylarının gözlenmesi amacıyla farklı aletler ta ımaktadır. Bu aletlerden biri GRAS (Global Navigation Satellite System Receiver for Atmospheric Sounding) alıcısıdır.



ekil (1.4): EUMETSAT Sinyal Vericisi



ekil (1.5): EUMETSAT Sinyal Alıcısı

GRAS alıcısı ile, GPS uydu sinyalleri de kullanılarak atmosferdeki sıcaklık, basınç ve su buharı de erleri elde edilmektedir. (Söz konusu proje hakkında ayrıntılı bilgiye “grassaf.org” internet adresinden ula ılabilmektedir.)

Zenit troposferik gecikme (ZTD) de erleri sayısal hava tahmin modelleriyle (NWP) benzer de erlere sahip olmasına ra men, ZTD bile eni olan ZWD’ nin IWV’ ye dönü türülerek kullanılması iklim ara tırmalarında önemli bir yer tutmaktadır. ZWD’ nin IWV’ ye dönü türülebilmesi için çalı ma bölgesi üzerindeki ortalama sıcaklı ın bilinmesi gerekmektedir. Bu de er kesin olarak bilinemedi inden, bu amaçla yüzey sıcaklık de erlerinden yararlanarak regresyon analizi ile ortalama sıcaklık de erleri elde edilmektedir. Ara tırılan büyüklüklere bakıldı ında; ZTD de erlerinin metre, ZWD de erlerinin santimetre ve IWV de erlerinin milimetre mertebesinde oldu u görülecektir.

IWV (m/kg) ile yerküre yüzeyindeki verilen noktanın üzerini kaplayan (ya da üzerindeki) atmosferdeki su buharı miktarı genellikle birim alan ba ına dü ey birle tirilmi su buharı kütlesi olarak ifade edilmektedir. Kısaca IWV, belli bir noktayı kaplayan (GPS antenleri) atmosferik su buharı miktarıdır ve buhar kütlesi kg. olarak tanımlanır. Ölçümlerin boyutları farklı oldu u için farklı isimlendirmek uygun dü mektedir. Birim alan buhar kütlesini ifade etmek için birle ik su buharı terimi, su sütunu yüksekli i ifadesi için de ya ı a dönü ebilir su buharı (PWV) terimi kullanılır. PWV terimi suyun e sütunlarının yüksekli ini (mm) olarak ifade eder [Bevis, 1992].

Aralarındaki oran ise ;

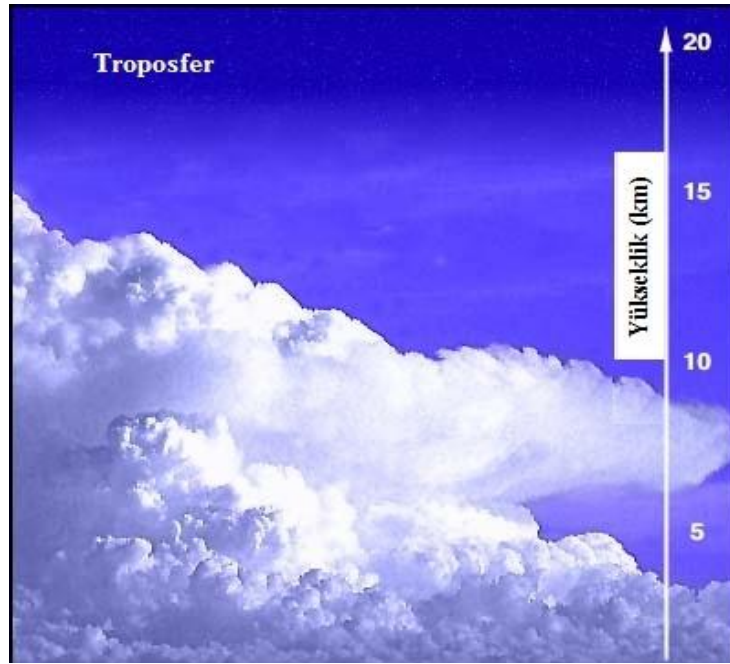
$$PWV = IWV / \rho \quad (1.1)$$

eklinedir. Burada ‘ $\rho$ ’ suyun yo unlu unu ifade etmektedir.

## 2. YA İ A DÖNÜ EB L R SU BUHARI (PWV)

Su buharı, gaz fazındaki sudur ve havanın motoru niteliindedir. Atmosfer döngüsünde küresel iklimden mikro meteorolojiye kadar konumsal ve zamansal olmak üzere oldukça önemli bir rol oynar. Su buharı, atmosferin ana bileenlerinden en de i enken olanıdır. Su buharının sürekli buharlaşma ve yo u ma döngüsü sayesinde Dünya' nın çevresinde, atmosfer ve Dünya yüzeyi arasında ısı transferi gerçekleşir. Atmosferdeki su buharı, güne ten gelen kısa dalgaboylu radyasyonun atmosferden geçmesine izin verir ancak uzun dalgaboylu radyasyonun atmosfere girişini engeller. Bu kısıtlama ısı artışı na yol açarak sera etkisi oluşturmaktadır. Ayrıca, küresel iklim sisteminde kritik rol oynayan sera gazı özelliğine sahiptir. Bir başka ifade ile su buharı, atmosferin diğer bileenleri ile oranı karılaştırıldığında sera etkisine fazlaca katkı yapan gazdır [Mockler, 1995].

Su buharı da ılımı, bulutların da ılımı ile yakından ilişkilidir.



ekil (2.1): Troposferden bir görünüm [NASA].

İklim modellerinin oluşturmada su buharının anlaşılması önemlidir. Suyun katmanlara göre de i i mi ile ilgili olan gizli ısı sebebiyle su buharının da ılımı, atmosferin dü ey stabilizesinde, yapısında ve atmosferik fırtına sistemlerinin de erlendirilmesinde kritik bir rol oynar. Su buharı adveksiyonu (yatay hareketi), atmosferin genel sirkülasyonu ve yeryüzündeki sıvıların buharlaşmasıyla ortaya çıkan gizli ısı, yerkürenin boylamsal enerji dengesinde çok önemli bir bileendir. Bütün bunlara ek olarak suyun atmosferde meydana gelen birçok kimyasal reaksiyonlarda önemli bir rol oynadığını söyleyebiliriz.

Atmosferin troposfer tabakası kuru hava (gaz) ve çönlükla su buharından oluşur. Kuru havada nem ve yükseklik ile önemli bir değişim yoktur. Öte yandan su buharı yaygın olmakla birlikte da nık ve zamansal olarak değişir. Su troposferde sıvı faz (sis, bulut, yağmur) ve katı formda (kar, dolu, buz) bulunur. Sadece yağmur ve kar yağışı da il aynı zamanda yoğunlaşma sürecindeki büyük miktarda enerji hava olaylarının en önemli bileşenlerinden biridir.

Su buharı atmosferik rüzgar sistemlerinin dinamik ve termodinamiklerinde, bölgesel, yöresel ve küresel su döngüsü oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Çünkü su buharı zamansal ve uzaysal değişimler gösterir ve geleneksel yollarla bu da ılımı çözmek çok zordur. Operasyonel nümerik modellerdeki su buharının ba langıç koşullarındaki hatalar, kısa vadeli (0 – 24 saat) yağış tahmini hatalarına katkıda bulunur. Sürekli ölçülen GPS alıcılarının verileri, su buharı yatay da ılımı gözlemlerini olanaklı kılmaktadır.

Bu ölçümler operasyonel hava tahminlerinde ve atmosferik rüzgar sistemlerinde, atmosferik kimya ve su döngüsü gibi önemli ara tırmalarda son derece yararlıdır. Uzun vadede küresel IWV ölçümleri bölgesel ve küresel iklim değişimleri için önemli bilgiler sunar [Randall ve Tjemkes, 1991].

## **2.1 Su Döngüsü ve Su Buharının Sera Etkisi**

Su döngüsü suyun ekosistemdeki, atmosferdeki, okyanuslar ve kıtalar arasındaki fiziksel hareketi gibi katı, sıvı ve gaz halindeki cisimde bulunan su geçişini tanımlamaktadır [Gabor, 1997; Mockler, 1995]. Buharlaşmasında su, atmosferde hızlı bir şekilde hareket eder ve buharlaşma ile yeniden yoğunlaşma arasında ilişkilendirilen enerjiyi açığa çıkarır.

'Bevis' ayrıca atmosferik enerji dengesindeki su buharı rolünü vurgulamı ayrıca atmosferin ve yapısının dikey stabilitesindeki ve rüzgâr sistemlerindeki önemini su buharı da ılımını da göz önünde bulundurmıştır, (1992).

Su buharının su döngüsü boyunca iklimi yağışa dönüştürme üzerinedir. Su buharının yeterli gözlemleri yapılamadığından su döngüsünün tüm detayları ayrıntılı olarak bilinmemektedir.

Su buharı analizindeki kısıtlamalar, kısa zamanlı yağışa dönüştürme potansiyeli tahminindeki baskın hata kaynakları olarak gösterilmektedir. Atmosferde yer alan gazlar içerisinde su buharı diğer bileşenlerin miktarına göre az olmasına rağmen, toplam % 62' lik bir oranla, su buharı sera etkisine atmosferin diğer bileşenlerinden daha fazla katkıda bulunur. Karbondioksit gazı ise yaklaşık olarak % 22' lik bir paya sahiptir [Schuler, 2001].

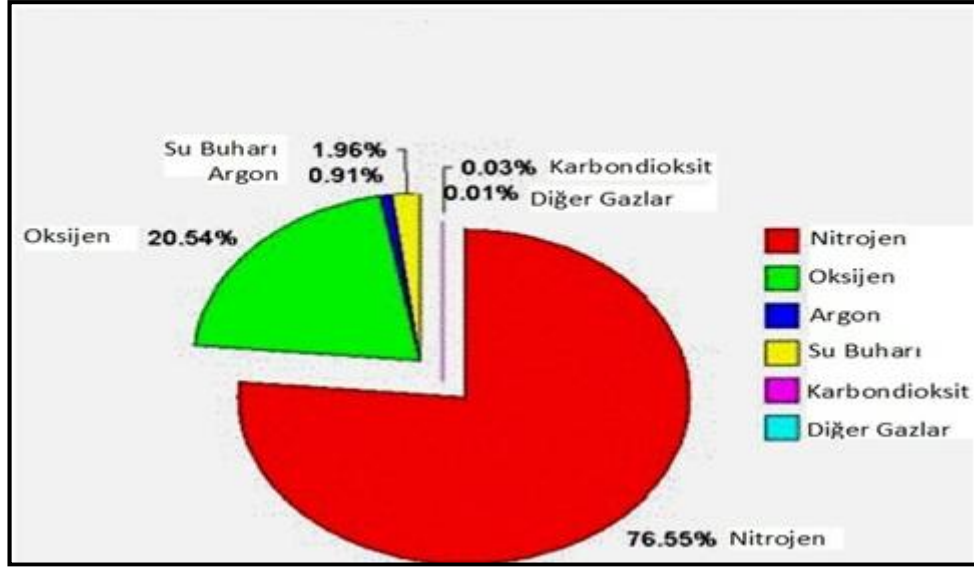


ekil (2.2): Ekosistemde Su Döngüsü [USGS].

Sera gazları, güne ten gelen kısa dalgaboylu radyasyonun geçi ine izin vermekte fakat uzun dalgaboylu radyasyonu ve yüzey tarafından emilip yeniden yayımlanan kızılötesi dalgaboylu radyasyonu ise emebilmektedir. Bu nedenle su buharı ve atmosferdeki di er sera gazları olmadan yüzey hava sıcaklı 1, donma noktasının da altında bir de ere sahip olur. Aynı zamanda su buharının insan kaynaklı olmayan sera etkisinin ba lıca bile enlerinden biri oldu u bilinmektedir.

Sera etkisinin sonucu olan küresel ısınma potansiyelinde ölçüm, kilogram ba ına anlık karbondioksit salınımını zamana göre entegre ederek alınır. Ayrıca birçok neden de küresel ısınma potansiyeline artırıcı etki yapmaktadır. Küresel sıcaklık ise 1860' lı yıllardan 2000' li yıllara göre sürekli artı göstermektedir. Kuzey yarım kürede ise 1990' lı yıllardan itibaren çok hızlı bir sıcaklık artı ı mevcuttur.

nsanların sera gazı salınımı ve artı ına katkısı endüstri, tarım ve sanayi alanındaki faaliyetler sonucu olmaktadır. Küresel ısınmada karbondioksit ve metan gazı çok etkili, aerosoller ise sayısal olarak belirsiz ancak etkili bir rol oynamaktadır [Kleijer, 2004].



ekil (2.3): Dünya atmosferinin içerdiği gazlar [Kleijer, 2004].

Atmosferde yer alan bu gazların iklim sistemini nasıl etkilediği hala tam olarak anlaşılamamaktadır. Atmosferik verilerde zamansal ve konumsal çözünürlük sağlanarak GPS tekniği ile küresel iklimler çok daha iyi analiz edilebilir. Bu nedenle GPS ile elde edilen su buharı ölçümlerinin, sonuçları iyileştireceği beklenmektedir.

## 2.2 Yayıla Dönüştürülebilir Su Buharı Ölçümünün Önemi

Noktasal olarak yön bulma ve jeodezik konumlama için kurulmuş olan küresel konumlama sistemi (GPS) yörüngedeki uydulardan ve saatlik güncellenen yer merkezli ağı ile desteklenen istasyonlardan oluşmaktadır.

GPS uydu takımı atomik saat ile kontrol edilen L bant sinyallerini yer yüzündeki alıcılara iletirler. Sinyalde meydana gelen zaman gecikmesi alıcının konumunu bulmak için vericiden tek bir alıcıya doğru hareket eder. Sabit konumdaki GPS alıcılarından elde edilen bilgiler sinyal yolu gecikmesine birçok unsurun etkisini göstermektedir. GPS sinyal gecikmelerinin bir kısmı, sinyallerin yoldan Dünya'nın iyonosfer ve nötr atmosferinden geçişlerinde olur. İyonosferik gecikme frekansa bağlı olarak saçıcıdır ve GPS uyduları kullanılarak, çift frekanslı bir GPS alıcısı tarafından her iki frekans aktarımı elde edilerek belirlenebilir. Troposferik gecikme tahmininde iyonosferik yayılım gecikmesini net bir biçimde ortadan kaldırmak için yüksek kalitedeki çift frekanslı alıcı (L1 ve L2) gerekir. Bu iyonosferik gecikmeler diğer GPS alıcıları tarafından kaydedilen gözlemler olmadan da ortadan kaldırılabilir.

Atmosferik gecikmede geri kalan kısım seçici de ildir ve sadece bir istasyon gözlemi ile ortadan kaldırılamaz. Ancak GPS alıcılarının a larındaki her bir istasyonu etkileyen do al gecikmeyi parametrelerle ifade etmek mümkündür. Ayrıca bu parametrelerin a ın görelî geometrisi için mevcut genel jeodezik kestiriminin bir parçası oldu u ve uyduların da kesin yörüngeleri oldu unu tahmin etmek mümkündür. Atmosferik gecikme, kuru atmosferle ve su buharının kalıcı dipol momentî ile ili kilendirilen ıslak gecikme olmak üzere iki gecikmeye ayrı tırılabilir.

Su buharının kesin, devamlı ve yo un gözlemleri operasyonel hava tahmini ve iklimsel ara tırmalar için gereklidir. GPS su buharı verileri küresel sayısal simülasyonlar kadar de erlidir [S. Businger, 1996].

Örne in 1995' te ara tırmacı Kuo ve arkada ları NCAR/PennState orta ölçekli hava modelini kullanarak PWV ve yüzey nem verileri birle iminde özellikle sayısal modellerden yararlandıklarını göstermi lerdir. PWV zaman serili model kullanıldı nda sayısal olarak hava tahmini iyile me oranında %20 gibi bir artı kaydedilmi tir. Di er bir artı ise yüzey nem oranı dahil edildi inde gözlenmi tir.

### **3. YA I A DÖNÜ EB L R SU BUHARININ ÖLÇÜLMES**

Havadaki su buharı miktarını açıklamak için çok sayıda tanım vardır. Bunlardan bir tanesi, havadaki su buharının gerçek yo unlu udur [Mockler, 1995]. Çünkü hava en yüksek su buharını içerde inde doyunlu a eri ir. Bu noktada su moleküllerinin buharla ması, yo u ma miktarına e ittir. Yeryüzü üzerindeki GPS alıcıları, anten alanının üzerindeki su buharının toplam miktarını ölçmemize olanak sa lamaktadır.

Küresel konumlama sistemi NAVSTAR GPS (Navigation Signal Timing and Ranging Global Positioning System), atmosferik sondaj için iki yolla kullanılabilir. Dünya etrafında alçak yörüngede dola an uyduları (LEO) GPS alıcıları ile donatarak, okültasyon (örtülme) olaylarını da analiz etmek mümkündür. Uydudan uyduya olan bu model, basıncın dü ey profili, sıcaklık, ba ıl nem ya da su buharı miktarı hakkında bilgi verir. Bir di er teknik ise GPS alıcılarının yer merkezli a larıyla yüksek hassasiyette uzun vadeli su buharı miktarının belirlenmesi üzerinedir. Bu teknik iklim modellemesi açısından büyük bir öneme sahiptir.

### 3.1 GPS Algılama Teknikleri

Meteoroloji uygulamalarında GPS veri kaynakları açısından GPS verilerinin atmosferik su buharının özelliklerinin de algılanabildiği iki ana metot vardır [Bevis ve diğeri., 1992; Yuan ve diğeri., 1993].

#### 3.1.1 Yağışa Dönüştürülebilir Su Buharını Mevcut Jeodezik GPS Aları Kullanarak Etkileştirme

Bu teknik sabit yer merkezli alıcılardan yararlanarak,

- Kesin olarak atmosferin sebep olduğu gecikme de dahil olmak üzere tüm GPS sinyal gecikmelerinin modellenmesi,
- Ve GPS verilerinden zenit ıslak gecikme miktarını geri kazanmak için rastgele filtreleme ve diğer istatistiksel tekniklerin kullanılması olmak üzere iki amaçla yapılır.

Bu amaçlardan sonra gözlenen zenit ıslak gecikmesinden, PWV'yi tahmin etmek mümkündür [Bevis ve diğeri., 1992].

#### 3.1.2 Uzay Merkezli GPS Okültasyonları

Okültasyon tekniği GPS uydusundan, (LEO) uydulara kadar olan okumalar sayesinde atmosferdeki GPS sondajlarını elde etme anlamına gelmektedir. Güneş sistemindeki diğer gezegenlerin atmosfer özelliklerini keşfetmek ve ölçmek için yıllardır çeşitli teknikler kullanılmaktadır. GPS'in gelişmesiyle, nötr atmosferdeki ve iyonosferdeki elektron yoğunluğu kırılma, sıcaklık, basınç ve su buharı profillerini elde etmek için GPS anlamı bir araç olarak görülmektedir. 1995 yılı Nisan ayında başlatılan GPS Meteoroloji (GPS/MET) deneyi (LEO'da GPS'in yerini alan) geri besleme kavramı ve kesinliğini test etmek için çok miktarda veri sunmaktadır. Birçok araştırmacı göstermiştir ki GPS / MET geri besleme derecesi ile edinilen veriler daha geleneksel atmosferik algılama teknikleri ile kıyaslanmaktadır [Kursinski ve diğeri., 2001].

LEO verilerinden atmosferik bilgileri çıkartmak için ilk olarak LEO yörüngesi belirlenmelidir. Bu da LEO'dan GPS verilerini kullanarak mümkündür. LEO'nun GPS ölçümleri, atmosferik gecikme açısından yorumlanabilir. Bu gecikmeye hem nötr atmosfer hem de iyonosfer sebep olmaktadır. İyonosferin etkisi GPS uydularından çift frekanslı sinyaller kullanılarak düzeltiler ancak LEO gözlemleri için iki frekansında yol boyunca ilerlediği için LEO gözlemleri 100 m' de ayrıldı için 1m. ya da daha fazla iyonosfer hata düzeltimi yol ayrımı etkilerinin GPS okültasyon çalışmasının en yüksek muhtemel kesinliği elde etmek için nasıl telafi edildiğini "Brunner (1993)" tanımlamaktadır [Yuan ve diğeri., 1993].

GPS kullanılarak LEO' da ki alıcı ile yapılan okültasyon ölçümleri son zamanlarda yüksek düey çözünürlük ile kesin atmosferik kırılma profillerin üretildi ini göstermiştir (Yuan ve di ., 1993).

#### 4. GPS VERİLERİNİN KULLANILMASI

##### 4.1 Meteorolojik GPS Alıcıları Kullanarak Troposferik Su Buharı Tomografisi

GPS uydu takımını 6 yörünge düzlemi üzerine yerleştirilmiş 21 aktif ve 3 yedek olmak üzere toplam 24 uydu olmaktadır. Direkt olarak alıcının üzerinden geçen uydunun gökyüzünü geçmesi yaklaşık 6 saattir. Gün boyunca her 10 dakikada bir, vektörlerin tek bir alıcıdan bir uyduya doğru geçtiği varsayılırsa, bu vektörler geniş bir yükseklik ve azimutla atmosferden geçerler.

Bilgisayarlı tomografi hedefi, gözlemin yapıldığı zaman boyunca değişmez ve bu yüzden farklı zamanlarda farklı vektörlerden toplanan gözlemler birbirleri ile alakasızdır. Ancak GPS alıcıları kullanıldığında bu durum bilgisayarlı tomografiden farklıdır. Atmosferin yavaş bir şekilde değiştiği göz önünde bulundurularak su buharı incelemesinde atmosfer alıcısından üç boyutlu parçalara ayrılmasıyla, her bir parçadaki su buharı içeriği tahmin edilebilir. Buna alternatif olarak su buharı dağılımı parametrelerle ifade edilebilir. Stokastik tomografi terimi geleneksel tomografik analizlerin genellemesinde kullanılır. Eğer bu gibi bir alıcılar kullanılıyorsa geometrisi iyi bir şekilde bilinmektedir. 1993 yılına kadar uyduların (yörüngesel yolda) otomatik bilgi işlem ile oldukça kesin olduğu bilinmekteydi (Scripps Okyanus Bilimi Enstitüsü). Buradaki önemli nokta, durumun geometrisinin zeminde ve bu şekilde kesin olarak bilinmesiyle ve böylelikle bu geometriyi tahmin etmede verilen alıcı uydu vektöründen gözlenen sinyal düzeltilmesine ihtiyaç olmadığıdır.<sup>1</sup> Bu gibi bir bağlamda her bir uydu alıcısı vektöründeki sinyal gecikmesini belirlemek üzere iyi bir tahminde bulunmak mümkündür. Çünkü bu vektörler alıcının üzerinde troposfere yakın bir örnek olmaktadır ayrıca zamanın bir fonksiyonu olarak bu gecikmenin konumsal yapısını belirlemek de mümkündür. Alıcının üzerindeki düey sıcaklık profilini tahmin etmek veya ölçmek için araçlar sağlandıktan sonra yayılım gecikmesinin uzay zaman dağılımı, su buharının uzay zaman dağılımına dönüştürülebilir.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bazı durumlarda dışarıdan atomik saatler kullanarak alıcının atomik gürültüsünü en aza indirmek avantaj sağlayabilir. [Bevis ve di ., 1992]

<sup>2</sup> Atmosferdeki kuru gaz gecikmesinin yüzey ölçümleriyle yok sayılacağı düşünülmektedir. [Bevis ve di ., 1992]



Birle ik Devletler ve Avrupa gibi meteorolojik gözlem a larından fazlasıyla yararlanılan yerlerde atmosferin operasyonel modellerinin sıcaklık profili kontrolleri için oldukça iyi kaynaklar sa lanabilir. Böylelikle sıcaklık da ılımının yerel algılanması su buharı da ılımını GPS tomografisini desteklemek zorunda kalmayacaktır. Bunun sonucu olarak da a ların geometrisi, kullanıcının ihtiyaçlarına göre olacaktır. Büyük olasılıkla a a 1 troposferin dı dü eyi ile kar ıla tırıldı nda, alanı daha küçük olan alt a ları içerecektir.

Su buharı tomografisi için tasarlanan meteorolojik a lar, bölgesel GPS a larından daha küçük ve yo un olmalarına ra men dı kaynaklardan edinilen verileri bir araya getirme konusunda büyük öneme sahiptirler. GPS veri i lemcilerinin ço u uydu etkilerini ve parametre tahminlerindeki alıcı saat hatalarını ortadan kaldırmak için çift farklar tablosu kullanmaktadır. Böylelikle GPS verileri troposferik de i ikliklere daha duyarlı hale gelir.

Ba ıl gecikme iki istasyon arasındaki diferansiyel troposferik gecikme olarak kabul edilirken, bir istasyondaki troposferik gecikme mutlak gecikme olarak kabul edilir. Mutlak troposferik gecikme geni bir ekilde ayrılan istasyonlarda (> 100 km) tahmin edilebilir çünkü farklı uyduların yükseli açıları birbirlerinden farklıdır. Birbirlerine yakın olan istasyonlar ba ıl gecikmeleri yenilemek açısından daha iyi durumdadırlar. Ayrıca troposferik parametreler bu istasyonlara uygundur. Bu tekni in veri toplama ve i leme süreçleri ko ullarının gerekli olmasına kar ın potansiyel yararları da çok önemlidir. Rüzgarın yapısı ve de erlendirilmesi, orta ölçekli siklon ve kasırgaların çok güçlü bir ekilde gizli ısısının ortaya yayılmasından etkilenmektedir ve bu yüzden su buharı da ılımına oldukça duyarlıdırlar. Üç boyutlu su buharı da ılımını belirlenme olasılı ı geli en bu rüzgar sistemleri ile ya ı yapısının de erlendirilmesi belgelemek için orta ölçekli GPS tomografisi önemli veri kaynakları sa layabilir.

## 4.2 Troposferik Gecikmeler ve GPS

Troposferin sebep oldu u gecikme, sinyalin frekansına ba lı olarak saçıcı olmamasından dolayı elimine edilemez. yonosfer göz önüne alındı nda iki farklı frekanstan alınan ölçümlerle birinci dereceden etkisini telafi etmek mümkündür. Troposferik gecikme ıslak ve kuru bile en olmak üzere ikiye ayrılır. Zenit yönündeki kuru bile en “ZHD” olarak adlandırılmaktadır. Zenit kuru gecikme (ZHD) deniz seviyesinden yakla ık olarak 2.3 m büyüklü e sahiptir. ZHD, yüzey basınç ölçümleri tarafından belirlenirler Verilen yüzey basınç ölçümleri ile ZHD’ yi 1mm’ den 0.3 milibara kadar daha iyi bir ekilde tahmin etmek mümkündür.

Fakat atmosferdeki düzensiz su buharı da ılımlı sebebiyle ZWD yüzey ölçümleri ile belirlenemez. ZHD miktarı 2.3 m iken ZWD sadece 0.15 m' dir. Islak gecikme için yapılan ek tahminler rutin analizlerle artırılabilir. ZHD parametreleri ölçümlenen GPS atmosferik gecikmelerinden tahmin edildiğinde, ZHD' yi, ZHD' nin yüzey basınç okumalarından edinildiği ZND' den çıkartarak ZWD' yi tahmin etmek mümkündür. Bu ifade

$$ZTD - ZHD = ZWD \quad (4.1)$$

eklinde dir.

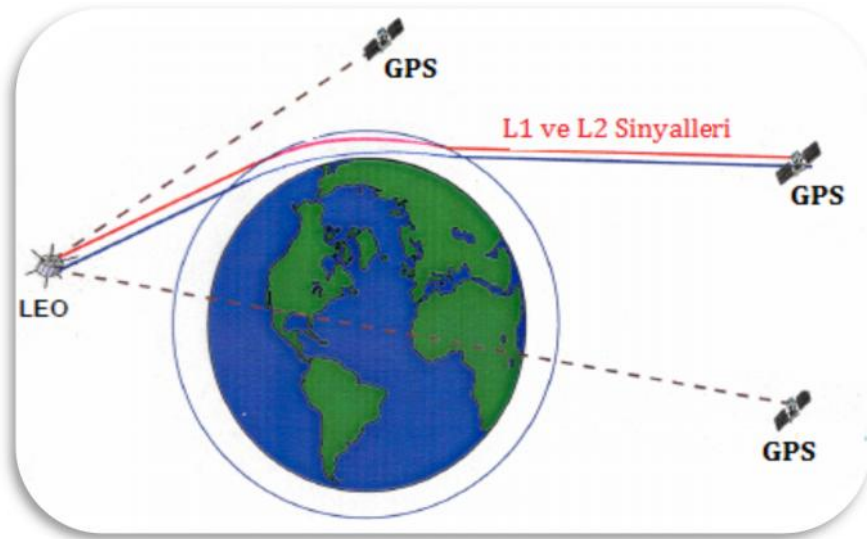
Ayrıca bu ifadeden yola çıkılarak zenit ıslak gecikme (ZWD), ya da dönüşümlü su buharı (PWV) tahminine ya da sayısal hava modeli ya da istatistik - analitik düzey sıcaklık da ılımlı modeli kullanılarak dönüşümlü yapılabilir.

## 5. RADYO OKÜLTASYON YÖNTEMİYLE GPS/MET VERİLERİNİN ELDE EDİLMESİ

Radyo okültasyon tekniği Mars, Venüs ve çok sayıda diğer gezegenin ve o gezegenlerin uydularının atmosferi hakkında çalışmak için geliştirilmiş ve düzenlenmiş olan bir sistemdir. [Fjeldbo ve Eshelman, 1968; Lindal ve diğeri, 1981].

GPS sinyallerinin seviye ölçümleri, yeryüzü atmosferi tarafından engellendiği için atmosferik kırılma indeksi sondajı sağlanabilirdiğinde küresel atmosfer sıcaklık, nem ve iyonosferin yapısı hakkında bilgi elde edilir [Gurvich ve Krasilnikova, 1990; Chiu ve diğeri, 1991].

775 km' de yer alan alçak Dünya yörüngesindeki bir GPS alıcısı (LEO) bir günde yaklaşık 600 GPS okültasyonu gözlemleyebilir. Tipik bir GPS okültasyon ölçümü yaklaşık 200 km yatay yolda 1 km' lik dikey çözünürlüğü etkili bir biçimde örnekler.

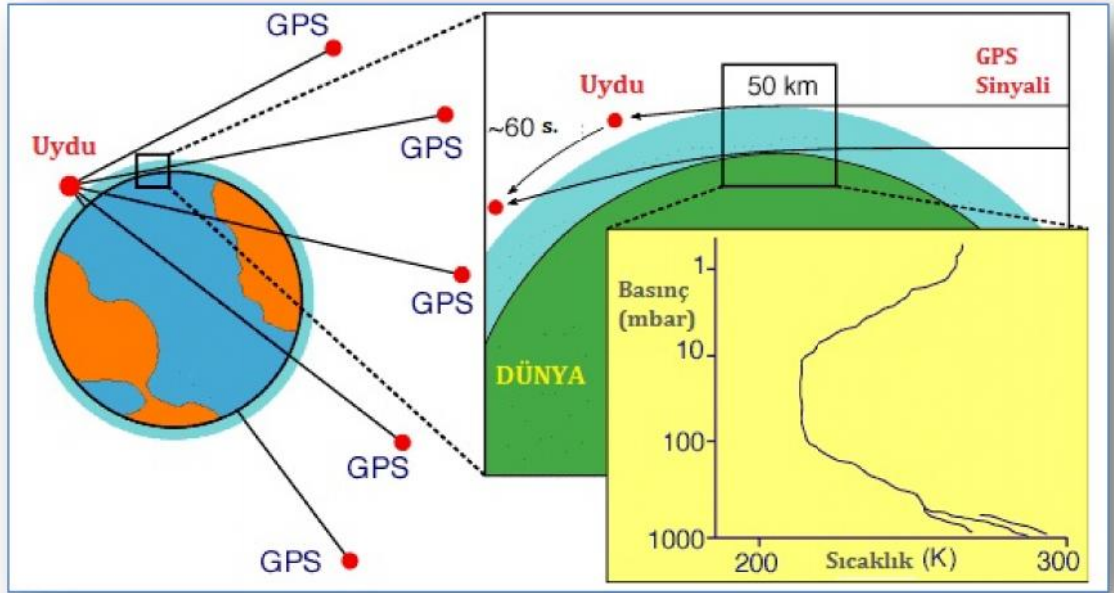


Resim (5.1) : Okültasyon tekniğininematik gösterimi [UCAR].

Troposferik nemin olduğu yerde sıcaklık GPS okültasyonu ile ölçülebilir. Soğuk ve kuru hava koşullarında ise 1 km' nin altında sıcaklık sondajı yüksekliği elde edilir. Tropik bölgelerde iklimsel modeller sıcaklık dağılımını nemden daha güvenilir bir biçimde ifade eder [Bevis, 1992].

GPS okültasyon tekniğinin potansiyelini ortaya çıkarmak için klimatoloji, iyonosferik koşullar, sıcaklık, nem, bulut sıvı suyu ve yağmuru da içeren iki boyutlu modellerle simülasyon uygulanabilir. Ayrıca uygun GPS alıcı donanımı, yazılımı ve antenleri belirlenmeli, geliştirilmeli ve yörüngede test edilmelidir. GPS okültasyon ölçümleri hava, klimatoloji ve küresel değişimler konusunda oldukça değerli veriler sunmaktadır (Bevis, 1992).

Radyo sinyalleri atmosfer boyunca geçerken, faz evreleri karıştırılabilir. Fazın pertürbe olması atmosferik yoğunluk, basınç, ısı, nem, yer çekim potansiyel yükseklik ve rüzgârlar gibi atmosferik kırılmayı ortaya çıkarır. Bu genel teknik atmosferik radyo okültasyonu olarak bilinir.



Şekil (5.2): GPS okültasyon kavramınınematik diyagramı [UCAR].

Alçak Dünya yörüngesindeki (LEO) uydu sinyalleri yaklaşık 20.000 km yükseklikteki GPS uydularından alır. Geni letimli görüme göre 1960'lı yıllardan bu yana GPS uydu okültasyonunda GPS uydularından LEO uydusuna ilerleyen sinyaller atmosfer tarafından kırılmaya uğradığı yönündedir [Yunck, 2002].

Radyo okültasyonları gezegenleri ve ayı güne sistemi boyunca sondalarken yeryüzüne iki nedenden dolayı herhangi bir i lemsel uygulamada bulunulmamı tır. Birincisi, gözlem radyo kayna ı ve atmosfer dı ndan uygun gezegen alıcısı gerektirmektedir. kincisi, bu tür ölçümler sürekli ve kapsamlı olmalıdır. Bu yüzden her birkaç dakikada birçok iletime ve alıcıya ihtiyaç vardır. 1980' li yılların sonlarında Jet tki Laboratuvarı (JPL) grubu uzaydaki atmosferik sondaj yapmak için GPS sinyallerini gözleyen bir teknik ileri sürmü tür.

Buradan atmosferin yo unlu unun, basıncının ve sıcaklık profillerinin yüksek do rulukla düzeltilebilece i çıkmaktadır. Troposferin a a ı kısmında su buharı içeri indeki belirsizlik, ölçülen sıcaklıkta büyük bir hataya sebep olur. Bu bölgede hava modellemesindeki en önemli sonuç su buharı oldu undan su buharı profillerini yenilemek yerine ana sıcaklık oranları kabul etmek avantajlı olur [Yunck, 2002].

1990' lı yıllarının ba larında Atmosferik Ara tırmalar için Üniversite birli i (UCAR) tarafından olu turulan bir grup GPS / MET olarak adlandırılan dü ük maliyetli bir deney için Ulusal Bilim Vakfı' ndan sponsorluk elde etmi tir. UCAR ve JPL dü ük maliyetli jeodezik yer alıcısını okültasyon verileri elde etmek için kullanmaya ba lamı lardır (Bkz: ekil (5.2)). Bu gibi farklı tekniklerin kullanımı GPS tekni ine oldukça yarar sa lamaktadır [Yunck, 2002].

## **5.1 Nötr Atmosferdeki GPS/MET Verilerinin Analizi ve Geçerlili i**

Radyo okültasyonu gezegen atmosfer yapısı sondajı için kullanılan bir tekniktir. Tekni in kullanımı Jet Propulsion Laboratory (JPL) tarafından ve yakla ık olarak 30 yıl önce Stanford Üniversitesinde ba latılmı tır [Fjeldbo ve di ., 1968]. Küresel konumlama sistemi / Meteoroloji (GPS / MET) deneyi, GPS uydularının radyo okültasyon sistemlerini stratosferde, alçak ve yüksek troposferde kırınım, yo unluk, basınç ve su buharı basıncı, iyonosferdeki elektron yo unlu u dü ey profilini elde etmek için kullanılmaktadır. GPS / MET cihazları yeryüzünü uydu boyunca 100 dakikalık bir sürede yakla ık 730 km' lik yükseklikte yörüngeye sokarlar. Okültasyonlar yeryüzü ufkunun altında 24 GPS uydusuna yakın olarak günde iki kere yakla ık 20.200 km yükseklikte ve sürekli olarak 1.6 GHz (L1) ve 1.2 GHz (L2) yayın sinyalleri ile yörüngeyi izlerler. Her gün yakla ık olarak 250 okültasyon meydana gelir. Ancak zemin izleme a larındaki bo luklar ve uydudaki hafıza sınırlamaları sebebiyle GPS/MET cihazı günde en uygun ko ullar altında yalnızca 150 kadar sondaj verisi toplar.

GPS/MET cihazları bir GPS uydusunu takip ederken atmosferden etkilendi i için GPS sinyalinin yava laması ve kırılması sebebiyle cihaza ula ma zamanı ertelenir. GPS / MET cihazı GPS' teki ta ıyııcı faz de i imini saniyede 50 defa kaydeder.

Nominal ta ıma frekansını ortadan kaldırdıktan sonra buradaki a amalar üç sebepten ötürü de i ir:

1. LEO ve GPS uydularının izafi (ba ılı) hareketi
2. GPS alıcı ve ileticilerindeki saatlerin belirsizli i
3. Kırılma ve ilerleme hızının iyonosferde ve nötr atmosferde de i mesi.

Örnekleme oranı onlarca metreye kar ılıklı gelmesine ra men cihazın son dü ey çözümlü sistem gürültü ölçümü, kırılma ve yatay atmosferik ayrı ıklık gibi birkaç faktörle sınırlandırılmaktadır. Son iki faktör daha dominant olup dü ey çözünürlük stratosferde 1.5 km' den a a ı troposferde 0.1-0.5 km' ye kadar sınırlandırmaktadır [Melbourne ve di ., 1994]. Yatay çözünürlük GPS ı nın yolu boyunca yakla ık olarak 300 km' dir ve yola yakla ık 1.5 km dik durumdadır. GPS radyo okültasyon sisteminin tahmin edilen maksimum hassasiyeti 1°C ya da 5km' den 40 km' ye kadar daha iyi bir mesafe yüksekli indedir [Melbourne, 1994; Gorbunov and Sokolovskiy, 1997]. Daha önceki çalı malar göstermi tir ki GPS / MET bu tahmin kadar i lemektedir. 11 temsili sıcaklık profilinin kıyaslanması Ware tarafından sıcaklık analizleri ile GPS / MET verilerinden türemi tir (2001). Kursinski 10 GPS/MET sıcaklık profili hakkında su buharı etkilerinin en az oldu u yerde 10 ile 25 km arasında küresel analizler ile istatistiksel bir kıyaslama sunmu tur (2001).

GPS / MET küresel kaplama sistemi tüm hava ko ulları için kullanı lıdır ve bulutlardan, ya ılılardan ve aerosollerden etkilenmezler. Sistem iyonosferik elektron yo unlu unu içeren yukarı iyonosfer ile a a ı iyonosfer yörünge yüksekli inde kesintisiz kırınım sondaj kapasitesine sahiptir [Anthes, 1997]. Sistem radyosond cihazlarına ba ılı de ildir ve cihazlarda açıklaması yapılan analizlerin ötesinde ölçümlene gerektirmemektedir. Böylelikle uzun vadeli kararlılık sa lamak iklim de i kenleri çalı ması açısından önemlidir. lemsel ve ara tırma kullanımı için olan radyo okültasyon yöntemini geli tirmek için deneysel GPS/MET verileri ba ımsız kaynaklardan gelen bilgilerle dikkatlice mukayese edilmelidir.

## 5.2 GPS / MET' in D ey ve Yatay  oz n rl   

Kullanılan GPS / MET cihazının d ey  oz n rl    1 ın yolu boyunca difraksiyon (kırılma) ve heterojenlik tarafından sınırlandırılır [Melbourn ve di ., 1994]. Yatay atmosferik heterojenlik yüzünden bu artı ın seviyesini nitelendirmek oldukça zordur. Lokal küresel simetri yakla ımına dayanan bu teknik, küçük yatay skalalar yüzünden heterojenlikleri  ozmetmekte yetersizdir. Aslında bu homojen olmayan yatay ve d ey kırılma skalaları karma ık fonksiyonlara ba lıdırlar. [Gorbunov ve Sokolovskiy, 1997]. Genellikle karakteristik yatay  oz n rl   n 300 km oldu u d  ünülmektedir ve lokal heterojenli ın çapı ne kadar küçükse, yatay yapısı o kadar iyi bir şekilde  oz l r [Kuo ve di ., 1997]. GPS/MET sondajları atmosferik cephenin daha üst seviyelerinin sıcaklık yapısını  ozebilece ini göstermektedir. Ancak operasyonel kullanımda dört boyutlu veri asimilasyon tekni i bükülen a ıların direkt asimilasyonu ile kullanılabilir [Eyre, 1994]. Bu da GPS / MET gözlemlerinin ve hata kovaryans matrisinin daha kesin ve etkili kullanımına olanak tanımaktadır.

Radyo okültasyon verilerinin asimilasyonu için çok sayıda strateji 1994 yılında Eyre ve 2001 yılında ise Kuo ve arkada ları tarafından geli tirilmi tir. Böylelikle bükülme açılarını, kırılmayı ya da ortaya çıkan sıcaklık ve su buharı profillerinin de asimile edilmesi mümkündür. Eyre (1994) ve di er arkada ları en kesin sonucun kırılma, sıcaklık ve su buharından ziyade bükülme açılarının asimilasyonundan elde edilebilece ini  ne sürme lerdir. Bükülme açılarının asimilasyonu, 1 ın izleme modelinin kullanımıyla olu turulan model analizlerinin tahmin alanlarındaki bükülme açılarını hesaplayan Abel inverziyonunu gerektirmektedir. Abel inverziyon metodu kullanarak atmosferik kırılmanın d ey profili “N” elde edilebilir (Fjeldbo ve di ., 1968; Kursinski ve di ., 2001).

GPS radyo okültasyon tekni i ile basınç, sıcaklık ve nem verileri a amalı olarak elde edilmektedir.

Bu a amalar;

- » “Doppler Frakans Kayması”  l m ,
- » E ilme (bükülme) açısının hesaplanması,
- » Kırılmanın hesaplanması,
- » deal gaz denklemi ve durum denkleminin kullanılması.

olarak sıralanabilir [JPL - NASA].

Doppler etkisi, dalga özelli i gösteren herhangi bir fiziksel varlı ın frekans ve dalga boyunun hareketli bir gözlemci tarafından farklı zaman ve/veya konumlarda farklı algılanması olayıdır. Herhangi bir konumdan di er bir konuma gitmek için fiziksel bir dalga ortamına ihtiyaç duymayan dalgalar (radyo dalgaları, radyasyon, vb.), Doppler kayması hesaplamalarında sadece dalga kayna ının ve gözlemcinin birbirine göre birim zamandaki konumlarının de erlendirilmesi yeterlidir (Houghton, 2000).

GPS uyduları tarafından gönderilen elektromanyetik dalgalar atmosferden geçerken bükülmeye uğurlar. L1 ve L2 bantları farklı dalga boylarına sahip olduklarından farklı oranda bükülmeye uğurlar.

Atmosferden bükülerek gelen sinyalin Doppler frekans kayması sinyalin dalga boyuna, uydu hızına ve LEO uydusunun GPS uydusundan aldığı sinyalin jeodezik yolu ile atmosferden bükülerek geçtiği eğimli yol ile yapılmıştır. Bükülme açısı ise GPS uyduları tarafından gönderilen sinyalin ve LEO uydusunun GPS uydusundan aldığı sinyalin jeodezik yolu ile atmosferden bükülerek geçtiği eğimli yol ile yaptıkları açılarının toplamına eşittir. Bükülme açıları verilerinin asimile edilmesiyle 'N' kırılma profili elde edilebilir (S. Sokolovskiy ve Rocken, 2001).

### 5.3 GPS / MET Kırılma İndeksinden Su Buharı Profillerinin Hesaplanması

Atmosferik kırılma ( $N$ ), basınç ( $P$  (mbar)), sıcaklık ( $T$  (K)) ve su buharı basıncına ( $e$  (mbar)) bağlı olarak görülmüştür [Thayer, 1974].

$$N = 77.6 \times \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \times \frac{e}{T^2} \quad (5.1)$$

Daha önceki bilgiler kırınım profillerinin su dengesine ve 0°C' deki su buharı basıncında basınç ve sıcaklık profillerine nasıl dönüştürüleceğini göstermektedir. Bu dönüşüm, mevsime ve enleme bağlı olarak 5 ile 10 km arasında troposferin nemli katmanları üzerindeki hassas sıcaklık ve basınç profillerini açıklamaktadır.

Denklem (5.1)'i kullanarak GPS / MET kırılma değerleri elde edilebilir, hidrostatik denklemi de kullanarak sıcaklık ve basıncı hesaplamak mümkün olur. Çünkü sıcaklık, su buharı, basınç, hidrostatik denklemi ile ilişkilidir. Ayrıca basınç ve sıcaklık verileri birbirinden bağımsız bir şekilde biliniyorsa nemli hava ve su buharı basınç denklemi kırılma değerlerinden türeyebilir.

Sıcaklık ve basınç değerlerinin hesaplanmasına yönelik kullanılan yasalar bölüm (7.2.1)'de ideal gaz ve durum denklemi başlıca altında ayrıntılı olarak verilmiştir.

## 6. ATMOSFERE GİRİŞ

### 6.1 Atmosfer

Atmosfer, hidrostatik gecikmeye neden olan kuru gazların ve aynı zamanda ıslak gecikmeye neden olan su buharının karışımıdır [Spilker, 1980].

Tablo 6.1: Kuru havayı oluşturan ana bileşenler.

Bu ana bileşenlerin hiçbiri sabit dipol moment olmadığı için, bu karakteristik özelliğinin su moleküllerinin yapısına bağlı olduğunu gösterilmektedir [Davis ve diğeri, 1985].

Bileşenler	Molar Ağırlık [kg/mol]	Kısmi Hacim [-]
N <sub>2</sub>	28.0134	0.78084
O <sub>2</sub>	31.9988	0.209476
Ar	39.948	0.0934
CO <sub>2</sub>	44.00995	0.000314
Ne	20.183	0.00001818
He	4.0026	0.00000524
Kr	83.30	0.00000114
Xe	131.30	0.000000087

Atmosfer üzerine yapılan çalışmalarında kuru havanın modellenmesinde karışıklık olmadığı için, ancak ıslak kısmının homojen olmayan dağılımından dolayı modellemede karışıklıklar olduğu belirtilmiştir [Mockler, 1995].

Troposfer, deniz seviyesinden ( $\approx 0$  m) yukarı doğru 12 km'dir. Tropopoz 12 km ve 16 km arasında yer alan küçük bir sınır alanıdır ve burada sıcaklık  $-60^{\circ}\text{C}$  ile  $-80^{\circ}\text{C}$  arasındadır. 16 km ile 50 km arasında yer alan Stratosferde hava sıcaklığında yavaş bir artış meydana gelir. Su buharı, içeriğinin mevcut su buharı olmadan büyük bir kısmı 4 km altında ve 12 km'nin üzerinde yüksekliğe odaklanmıştır. Toplam gecikmenin ise bir çeyreğinin stratosferdeki gazlar yüzünden olduğunu bahsedilmiştir [Spilker, 1980].

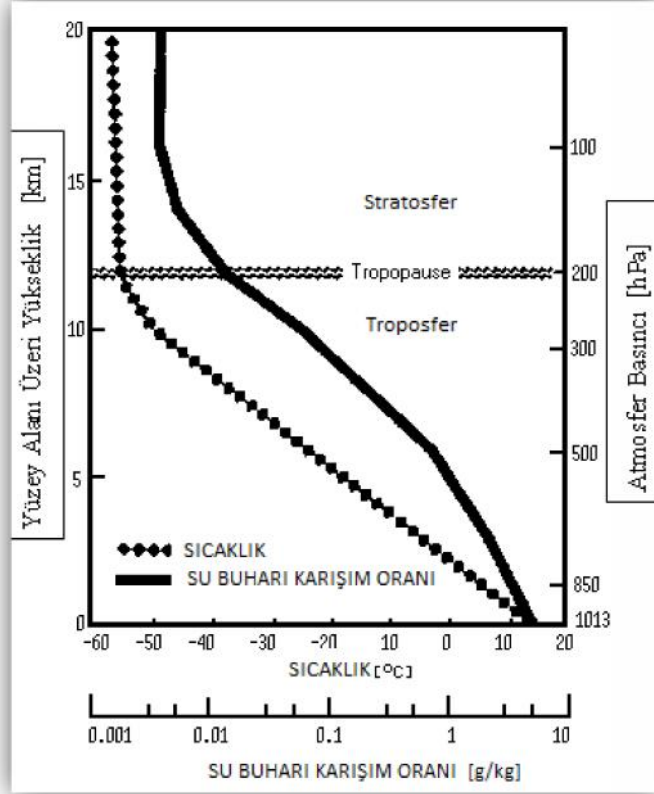
#### 6.1.1 Basınç

Standart atmosfer modellerinde deniz seviyesinde ortalama basınç değeri 1013 hPa olarak kullanılmaktadır. Tropopoz yüksekliğine, basınç kutuplarda 300 hPa, ekvatorunda 70 hPa civarında ve stratopoz yüksekliğinde yaklaşık 1 hPa olarak belirtilen bir değere sahip olduğu da görülebilir.



### 6.1.2 Sıcaklık

Sıcaklık tropopoz' a kadar lineer bir dü ğ gösterir ancak, bu do rusal e ilim enverziyon katmanlarından dolayı yüzeyin ilk birkaç yüz metre üzerinde önemli ölçüde bozulmu olabilir. Sıcaklık dü ğ me oranı tropopoz yüksekli inin altında -5 ila -7 K/km' dir. Tropopozda, tahminen sıcaklık sabit kalır ve stratosferde yava artar.



ekil (6.1) : Troposfer, Stratosfer Katmanlarının ve Tropopoz' un eması.

Sıcaklık ve su buharı karı ım oranı ortalama basınç ve sıcaklı ının logaritmik ölçekle yatay da ılımı gösterilmektedir [Mockler, 1995].

### 6.1.3 Su Buharı

Atmosfer çalı maları sonucu elde edilen diyagramlardan troposferdeki su buharının yatay da ılımı ve aynı zamanda dikey da ılımının da homojen olmadığı görülmü tür. Bunun nedeni yükseklik ve konum ile sıcaklıktaki de ğ im kadar havadaki suyun da hızlı azalmasıdır [ S. Mockler, 1995].

Dikkate de er de ğ imlerin olmasına ra men, ekil (6.1) belli ba ılı e ilimleri i aret eder. Su buharı yüksekli i atmosfer so udu u zaman ile birlikte hızla dü er. Havadaki toplam su buharının hemen hemen yarısı deniz seviyesi ve deniz seviyesiyle yakla ık 1.5 km yükseklikte bir alanda yer alır. Su buharı miktarının % 5-6' sından daha azı deniz seviyesinin 5 km üzerinde bulunur fakat % 1' den azı stratosferde yer alır.

## 6.2 Atmosferik Gecikme Etkisi

Atmosferde GPS ile yapılan ölçümlerde elde edilen sonuçları da i tiren birçok etken vardır. Bu etkilerin bir kısmı ba ıl konum belirleme yöntemlerinin kullanılması durumunda bile bozucu etkilerini sürdürmektedir. Bu etkiler GPS' in navigasyon ve askeri amaçlı uygulamalar gibi birçok kullanım alanı için önemli bir sakınca olu turmamakla birlikte özellikle noktasal konum belirleme, yerkabu u hareketlerinin belirlenmesi, meteorolojik çalı malar gibi bilimsel amaçlı çalı malarda bu etkilerin davranı ı ve büyüklü ü göz önüne alınarak model çalı ması yapılmalıdır. Bu bozucu etkilerden meteorolojik çalı malarda önemi olanlar iyonosfer ve troposfer etkileridir.

### 6.2.1 İyonosfer Etkisi

İyonosfer, havadaki moleküllerin ileri derecede yo unla mı halde bulundu u ve elektrik iletkenli i kazandı ı yukarı atmosfer bölgesidir. İyonosferde atomlardan kopmu serbest elektronların sayısı, elektromanyetik dalgaların yayılmasını de i tirmeye yetecek kadar fazla sayıdadır.

İyonlaşma iddeti, elektron yo unlu u ile ifade edilmekte olup çok de i ken olan bu yo unluk birim  $\text{cm}^3$  ba ına  $10^5$  ile milyonlarca serbest elektron arasında de i mektedir. İyonosfer genel olarak, elektromanyetik dalgaların yayılmasını etkileyebilecek kadar serbest elektron yo unlu una sahip yukarı atmosfer tabakası (~70 ila 3000 km arasında) olarak tanımlanabilir.

İyonosferin elektromanyetik dalgaların yayılmasındaki etkisi Toplam Elektron ıeri i (TEC; Total Electron Content) ile ifade edilmektedir. TEC, uydu ve alıcı arasındaki sinyal yolu boyunca  $\text{m}^2$  ba ına toplam elektron sayısı olarak da ifade edilebilir.

İyonlaşma ve serbest elektron yo unlu u do rudan Güne ' ten gelen radyasyon miktarına ba ıdır. Buradan, iyonosferin elektromanyetik dalgalar üzerindeki etkisinin geceye göre gündüz daha fazla olaca ı sonucuna varılabilir. Bunların dı nda gözlenen uydunun yükseklik açısının da iyonosferik etkinin büyüklü ü üzerinde etkisi vardır. Yani dü ük yükseklik açılarında iyonosferik etki gündüz ve gece için verilen de erlerin yakla ık üç katı kadardır (Spilker, 1980).

İyonosferin GPS ile yapılan kod ve faz ölçülerine olan etkileri farklıdır. Kod ölçüleri için iyonosferik grup gecikme etkisi söz konusu iken faz ölçüleri için faz hızlanması söz konusudur. İyonosfer, radyo dalgalarını da ıtıcı bir özelli e sahip olup, bu bozucu etki radyo dalgalarının frekansına ba ılı olarak de i im gösterir. Ölçülen uydu alıcı uzunlu unda iyonosferden dolayı bir azalma ya da fazlalık söz konusudur.

### 6.2.2 Troposfer Etkisi

GPS uydularından yayınlanan sinyaller atmosfere girmeden önce uzaydaki bo lukta ilerlerler. Bu sinyaller atmosfere girdi inde içinden geçtikleri ilk tabaka iyonosfer olur. GPS sinyallerinin iyonosferdeki ilerleme hızı, sinyal frekansına ba ıdır. Dolayısıyla, iyonosfer tabakasının GPS sinyallerine olan etkileri çift-frekanslı ölçülerle büyük oranda giderilebilmektedir. İyonosferden geçen sinyaller, sırasıyla mezosfer, stratosfer ve troposfer tabakalarından ilerlerler.

Troposfer, havanın yeryüzü ile temas halinde olan en alt tabakasıdır. Kalınlı ı kutuplarda yakla ık 8 km, ekvator da ise yakla ık 18 km' dir. Meteorolojik olaylar genel olarak troposferin 3-4 km' lik alt kısımlarında görülmektedir [Kahveci ve Yıldız, 2005].

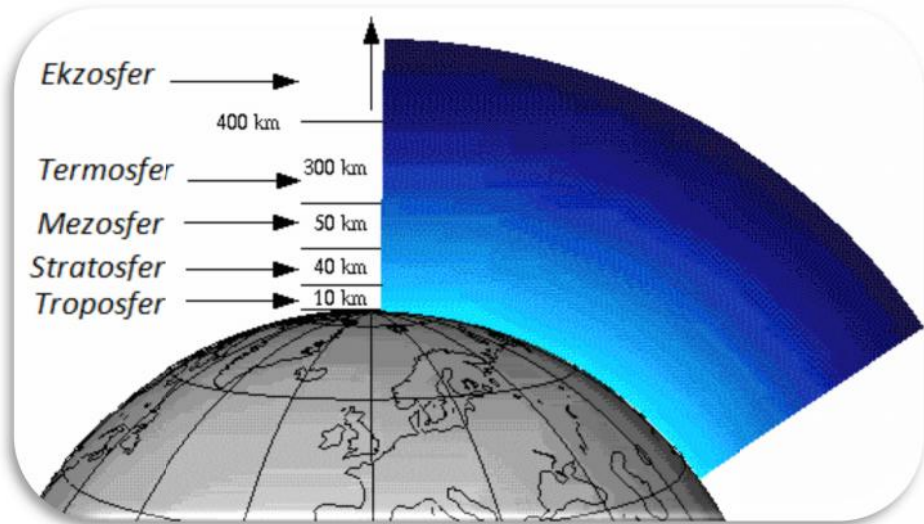
yonosfer tabakasının tam tersine troposfer tabakası elektrik yüklü olmadığından, yaklaşık 30 GHz' in altındaki radyo frekansları için dağınık özelliğe sahiptir.

Bu nedenle, troposfer tabakasında GPS sinyallerinin yayılması frekansa bağlı değildir. Dolayısıyla, troposferin faz ve kod ölçülerine olan etkisi aynı büyüklüktedir. Bu nedenle, GPS alıcılarının çift frekanslı olma özelliğinden yararlanarak bu etkiyi gidermek mümkündür.

## 7. ATMOSFER FİZİKİ

### 7.1 Atmosfer Tabakaları

Atmosfer çeşitli tabakalara ayrılabilir. Bu tabakaların tanımlanması ayrılmaların amacına bağlıdır. En bilinen ayırt edici özellik ise sıcaklık, iyonizasyon ve yayımdır [Seeber, 1993]. Atmosferin tanımlanmasında radyo dalgaları, troposfer ve iyonosferin ayrılmasına yol açar. İyonosferde sinyalin yayılma gecikmesi frekansa bağımlı olarak seçicidir ancak troposfer sinyal üzerinden seçici olmayan bir ortamdır.



Şekil (7.1): Atmosfer tabakaları [Williams, 2008].

Troposfer ayrıca sıcaklık profilinin tanımlanması esas alınarak yapılan özgün tanımı ile farklı göstermek için nötr/tarafsız atmosfer olarak adlandırılır. Troposferden bahsedildiğinde bunun nötr atmosfer olduğu veya yükseklikle sıcaklığın azaldığı katman olduğu belirtilmektedir (Seeber, 1993).

Genel olarak, troposferdeki sıcaklık neredeyse yükseklik ile doğrusal olarak azalır. Troposferin en üstünde ortalama deniz seviyesinin yaklaşık 9-16 km üzerinde sıcaklık sabit kalır. Nötr atmosferin bu bölümü tropopoz olarak adlandırılır. Tropopoz' un üzerinde, stratosferde sıcaklık 50 km yüksekliğe kadar yeniden artar. Deniz seviyesinin üstünde 50-80 km arasında, mezozferde sıcaklık yeniden düşer (Ramirez, 2007).

## 7.2 Atmosfer için Fiziksel Yasalar

### 7.2.1 İdeal Gaz ve Durum Denklemi

İdeal gaz, moleküller arası etkileşimlerin olmadığı gazdır. Bu etkileşimlerin ihmal edilebilmesi iki türlü sağlanabilir [Champion, 1960] :

- » Moleküller arası ortalama uzaklığın büyük olması durumunda etkileşime daha az olur. Bu durumda gazın yoğunluğu düşük yani basıncı büyük olmalıdır.
- » Moleküllerin ortalama kinetik enerjileri büyükse, moleküller arası etkileşime enerjileri ihmal edilebilir. Bunun anlamı, gaz sıcaklığının büyük olmasıdır.

Bu durumda alçak basınç ve yüksek sıcaklıkta tüm gazların ideal gaza yaklaştığı söylenebilir. Bu yaklaşıklıkta tüm gerçek gazlar ideal gaz durum denklemine uyarlar:

$$PV = nRT \quad (7.1)$$

Mol sayısının ( $n$ ), kütle ( $m$ ) molar kütle ( $M$ ) oranına eşittir:

$$n = \frac{m}{M} \quad (7.2)$$

Denklem (7.2), (7.1)'de yerine konulursa:

$$PV = \frac{m}{M}RT \quad (7.3)$$

elde edilir.

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow V = \frac{m}{\rho} \quad (7.4)$$

Denklem (7.4), (7.3)'te yerine konulursa:

$$P = \rho \frac{R}{M_i} T \quad (7.5)$$

elde edilir.

Özgül gaz sabiti ( $R_i$ ) ile Evrensel gaz sabiti ilişkisi ( $R$ ),

$$R_i = \frac{R}{M_i} \quad (7.6)$$

Durum denklemi tek bir gazı değil birden fazla gaz karışımını içerir. Bu durumda,  $P$  kısmi basınçların toplamı,  $R_i$  karışımındaki özgül gaz sabiti ve  $M_i$  karışımın moleküler kütle ortalamasıdır.

$M_i$ : Ortalama moleküler kütle [ $kg\ mol^{-1}$ ];

$R$ : Evrensel gaz sabiti [ $8.31434\ J\ mol^{-1}\ K^{-1}$ ] olarak verilmiştir.

Denklem (7.6), (7.5)' te yerine konulursa:

$$P = \rho R_i T \quad (7.7)$$

elde edilir.

Genel olarak bir gaz ısındığında hem hacim hem de basınç artar. Oysa kapalı sistemde hacim veya basınç sabit tutulabilir. Buna göre gazlar için üç yasa düzenlenmiştir [Champion, 1960].

1. Charles'ın Sabit Basınç Yasası: "Sabit basınçtaki gazın hacmi mutlak sıcaklık ile doğru orantılıdır".
2. Charles'ın Sabit Hacim Yasası: "Sabit hacimdeki gazın basıncının değeri mutlak sıcaklık ile doğru orantılıdır".
3. Boyle Yasası: "Sabit sıcaklıkta basınç ve hacmin çarpımı sabittir".

Özgül hacim ise şu şekilde tanımlanmıştır:

$$\alpha = \frac{1}{\rho} = \frac{V}{m} \quad (7.8)$$

$\rho$ : Yoğunluk [ $kg\ m^{-3}$ ];

$V$ : Hacim [ $m^3$ ];

$m$ : Kütle [ $kg$ ].

Bu yasalara göre, gaz denklemi veya durum denklemi eksiksiz durum gazlarından meydana gelir. Denklem (7.8), (7.7)' de yerine konulursa:

$$\alpha P = R_i T \quad (7.9)$$

ifadesiyle durum denklemi elde edilir.

Burada,

$\alpha$ : Özgül hacim [ $m^3 \cdot kg^{-1}$ ]

P: Basınç [ $N \cdot m^{-2}$ ]

[N]: [ $kg\ m\ s^{-2}$ ]

$R_i$ : Özgül gaz sabiti [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

[J]: [ $N\ m$ ]

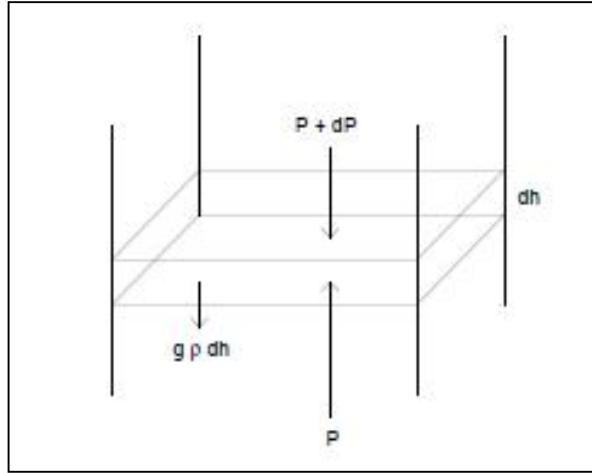
T: Sıcaklık [K] eklindedir.

### 7.2.2 Hidrostatik Denge

Hava sütununun herhangi bir kesiti üzerindeki düey net kuvvet sıfıra e it olursa atmosferin hidrostatik dengede oldu u belirtilmektedir [Haltiner ve Martin, 1957].

Birim alana sahip bir kesit ölçümü, düey kuvvetler basıncı (alan baına kuvvet) olarak ifade edilebilir. Aşağı yönde olan kuvvet, kesit üzerindeki kuvvet ( $P+dP$ ) ve yerçekimi kuvvetinin ( $g\rho dh$ ) toplamına e ittir. Kesite alttan etki eden yukarı yönde kuvvet, basınca ( $P$ ) esittir. Böylelik hidrostatik denge aşağıdaki gibi yazılır:

$$g\rho dh + (P + dP) = P \quad (7.10)$$



ekil (7.2): Hidrostatik dengede  $dh$  kalınlıklı birim kesite uygulanan düey yönde kuvvet [Haltiner ve Martin, 1957].

Denklem (7.10) tekrar düzenlenirse;

$$dP = -g\rho dh \text{ ya da } \frac{dP}{dh} = -g\rho \quad (7.11)$$

eşitliği elde edilir.

$g$ : Yerçekim ivmesi [ $m s^{-2}$ ],

$h$ : Yükseklik [ $m$ ].

Denklem (7.8) a a ıdaki denklem ekinde de ifade edilebilir.

$$gdh = -\alpha dP \quad (7.12)$$

### 7.3 Su Buharı

Atmosferin troposfer tabakası kuru hava (gaz) ve u unlukla su buharından olu ur. Kuru havada enlem ve ykseklili in olu turdu u bile imde önemli bir de i im yoktur. Öte yandan su buharı yaygın olmakla birlikte da ınık ve zamansal olarak de i ir. Su buharının u troposferin en dü k 2 km tabakasında bulunur. Su troposferde sıvı faz (sis, bulut, ya mur) ve katı formda (kar, dolu, buz) bulunur, sadece ya mur ve kar ya ı ı de il aynı zamanda yo unla ma sürecindeki büyük miktarda enerji hava süreçlerindeki en önemli bile enlerden biridir [Haltiner ve Martin, 1957].

Bu bölümde, karı ma oranı, su buharının kısmi basıncı ve ba ıl nem gibi su buharı ile ilgili ölçüler ele alınmaktadır.

#### 7.3.1 Karı ım Oranı

Kuru hava ve su buharı karı ımı nemli hava olarak adlandırılır. Nem miktarının bir ölçüsü birim su buharı kütlesinin kuru hava kütlesine oranı olarak tanımlanan karı ım oranıdır [Haltiner and Martin, 1957]. Ve

$$\omega = \frac{m_v}{m_d} = \frac{m_v/V}{m_d/V} = \frac{\rho_v}{\rho_d} \quad (7.13)$$

,eklinde ifade edilir.

$w$  : Karı ım oranı [-];

$m_v$  : Su buharı kütlesi [kg];

$m_d$  : Kuru hava kütlesi [kg];

$V$  : Hacim [ $m^3$ ];

$\rho_v$  : Su buharı yo unlu u [ $kg m^{-3}$ ];

$\rho_d$  : Kuru hava yo unlu u [ $kg m^{-3}$ ].

Denklem (7.8) ve (7.9) kuru hava ve su buharı cinsinden tekrar düzenlenirse ;

$$e = \rho_v R_v T \quad ; \quad P_d = P - e = \rho_d R_d T \quad (7.14)$$

eşitliği elde edilir.

$e$  : Kısmi su buharı basıncı [ $N m^{-2}$ ];

$P_d$  : Kısmi kuru hava basıncı [ $N m^{-2}$ ];

$P$  : Havanın (nemli) toplam basıncı [ $N m^{-2}$ ];

$R_v$  : Su buharının özgül gaz sabiti [ $J kg^{-1} K^{-1}$ ];

$R_d$  : Kuru havanın özgül gaz sabiti [ $J kg^{-1} K^{-1}$ ].

Denklem (7.13) ve (7.14) kullanılarak;

$$\omega = \frac{e/R_v T}{(P - e)/R_d T} = \epsilon \frac{e}{P - e} \approx \epsilon \frac{e}{P} \quad (7.15)$$

eşitliği elde edilir [Mendes, 1999].

$R_d$  :  $287.06 \pm 0.01 J kg^{-1} K^{-1}$ ;

$R_v$  :  $461.525 \pm 0.003 J kg^{-1} K^{-1}$ ;

$\epsilon = \frac{R_d}{R_v} = 0.622$  olarak verilir.

### 7.3.2 Doymu Havanın Kısmi Basıncı

Havanın olmadığı kapalı bir sistemde, e miktarındaki su moleküllerinin sıvı veya katı formdan buharla tı tı zaman bir denge sağlanır. Bu şartlar altında, buhar basıncının doymu olduğu söylenir. Buhar havayla karıştı tı tı zaman denge koşulları altında hava ve su buharının karışımı doymu hava olarak bilinmektedir. Doymu hava doymamı hava ile temas halinde olduğunda, buhar basıncının daha az olduğu yerlere doğru yayılma meydana gelir.

Doymu su buharının kısmi basıncı sıcaklığın bir fonksiyonudur. Sıcak hava daha fazla miktardaki su buharını içine alabilir. Doymu havayı soğutarak yeni sıcaklıkta doymu luk dereesi üzerindeki su buharı fazlalığı yokunlaştırır.

Yoğuşma mada birim kütle enerji salınımı, erime sıcaklığı olarak adlandırılmaktadır. Buharlaştırma için de aynı miktarda enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır.



Ayrıca bir birim buz kütleini suya dönü türmek için gerekli olan enerji miktarı ile erime ve buharla manın gizli ısılarının toplamı olan süblimle me gizli ısısı söz konusudur.

Su buharının kısmi basıncı, gizli ısı ve sıcaklık arasındaki ili ki *Clausius-Clapeyron* denklemi ile verilmektedir [Haltiner ve Martin, 1957]:

$$\frac{1}{e_{sat}} \frac{de_{sat}}{dT} = \frac{L}{R_v T^2} \quad (7.16)$$

$e_{sat}$  : Doygun su buharının kısmi basıncı [ $N m^{-2}$ ];

$L$  : Erime gizli ısısı [ $0.334 \cdot 10^6 J kg^{-1}$ ] ve

Buharlaşma gizli ısısı [ $2.500 \cdot 10^6 J kg^{-1}$ ] ve

Süblimleşme gizli ısısı [ $2.834 \cdot 10^6 J kg^{-1}$ ];

$R_v$  : Su buharı özgül gaz sabiti [ $461.525 J kg^{-1}K^{-1}$ ].

Sıcaklı ın bir fonksiyonu olarak su buharının kısmi basıncını veren denklem (7.16)' nın integrasyonuyl:

$$e_{sat} = e_{sat}(0) \exp \left[ -\frac{L}{R_v} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T(0)} \right) \right] \quad (7.17)$$

denklemleri elde edilir.

Burada L terimi, buharla ma ( $T > 0^\circ C$ ) yada süblimle menin ( $T < 0^\circ C$ ) gizli ısısını ifade etmektedir.

Denkle (7.15)'deki "e" terimi yerine (Haltiner ve Martin, 1957)' e göre "e<sub>sat</sub>" terimi yazmak da mümkün olabilir:

$$w_{sat} = \epsilon \frac{e_{sat}}{P - e_{sat}} \approx \epsilon \frac{e_{sat}}{P} \quad (7.18)$$

$w_{sat}$  : Doygun karışma oranı [-].

### 7.3.3 Ba ıl Nem

Ba ıl nem, su buharı ve hava karı ımındaki su buharı miktarını tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Bu ko ullar altında, doymu buhar basıncının bir yüzdesi olarak verilen hava-su karı ımı su buharı kısmi basıncı olarak tanımlanır. Havadaki ba ıl nem yalnız mutlak nem ile ilgili de il aynı zamanda doymu buhar basıncı olan sıcaklık ve basınca da ba lıdır.

Bağıl nem, doymuş buhar basıncının dikkate alındığı suyun buharlaşmasının önemli olduğu durumlarda sıklıkla mutlak nem yerine de kullanılmaktadır. Bağıl nem çoğu kez yüzdelikle ifade edilmek için yüzle çarpılır (Langley, 1993).

$$rh = \frac{\omega}{\omega_{sat}} \approx \frac{e}{e_{sat}} \quad (7.19)$$

$rh$  : Bağıl nem [–].

#### 7.4 Yayılım Gecikmesi ve Kırılma

Toplam gecikmenin hemen hemen %90' ını zamanla değişimlik gösteren kuru bölüme atfedilebilir. Bu kuru gecikme hidrostatik dengenin varsayımıyla 1mm seviyede kentsel alanlarda döner [Mendes ve Langley, 1995]. Kuru bölümün aksine ıslak bölümün uzaysal ve zamansal değişiklikleri vardır. Islak gecikmenin uzaklığına etkileri 10 ila 40 cm' ye ulaşabilir. Deneysel ve teorik modellerin ilgili hataları %10 civarındadır.

Modellemedeki artı kalan büyük hatalar yüksek hassasiyetli GPS uygulamalarında önemli hatalara yol açabilirler. Bu değişiklik bağıl ve mutlak troposferik hatalar üretebilir. Bir dakikası bir yerin dikeyiyle ilgili troposferik düzeltmenin tahminindeki hata bağıl troposferik hatalara sebep olabilir.

Kuru troposferin zayıf modellenmesinden artan bu hataları azaltmak ya da en aza indirmek için GPS gözlemleri olmaksızın saf bağımsız veri seti kullanarak troposferik kırılmaları belirli bir formda incelemek anlamlı sonuçlar ortaya koyabilir. Diğer bir yaklaşım, mevcut GPS bilgilerini kullanarak troposferik parametrelere doğrudan karar vermektir. Daha önce tanımlandığı gibi GPS bilgileri kullanarak ZWD, ZTD' nin zenit toplam gecikmeyi temsil ettiği yerde,  $ZWD = ZTD - ZHD$  ile kısıyla hesaplanabilir. Toplam gecikme GPS bilgilerinden tahmin edilebilir.

Nötr atmosferin sebep olduğu bir radyo dalgasının toplam gecikmesi kat edilen yoldaki kırılmaya bağlıdır, kırılma da basınç ve sıcaklığa bağlıdır. Yayılımın temel fizik yasası Fermat prensibidir. Fermat prensibi; ışık ya da herhangi bir elektromanyetik dalganın iki nokta arasındaki yol süresini içeren, kaynak ve alıcı arasındaki elektromanyetik (veya optik) mesafe olarak tanımlanan temele dayanır. Işık (veya herhangi bir elektromanyetik dalga) en az yol süresini içeren iki nokta arasındaki yolu izler. Kaynak ve alıcı arasındaki elektromanyetik mesafeyi şöyle tanımlarız:

$$S = \int c dt = \int \frac{c}{v} ds = \int_s n(s) ds \quad (7.20)$$

$S$  : Elektromanyetik mesafe [m];

$s$  : Elektromanyetik yol [m];

$c$  : Işığın boşluktaki hızı [ $m s^{-1}$ ];

$v = ds/dt$  : Yayılım hızı [ $m s^{-1}$ ];

$n = c/v$  : Kırılma indeksi [-].

Genellikle 'n' kompleks sayı olarak düşünülmür. Gerçek kısım gecikme ve kırılmayla ilgiliyken, sanal kısım emilimle ilgilidir (Houghton ve diğeri, 2000). Geometrik mesafe ise;

$$L = \int_l dl, \quad (7.21)$$

$L$  : Geometrik mesafe [m];

$l$  : Geometrik yol [m] olarak tanımlanır.

Nötr atmosfer troposfer, tropopoz ve stratosferden oluşur. GPS dalgalarının troposferik gecikmesi nötr atmosferdeki dalga boyunca 'n' kırılma indeksiyle ilgilidir.

Geometrik mesafe geometrik yoldan farklıdır çünkü geometrik yol troposferde ve bir hava boşluğunda uzar. GPS sinyal gecikme zamanı Schuler, (2001) tarafından şu şekilde verilir:

$$dt = \int_s \frac{ds}{v} - \int_L \frac{dl}{c} \quad (7.22)$$

Denklem (7.22) n cinsinden düzenlenirse;

$$c dt = \int_S n ds - \int_L dl \quad (7.23)$$

elde edilir. Kırılma katsayısının yol boyunca değeri ise denklem (7.24)' deki gibidir:

$$c dt = \int_S n ds - \int_L n dl + \int_L (n - 1)dl \quad (7.24)$$

Yol boyunca toplam nötr atmosferik gecikme:

$$\Delta L = \int_L (n - 1)dl \quad (7.25)$$

Kırılma ( elektromanyetik dalganın ortamda yayılma hızının maddesel ortamda yayılma hızına oranı) kırılma terimi olarak da ifade edilerek u ekinde de yazılabilir:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 \quad (7.26)$$

Dolayısıyla;

$$(n-1)=N_w \cdot 10^{-6} \quad (7.27)$$

Havanın 100 MHz ile 20 Ghz frekans aralığında kırılma terimi [Thayer, 1974] tarafından u ekinde verilmiştir:

$$N = k_1 \frac{P_d}{T} Z_d^{-1} + k_2 \frac{e}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1}, \quad (7.28)$$

$P_d$  : Kuru havanın kısmi basıncı (mbar),

$P_d = P - e$  ("P" terimi toplam basınç ifadesidir.),

$e$  : Su buharının kısmi basıncı (mbar),

$T$  : Sıcaklık (K : Kelvin),

$k_1, k_2, k_3$  : Kırılma sabiti (K/mbar, K/mbar, K/mbar),

$Z_d^{-1}, Z_w^{-1}$  : Kuru hava ve ıslak havanın deneysel sıkışabilirlik faktörünün tersi.

## 7.5 Ya ı a Dönü ebilir Su Buharı Miktarının Ölçülmesine li kin Metodlar

Denklem (7.28)' deki ilk terim troposferik gecikmenin kuru bile enidir ve kuru bile enin uyarılmı dipol momentinin etkisini temsil eder. İkinci terim su buharının dipol momentiyile ilgilidir ve son terim su buharı moleküllerinin sabit dipol momentinin dipol uyum etkilerini gösterir.

Denklem (7.28)' deki son iki terim atmosferik kırılmanın ıslak bile enlerini olu turur. Kırılma sabitleri  $k_1$ ,  $k_2$  ve  $k_3$  deneysel olarak belirlenir. Ters sıkı tırılabilirlik, ideal olmayan gaz davranı ları ve ideal olan gaz varsayımları arasındaki farklılı ı açıklar [Schuler, 2001; Thayer, 1974].

Kırılma ıslak ve kuru bile en olmak üzere iki bölümden olu maktadır ve a a ıda belirtildi i gibi ifade edilebilir [Smith ve Weintraub, 1953]:

$$N = N_u + N_w \quad (7.29)$$

Yol boyunca kuru ve ıslak bile en gecikmesi denklem (7.30)' daki gibidir:

$$\Delta L = \Delta L_d + \Delta L_w \quad (7.30)$$

Denklem (7.29), denklem (7.25)' de düzenlenerek yerine konuldu unda;

$$\Delta L = 10^{-6} \int_L (N_w + N_d) dl \quad (7.31)$$

$$\Delta L = 10^{-6} \left[ \int_L N_w dl + \int_L N_d dl \right] \quad (7.32)$$

elde edilir. Toplam zenit gecikmesi (ZTD);

$$ZTD = ZDD + ZWD \quad (7.33)$$

olarak ifade edilebilir.

Zenit do rultusu boyunca toplam gecikmenin ıslak bölümü denklem (7.34)' de verilmi tir:

$$ZWD = 10^{-6} \int_z N_w dz \quad (7.34)$$

Denklem (7.29) bölümlerine ayrılarak;

$$N_d = k_1 \frac{P_d}{T} Z_d^{-1} \quad (7.35)$$

$$N_w = \left[ k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right] Z_w^{-1} \quad (7.36)$$

olarak yazılabilir.

$$k_1 = 77.6 \pm 0.05 \text{ (K/hPa)},$$

$$k_2 = 70.4 \pm 2.2 \text{ (K/hPa)},$$

$$k_3 = (3.739 \pm 0.02) \cdot 10^5 \text{ (K}^2\text{/hPa)}.$$

Kuru hava ve nemli havanın deneysel sıkıştırılabilirlik faktörünün açık hali;

$$Z_d^{-1} = 1 + P_d \cdot \left( 57,97 \cdot 10^{-8} \cdot \left( 1 + \frac{0.52}{T} \right) - 9,4611 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{T_c}{T^2} \right) \quad (7.37)$$

$$Z_w^{-1} = 1 + e \cdot \left[ (3.7 \times 10^{-4}) \cdot e \right] \cdot \left[ -2.37321 \times 10^{-3} + 2.3366 \cdot T^{-1} + 7.75141 \times 10^4 \cdot T^{-3} \right] \quad (7.38)$$

olarak yazılır [Schuler, 2001; Thayer, 1974].

Ya ı a dönü ebilir su buharının,  $N_w$  terimine ba lı olması sebebiyle model denklem olu turulma çalı masında bu temele dayanan ba ntılardan yararlanılmı tır.

Denklem (7.38) ile  $k_2$  ve  $k_3$  kırınım sabitleri denklem (7.36)' da yerine konularak;  $N_w$  terimi e ve T cinsinden denklem (7.39)' da görüldüğü gibi elde edilir:

$$N_w(e) = \alpha(T)e^3 + \beta(T)e^2 + \gamma(T)e + \delta \quad (7.39)$$

Denklem (7.39)' da yer alan  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  terimlerinin açık olarak yazımı;

$$\begin{aligned} \alpha(T) = & [(73389670,2 \times 10^{-7}) \cdot T^{-1} + (572,77859008 \times 10^{-4}) \cdot T^{-2} \\ & + (32,7796562865) \cdot T^{-3} + (502,399025125) \cdot T^{-4} \\ & + (29,26943744 \times 10^4) \cdot T^{-5}] \times 10^{-6} \end{aligned} \quad (7.40)$$

$$\beta(T) = [(-153,7602759 \times 10^{-3}).T^{-1} + (151,37935276).T^{-2} + (9,0118016).T^{-3}] \times 10^{-6} \quad (7.41)$$

$$\gamma(T) = [(-153,760275 \times 10^{-3}).T^{-1} + (151,3793527).T^{-2} + 32,7796562865).T^{-3} + (502,213206 \times 10^4).T^{-4} + (29,2692864 \times 10^4).T^{-5}] \times 10^{-6} \quad (7.42)$$

$\delta = 10^{-6}$  olarak elde edilir.

$\alpha, \beta, \gamma$  : Kırınımın ıslak bileşeninin sıcaklığa bağlı katsayıları [Kelvin].

$\delta$  : Denklem sabiti [-].

Denklem (7.39), (7.34)' te yerine yazılırsa;

$$ZWD = 10^{-6} \int_z N_w dz = 10^{-6} \int_z [\alpha(T)e^3 + \beta(T)e^2 + \gamma(T)e + \delta] dz \quad (7.43)$$

denklemini elde edilir.

### 7.5.1 Ortalama Sıcaklık ve Dönü üm Faktörü

Ortalama sıcaklığı elde etmek için en kesin yol sayısal hava tahmin modelleri ve radyosond profilleri ile elde edilen integral açıklamanın değerlendirilmesidir. Eğer ortalama sıcaklık biliniyorsa bu teknikte dönü üm sağlanır. Ancak bu miktarı yüzey sıcaklık yardımı ile belirlemek de mümkündür. Yüzey sıcaklığı metodu kullanıldığında dönü üm faktörü ('Q') bağıntısı elde edilir [Bevis, 1992;1994]:

$$Q = \frac{ZWD}{PWW} = 0.10200 + \frac{1708.08 [K]}{T_M} \quad (7.44)$$

$T_M$  : Troposferin ortalama sıcaklığı [K].

$T_M$  terimi için, farklı ara tırnacılardan Dünya çapında çe itli tekniklerle yapılan ara tırma sonuçlarında benzer sonuçlar elde edildi i görülmü tür. Bu çalı mada *Mendes ve arkada ları*, [2000] ileri sürdü ü terim kullanılmıştır (Bkz: Denklem (7.45)):

$$T_M = 50.4 [K] + 0.789 \cdot T \quad (7.45)$$

$T_M$  : Troposferin ortalama sıcaklı ı [K],

$T$  : Yüzey sıcaklı ı [K].

Denklem (7.43)' de ZWD' yi PWV cinsinden yazmak için dönü üm, denklem (7.44) aracılııyla yapılır.

$$PWV = \frac{ZWD}{Q(T)}$$

$$ZWD (T,e) = Q(T) \cdot PWV(T,e) \quad (7.46)$$

Böylelikle PWV;

$$PWV = 10^{-6} \cdot \left[ \int_z \frac{\alpha(T)}{Q(T)} e^3 dz + \int_z \frac{\beta(T)}{Q(T)} e^2 dz + \int_z \frac{\gamma(T)}{Q(T)} e dz + \int_z \frac{\delta}{Q(T)} dz \right] \quad (7.47)$$

olarak elde edilir.

Denklem (7.47) integre edilerek ZWD' yi PWV cinsinden yazabilmek mümkündür.

GPS tekni iyle elde edilen meteorolojik veri kullanılarak ya ı a dönü ebilir su buharı miktarının hesaplanaca ı model olu turulurken yakla ım, kırılmanın ıslak bile eni kullanılarak yapılır. Kısmi su buharı basıncı denklem (7.48)' de belirtildi i gibidir [Schuler, 2001; Thayer, 1974]:

$$e = \frac{rh}{100} e_{sat} \quad (7.48)$$

Denklem (7.48)' de kullanılan  $e_{sat}$  terimi yerine Meteorolojik Doküman ve Gözlem Metodları kılavuzunda yer alan ifade kullanılmıştır [CIMO Guide; WMO 2008].

$$e_{sat} = 6.112 \times \exp \left( \frac{17.62 \times T}{243.12 + T} \right) \quad (7.49)$$

$e$  : Su buharının kısmi basıncı [hPa=mbar],



$e_{sat}$  : Doymu su buharının kısmi basıncı [hPa=mbar];

rh : Ba ıl nem [%];

T : Sıcaklık (°C).

Mendes ve Langley' in, (1998b) türetti i kısmi su buharı basıncı ile zenit ıslak gecikme (ZWD) arasındaki do rusal ili ki;

$$ZWD = 0.122 [m] + 0,00943 \left[ \frac{m}{hPa} \right] . e \quad (7.50)$$

eklindedir.

## 8. ÇALI MADA ZLEN LEN YOL

Ya ı a dönü ebilir su buharının (PWV) belirlenmesi Mendes modelinde Q faktörüyle ili kilidir. Bu çalı mada PWV için olu turulan modelde ise Q dönü üm faktörü kullanılmamı tır. Daha do ru ve hassas bir sonuç için PWV miktarının belirlenmesine yönelik olu turulan modelde, okültasyon tekni iyle elde edilen atmosfer verilerinin kullanıldı ı istasyonların mevcut il sınırı koordinatları uygun bir hale getirilerek model denklemde katsayı olarak kullanılmı , zenit gecikme miktarına ula abilmek için ise Q faktöründen faydalanılmı tır.

Model denklem öncelikle IGS' ten alınan , stanbul verileri üzerinde kullanılmı tır.

Yapılan önceki çalı malarda ya ı a dönü ebilen su buharı miktarını belirlemede farklı tekniklerden yararlanılmı tır. Ancak GPS/MET verilerinin kullanılabilirdi i geçerli bir model olan Mendes modeli aracılı ıyla PWV' nin belirlenmesi için denklem (7.41)' in integre edilmesi gerekmektedir. Sonuca eri ebilme adına pratik olmayan bu yöntemle kar ılık, denklem (7.47)' de kısmi su buharı teriminin katsayıları için bu çalı mada nümerik modelleme yapılmı tır.

Model denklem katsayısı olarak il sınırı enlem koordinatları kaynaktan elde edilmi tir ( BB – ST/ AKB, 2010).

Buna göre stanbul'un il sınır enlem koordinatları: 41° 33' – 40° 28' aralı ındadır.

Enlem, açısal uzaklı ın sayısal ifadesidir. Ve birer derecelik aralıkları da paralel daireleri sınırlar. Bunların aralıkları da sabit olup, 111 km olarak kabul edilir. Koordinatları denkleme uygun hale getirmek için derece ve dakika cinsinden olan ifadeleri çok temel prensip ile iki noktanın enlem farkı alınımı , 111 km ile çarpılarak sonuç elde edilmi tir.

Buna göre stanbul' un derece ve dakika cinsinden bilinen enlem aralı ı kilometreye çevrilerek 120 km olarak bulunmu tur (Enlem Birimi De eri Dönü türme Tabloları).

Mendes zenit ıslak gecikme ve ya ı a dönü ebilir su buharı grafikleri verilerine göre hassas sonuç alınabilmesi için nümerik katsayılar Matlab programında iyile tirilmi tir.

Buna göre denklem (7.47) yerine bu çalışmada model denklem;

$$PWV = \lambda_1 e^3 - \lambda_1 6e^2 + (12\lambda_1 + \lambda_2)e + (\lambda_3 - 8\lambda_1) \quad (8.1)$$

olarak belirlenmiştir.

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  : Model denklem katsayıları [-].

Denklemde  $\lambda$  katsayıları, stanbul' un 120 km olan enlem aralı ı 1 km üzerinden normalize edilerek türetilmi tir:

$$\frac{1 [km]}{120 [km]} = 0.0083 \quad (8.2)$$

Buna göre Matlab programında elde edilen grafiklerden yararlanılarak katsayılar uygun hale getirilerek;

$$\lambda_1 = \left(\frac{0.0083}{2}\right)^3 = 7.19 \times 10^{-8} \quad (8.3)$$

$$\lambda_2 = \left(\frac{0.0083}{3}\right) = 2.76 \times 10^{-3} \quad (8.4)$$

$$\lambda_3 = (0.0083)^2 = 6 \times 10^{-5} \quad (8.5)$$

olarak elde edilmi tir.

PWV model denkleminde ZWD hesaplaması yapılabilmesi için ise Q dönüüm faktöründen yararlanılmıştır:

$$ZWD = Q.PWV = \Lambda_1 e^3 - \Lambda_1 6e^2 + (12\Lambda_1 + \Lambda_2)e + (\Lambda_3 - 8\Lambda_1) \quad (8.6)$$

Burada;

$$\Lambda_1 = Q.\lambda_1 \quad (8.7)$$

$$\Lambda_2 = Q.\lambda_2 \quad (8.8)$$

$$\Lambda_3 = Q.\lambda_3 \quad (8.9)$$

olarak ifade edilmiştir.

Ya 1 a dönü ebilen su buharı miktarını belirlemede model denklemin kullanımıyla elde edilen sonuçlar ile Mendes ZWD modelinin PWV' ye dönü türülmesinden elde edilen sonuç grafikleri karşılaştırılmıştır (**Bkz: Ek. A**).

Ayrıca Mendes ZWD modeli sonuç grafikleri ile çalışmada kullanılan model denklemin Q faktörü ile çarpılarak elde edilen ZWD grafik sonuçları karşılaştırılmıştır (**Bkz: Ek. B**).

## 9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ya 1 a dönü ebilir su buharı miktarının, GPS tekni iyle belirlenmesine ili kin model geli tirilmesi amaçlanmıştır. Ya 1 a dönü ebilir su buharı miktarı, GPS tekni i veya farklı yöntemler kullanılarak hesaplanabilmektedir. Ancak çalışmanın amacı di er tekniklerden farklı olarak bu hesaplamayı dolayısıyla tahmini çok daha hassas ve pratik bir biçimde yapabilmektir.

Çalışma sonucunun geçerlili ini do rulamak açısından, konuyla ilgili önemli kaynaklardan elde edilen bilgiler do rultusunda en pratik model olan Mendes ZWD modeli kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır. Mendes modeliyle PWV tahmini yapabilmek için denklem (7.47)' nin integre edilmesi gerekmektedir. Ayrıca Mendes modelinde çıkan sonuç hem sıcaklı a hem de kısmi su buharı basıncına ba lıdır. Model denkleminde ise PWV sadece kısmi su buharı basıncına ba lıdır.

Ayrıca bu çalışmada denklem (7.47)' de integrasyon terimlerine karşı farklı bir yaklaşım uygulanarak, integrasyon terimlerinin yerine belirli katsayıların uygun olabilece i dü ünülmü tür. Matlab programında temel düzenlemeler sonrası hassasiyeti artırma amaçlı nümerik i lemler yapılarak model denklemin oluşturulmu tür.

IGS, GPS/MET verileri ile kullanılacak formüller birim bakımından uygun hale getirilmiştir. Denkleminde kullanılacak katsayılar için, verileri elde edilen bölgenin enlem aralığı bilgisinden ve bu aralı a dair türetilimlerden yararlanılmıştır.

## 9.1 Oluşturulan Grafiklerin Sayısal Değer Aralıklarının Karşılaştırılması

Sonuç grafikleri (Ek. A) ve (Ek. B)'de yer aldığı şekilde elde edilmiş ve Mendes modeliyle kıyaslanmıştır.

(Ek. A)'da model denklem ve Mendes modeliyle elde edilen 'e-PWV' grafikleri yer almaktadır:

- ekil (A.1) ve (A.2) 2009 yılının 30 Ocak günü verileriyle elde edilmiş grafiklerdir. Model denklem (A.1)'de buhar basıncı ve PWV sırasıyla  $6.5 < e < 9$ ,  $0.022 < PWV < 0.03$  aralığındadır. Mendes modeli (A.2)'de buhar basıncı ve PWV sırasıyla  $6.5 < e < 9$ ,  $0.027 < PWV < 0.031$  aralığındadır.
- ekil (A.3) ve (A.4) 2009 yılının 28 Şubat günü verileriyle elde edilmiş grafiklerdir. Model denklem (A.3)'de buhar basıncı ve PWV sırasıyla  $6 < e < 7.4$ ,  $0.0195 < PWV < 0.024$  aralığındadır. Mendes modeli (A.4)'te buhar basıncı ve PWV sırasıyla  $6 < e < 7.4$ ,  $0.0255 < PWV < 0.028$  aralığındadır.
- ekil (A.5) ve (A.6) 2009 yılının 30 Mart günü verileriyle elde edilmiş grafiklerdir. Model denklem (A.5)'te buhar basıncı ve PWV sırasıyla  $6.5 < e < 11.5$ ,  $0.02 < PWV < 0.04$  aralığındadır. Mendes modeli (A.6)'da buhar basıncı ve PWV sırasıyla  $6.5 < e < 11.5$ ,  $0.027 < PWV < 0.037$  aralığındadır.
- ekil (A.7) ve (A.8) 2009 yılının 30 Nisan günü verileriyle elde edilmiş grafiklerdir. Model denklem (A.7)'de buhar basıncı ve PWV sırasıyla  $9.5 < e < 13$ ,  $0.03 < PWV < 0.042$  aralığındadır. Mendes modeli (A.8)'de buhar basıncı ve PWV sırasıyla  $9.5 < e < 13$ ,  $0.0325 < PWV < 0.0375$  aralığındadır.
- ekil (A.9) ve (A.10) 2009 yılının 30 Mayıs günü verileriyle elde edilmiş grafiklerdir. Model denklem (A.9)'de buhar basıncı ve PWV sırasıyla  $13 < e < 19$ ,  $0.044 < PWV < 0.062$  aralığındadır. Mendes modeli (A.10)'de buhar basıncı ve PWV sırasıyla  $13 < e < 19$ ,  $0.038 < PWV < 0.047$  aralığındadır.

- ekil (A. 11) ve (A.12) 2009 yılının 30 Haziran günü verileriyle elde edilmiş grafiklerdir.  
 Model denklem (A.11)' de buhar basıncı ve PWV sırasıyla  $15 < e < 22$ ,  $0.05 < PWV < 0.075$  aralı ındadır.  
 Mendes modeli (A.12)' de buhar basıncı ve PWV sırasıyla  $15 < e < 22$ ,  $0.043 < PWV < 0.052$  aralı ındadır.
- ekil (A. 13) ve (A.14) 2009 yılının 30 Temmuz günü verileriyle elde edilmiş grafiklerdir.  
 Model denklem (A.13)' te buhar basıncı ve PWV sırasıyla  $16 < e < 20.5$ ,  $0.052 < PWV < 0.066$  aralı ındadır.  
 Mendes modeli (A.14)' te buhar basıncı ve PWV sırasıyla  $16 < e < 20.5$ ,  $0.043 < PWV < 0.05$  aralı ındadır.
- ekil (A. 15) ve (A.16) 2009 yılının 30 A ustos günü verileriyle elde edilmiş grafiklerdir.  
 Model denklem (A.15)' te buhar basıncı ve PWV sırasıyla  $17 < e < 23$ ,  $0.058 < PWV < 0.076$  aralı ındadır.  
 Mendes modeli (A.16)' da buhar basıncı ve PWV sırasıyla  $17 < e < 23$ ,  $0.046 < PWV < 0.054$  aralı ındadır.
- ekil (A. 17) ve (A.18) 2009 yılının 30 Eylül günü verileriyle elde edilmiş grafiklerdir.  
 Model denklem (A.17)' de buhar basıncı ve PWV sırasıyla  $13 < e < 20$ ,  $0.044 < PWV < 0.062$  aralı ındadır.  
 Mendes modeli (A.18)' de buhar basıncı ve PWV sırasıyla  $13 < e < 20$ ,  $0.038 < PWV < 0.05$  aralı ındadır.
- ekil (A. 19) ve (A.20) 2009 yılının 30 Ekim günü verileriyle elde edilmiş grafiklerdir.  
 Model denklem (A.19)' da buhar basıncı ve PWV sırasıyla  $9 < e < 12.5$ ,  $0.03 < PWV < 0.042$  aralı ındadır.  
 Mendes modeli (A. 20)' de buhar basıncı ve PWV sırasıyla  $9 < e < 12.5$ ,  $0.031 < PWV < 0.036$  aralı ındadır.
- ekil (A. 21) ve (A.22) 2009 yılının 30 Kasım günü verileriyle elde edilmiş grafiklerdir.  
 Model denklem (A.21)' de buhar basıncı ve PWV sırasıyla  $9 < e < 13$ ,  $0.03 < PWV < 0.042$  aralı ındadır.  
 Mendes modeli (A. 22)' de buhar basıncı ve PWV sırasıyla  $9 < e < 13$ ,  $0.031 < PWV < 0.037$  aralı ındadır.

- ekil (A. 23) ve (A.24) 2009 yılının 30 Aralık günü verileriyle elde edilmi grafiklerdir.  
Model denklem (A.23)' te buhar basıncı ve PWV sırasıyla  $6.5 < e < 11.5$ ,  
 $0.02 < PWV < 0.04$  aralı ındadır.  
Mendes modeli (A. 24)' te buhar basıncı ve PWV sırasıyla  $6.5 < e < 11.5$ ,  
 $0.027 < PWV < 0.037$  aralı ındadır.

(Ek. B)' de model denklem ve Mendes modeliyle elde edilen 'e-ZWD' grafikleri yer almaktadır:

- ekil (B.1) ve (B.2) 2009 yılının 30 Ocak günü verileriyle elde edilmi grafiklerdir.  
Model denklem (B.1)' de buhar basıncı ve ZWD sırasıyla  $6.5 < e < 9$ ,  
 $0.145 < PWV < 0.19$  aralı ındadır.  
Mendes modeli (B.2)' de buhar basıncı ve ZWD sırasıyla  $6.5 < e < 9$ ,  
 $0.175 < PWV < 0.2$  aralı ındadır.
- ekil (B.3) ve (B.4) 2009 yılının 28 ubat günü verileriyle elde edilmi grafiklerdir.  
Model denklem (B.3)' te buhar basıncı ve ZWD sırasıyla  $6 < e < 7.4$ ,  
 $0.125 < PWV < 0.155$  aralı ındadır.  
Mendes modeli (B.4)' te buhar basıncı ve ZWD sırasıyla  $6 < e < 7.4$ ,  
 $0.168 < PWV < 0.182$  aralı ındadır.
- ekil (B.5) ve (B.6) 2009 yılının 30 Mart günü verileriyle elde edilmi grafiklerdir.  
Model denklem (B.5)' te buhar basıncı ve ZWD sırasıyla  $6.5 < e < 11.5$ ,  
 $0.13 < PWV < 0.23$  aralı ındadır.  
Mendes modeli (B.6)' da buhar basıncı ve ZWD sırasıyla  $6.5 < e < 11.5$ ,  
 $0.17 < PWV < 0.23$  aralı ındadır.
- ekil (B.7) ve (B.8) 2009 yılının 30 Nisan günü verileriyle elde edilmi grafiklerdir.  
Model denklem (B.7)' de buhar basıncı ve ZWD sırasıyla  $9.5 < e < 13$ ,  
 $0.19 < PWV < 0.26$  aralı ındadır.  
Mendes modeli (B.8)' de buhar basıncı ve ZWD sırasıyla  $9.5 < e < 13$ ,  
 $0.2 < PWV < 0.235$  aralı ındadır.
- ekil (B.9) ve (B.10) 2009 yılının 30 Mayıs günü verileriyle elde edilmi grafiklerdir.  
Model denklem (B.9)' da buhar basıncı ve ZWD sırasıyla  $13 < e < 19$ ,  
 $0.26 < PWV < 0.38$  aralı ındadır.  
Mendes modeli (B.10)' da buhar basıncı ve ZWD sırasıyla  $13 < e < 19$ ,  
 $0.23 < PWV < 0.3$  aralı ındadır.

- ekil (B.11) ve (B.12) 2009 yılının 30 Haziran günü verileriyle elde edilmi grafiklerdir.  
 Model denklem (B.11)' de buhar basıncı ve ZWD sırasıyla  $15 < e < 22$  ,  
 $0.3 < PWV < 0.44$  aralı ındadır.  
 Mendes modeli (B.12)' de buhar basıncı ve ZWD sırasıyla  $15 < e < 22$  ,  
 $0.26 < PWV < 0.32$  aralı ındadır.
- ekil (B.13) ve (B.14) 2009 yılının 30 Temmuz günü verileriyle elde edilmi grafiklerdir.  
 Model denklem (B.13)' te buhar basıncı ve ZWD sırasıyla  $16 < e < 20.5$  ,  
 $0.32 < PWV < 0.42$  aralı ındadır.  
 Mendes modeli (B.14)' te buhar basıncı ve ZWD sırasıyla  $16 < e < 20.5$  ,  
 $0.265 < PWV < 0.305$  aralı ındadır.
- ekil (B.15) ve (B.16) 2009 yılının 30 A ustos günü verileriyle elde edilmi grafiklerdir.  
 Model denklem (B.15)' te buhar basıncı ve ZWD sırasıyla  $17 < e < 23$  ,  
 $0.34 < PWV < 0.46$  aralı ındadır.  
 Mendes modeli (B.16)' da buhar basıncı ve ZWD sırasıyla  $17 < e < 23$  ,  
 $0.285 < PWV < 0.33$  aralı ındadır.
- ekil (B.17) ve (B.18) 2009 yılının 30 Eylül günü verileriyle elde edilmi grafiklerdir.  
 Model denklem (B.17)' de buhar basıncı ve ZWD sırasıyla  $13 < e < 20$  ,  
 $0.26 < PWV < 0.38$  aralı ındadır.  
 Mendes modeli (B.18)' de buhar basıncı ve ZWD sırasıyla  $13 < e < 20$  ,  
 $0.23 < PWV < 0.31$  aralı ındadır.
- ekil (B.19) ve (B.20) 2009 yılının 30 Ekim günü verileriyle elde edilmi grafiklerdir.  
 Model denklem (B.19)' da buhar basıncı ve ZWD sırasıyla  $9 < e < 12.5$  ,  
 $0.19 < PWV < 0.26$  aralı ındadır.  
 Mendes modeli (B.20)' de buhar basıncı ve ZWD sırasıyla  $9 < e < 12.5$  ,  
 $0.195 < PWV < 0.23$  aralı ındadır.
- ekil (B.21) ve (B.22) 2009 yılının 30 Kasım günü verileriyle elde edilmi grafiklerdir.  
 Model denklem (B.21)' de buhar basıncı ve ZWD sırasıyla  $9 < e < 13$  ,  
 $0.18 < PWV < 0.28$  aralı ındadır.  
 Mendes modeli (B.22)' de buhar basıncı ve ZWD sırasıyla  $9 < e < 13$  ,  
 $0.195 < PWV < 0.24$  aralı ındadır.

- ekil (B.23) ve (B.24) 2009 yılının 30 Aralık günü verileriyle elde edilmiş grafiklerdir.  
Model denklem (B.23)' te buhar basıncı ve ZWD sırasıyla  $6.5 < e < 11.5$ ,  $0.13 < PWV < 0.23$  aralığındadır.  
Mendes modeli (B.24)' te buhar basıncı ve ZWD sırasıyla  $6.5 < e < 11.5$ ,  $0.17 < PWV < 0.23$  aralığındadır.

Çalışmada Uluslararası GPS istasyonundan (IGS) alınan meteorolojik (GPS / MET) verileri ISTA istasyonu için iyi bir biçimde aktarılması olmasına dikkat edilerek, belirli bir yılın bütün aylarının seçilmiş günler için verileri kullanılmıştır. İyonosfer ve iklim Meteorolojisi için Uydu Gözleme Sistemi (COSMIC) ve Atmosferik Araştırmalar için Üniversite Birliği (UCAR) tarafından yapılan gözlem sonuçlarında yıl ve mevsimlere göre PWV için sayısal değer aralıkları verilmiştir (COSMIC / UCAR – internet sitesi). Değerlendirme sonucu olarak yıl ve mevsimlere göre ortaya çıkan PWV sayısal değer aralığı, adı geçen atmosferik araştırma merkezlerinin gözlem sonuçlarının verildiği değer aralıkları içerisinde yer aldığı görülmektedir.

Değerlendirme yapılmasına yönelik elde edilen grafikler vasıtasıyla belirlenen PWV ve ZWD sayısal değer aralıkları halen geçerli olan Mendes modeliyle karşılaştırılmıştır. Mendes modeliyle kıyaslandığında sonuçların sayısal olarak benzerlik içinde olduğu görülmüştür. Benzer isimler IGS- ANKR istasyonundan alınan veriler için de yapılmıştır, Mendes modeli sonuçlarıyla sayısal aralık bakımından karşılaştırılmasında yakın değerlere sahip olduğu görülmüştür.

Mendes' in ıslak gecikme modeli ve tezde oluşturulan yaklaşık model denklemi ya da dönüşümlü su buharı ölçümleri (PWV) elde etmek için kullanılmaktadır. Grafikler PWV ve kısmi su buharı basıncı verilerinin karşı karşıya getirilmesiyle elde edilmiştir. Ayrıca, kısmi su buharı verilerini, zenit ıslak gecikme (ZWD) ve model denklemdeki PWV ile ilişkilendirilerek, doğru tahmin ve hataya sebep olan faktörler hakkında bilgiye ulaşmaya çalışılmıştır. Mendes ZWD modelini PWV' ye dönüştürürken Q dönüşüm faktörü, çalışmada elde edilen PWV model denklemi ZWD' ye dönüştürürken ise aynı şekilde Q faktörü kullanılmaktadır. Sonuç grafikleri incelendiğinde Q faktörünün kullanılmasının sonuçları önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. *Mendes ve Langley* tarafından PWV ve kısmi su buharı basıncı arasında lineer bir ilişki olduğu, lineerliğin korunmasının hassasiyeti etkileyen en önemli etkenlerden biri olduğu belirtilmiştir, (1995). Q faktörünün kullanıldığı denklem sistemi çözümünün, elde edilen grafik sonuçlarına bakılarak lineerliği dolayısıyla hassasiyeti olumsuz etkilediği düşünülmüştür. Denklem (7.44)' te verilen Q faktörü görüldüğü üzere troposferin ortalama sıcaklığına ve ektikte yer alan sabit sayılara bağlıdır. Troposferin ortalama sıcaklığı ( $T_M$ ) terimi olarak atmosfer dinamiği ile ilgili çalışmaları yapan bilim adamlarının dünya çapında çeşitli tekniklerle yaptıkları araştırmaları sonuçlarına göre benzer değerler kullanılmaktadır (Mendes ve Langley, 1995). Bu çalışmada *Mendes ve arkadaşlarının*, (2000) ileri sürdüğü ' $T_M$ ' terimi kullanılmıştır. Bu terim dışında kalan tüm terimler sabittir.



Sonuç olarak geli tirilen modelin sayısal de er aralıkları (Cosmic- Ucar) tarafından yapılan gözlemlerin sonuç de er aralıkları içerisinde oldu u ve Mendes modeliyle yakın sayısal de erlere sahip oldu u görülmü tür. Aynı zamanda model denklemde nümerik analiz açısından integrasyon gerektiren terimlerin yerine enlem de eri üzerinden farklı bir yakla ımla kullanılan terimlerle sonuç elde edilmi tir.

Çalı malara, elde edilen model denklemin özellikle ZWD sonuçlarının daha hassas alınmasına yönelik ve farklı enlem ve boylamlarda yer alan bölgeler için de anlamlı sonuç vermesine yönelik iyile tirme çalı maları yapılarak devam edilebilir.

## KAYNAKLAR

- Anthes, R., M. Exner, C. Rocken, and R. Ware, Results from the GPS/MET Experiment and Potential Applications to GEWEX, *GEWEX News*, 7, 3-6, Feb., 1997.
- Bevis, M., S. Businger, T.A. Herring, C. Rocken, R.A. Anthes, and R.H Ware (1992). GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapour Using the Global Positioning System, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, No. D14, 15,787-15,801.
- Bevis, M., S.T. Businger, S.T. Chriswell et al. [1994], *GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water*, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 33, pp. 379- 386, March 1994
- Brunner, F. K. And W. M. Welsch (1993). "Effect of the Troposphere on GPS Measurements." *GPS World*. January, 1993, sf: 42-51.
- S. Businger, S. Chiswell, M. Bevis, J. Duan, R. Anthes, C. Rocken, R. Ware, M. Exner, T. van Hove, and S. Solheim 1996 - *The Promise of GPS Atmospheric Monitoring*
- Champion, F.C. (1960), University Physics, Blackie & Son Ltd, Glasgow.
- Chiu, Y. T., K. R. Hardy, L. Tyler, and D. Hindson, Sensing tropospheric temperature and ionospheric structures with spaceborne GPS receivers, paper presented at US-Taiwan Workshop on Space, Taipei, Taiwan, April 15-18, 1991.
- Coco, D., GPS-Satellites of opportunity for ionospheric monitoring, *GPS World*, October, 47-50, 1991.
- Davis, J. L., T. A. Herring, I. I. Sharpiro, A. E. E. Rogers, and G. Elgerred (1985). "Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length", *Radio Science*, Vol. 20, No. 6, sf: 1593-1607.
- Dixon, T., An introduction to the Global Positioning System and some tectonic applications, *Rev. Geophys.*, 29, 249-276, 1991.
- Elgerred, G., J. L. Davis, T. A. Herring, and I. I. Shapiro, Geodesy by radio interferometry: Water vapor radiometry for estimation of the wet delay, *J. Geophys. Res.*, 96, 6541-6555, 1991.
- Eyre, J.R., Assimilation of radio occultation measurements into a numerical prediction system, ECMWF Techn. Memo No.1999, 1994.
- 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
- Fjeldbo, G., and V. R. Eshelman, The atmosphere of Mars analysed by integral inversion of the Mariner IV occultation data, *Planet. Space Sci.*, 16, 123-140, 1968

GABOR, M. [1997], *Remote Sensing of Water Vapor From GPS Receivers*, Remote Sensing from Space, University of Texas at Austin, Spring 1997 mid-term Project

Gao, Y., S. Skone, K. Chen, and N.A. Nicholson (2004). Real-time sensing atmospheric water vapor using precise GPS orbit and clock product, Proceedings of ION Long Beach, CA. (<http://www.gao.gov>)

M. Gorbunov, S. Sokolovskiy, B. Herman, D. Hunt, Y.-H. Kuo, W. Schreiner, Rocken, C., R. Anthes, M. Exner, R. Ware, D. Feng, and X. Zou: Verification of GPS/MET Data in the Neutral Atmosphere, *Journal of Geophysical Research*, 102, pp. 29,849-29,866, 1997.

Gurvich, A. S., and T. G. Krasil'nikova, Navigation satellites for radio sensing of the Earth's atmosphere, *Sov. J. Remote Sens.*, 71124-1131, 1990.

Haase, J., E. Calais, J. Talaya, A. Rius, F. Vespe, R. Santangelo, Z.-Y. Huang, J.M. Davila, M. Ge, L. Cucumll, A. Flores, C. Sciatetta, R. Pacione, M. Bocolari, S. Pugnaghi, H. Vedel, K. Mogensen, X. Yang, J. Garate (2001): The Contributions of the MAGIC Project to the COST-716 Objectives of Accessing the Operational Potential of Ground-based GPS Meteorology on an International Scale. *Phys. Chem. Earth (A)*, Vol.26, No1.6-8, pp.433-438.

Hager, B. H., R. W. King, and M. H. Murray, Measurement of crustal deformation using the global positioning system, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 19, 351-382, 1991.

G. J. Haltiner and F. L. Martin; *Dynamical and physical meteorology*, New York (McGraw-Hill), 1957.

Herring T. A., Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, 1990.

Hofmann-Wellenhof, etc., H. Lichtenegger and J. Collins, *Global Positioning System: Theory and Practice*, (May ,1993).

Houghton, J. (2000) *The Physics of Atmosphere (1st Edition)*, Cambridge: Cambridge University Pres.

Kahveci, M., Yıldız, F. (2005). *Global Konum Belirleme Sistemi (GPS): Teori-Uygulama*, Nobel Yayinevi, Geli tirilmi 2.baskı, Ankara.

Kleijer, F. (2004) *Troposphere Modeling and Filtering Precise for GPS Leveling*, Publications on Geodesy 56, Netherlands Geodetic Commission, printed by Optima Grafische Communicatie, The Netherlands.

Kursinski, E.R. and G.A. Hajj (2001). A comparison of water vapour derived from GPS occultations and global weather analyses, *Journal of geophysical research*, Vol. 106 No.D1, sf: 1,113-1,138.

- Kuo, Y.-H., X. Zou, S.-J. Chen, W. Huang, Y.-R. Guo, R. Anthes, M. Exner, D. Hunt, C. Rocken, and S. Sokolovskiy, A GPS/MET sounding through an intense upper-level front, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, in press, 1997b.
- Langley, R. B. (1993), The GPS Observables, *GPS World*, April 1993, sf: 52-58.
- Leick, A., *GPS Satellite Surveying*, 352 pp., John Wiley, New York, (1990).
- Lindal, G. F., et al., The atmosphere of Jupiter: An analysis of the Voyager radio occultation measurements, *J. Geophys. Res.*, 86,8721-8727, 1981.
- Melbourne, W. G. et al.: The Application of Spaceborne GPS to Atmospheric Limb Sounding and Global Change Monitoring, JPL Publication 94-18, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, 147 pp., 1994.
- Mendes, V.B., and R.B. Langley (1995), Zenith Wet Tropospheric Delay Determination Using Prediction Model : Accuracy Analysis, *Cartographiae a Cadastro*, 2, 41-47.
- MOCKLER, S. B. [1995], *Water Vapor in the Climate System*, Special Report, American Geophysical Union (AGU), 2000 Florida Ave., N.W., Washington, DC 20009, ISBN 0- 87590-865-9, December 1995.
- National Research Council, Sea-Level Change, Geophysics Study Committee, National Academy Press, Washington, D.C., 1990.
- Ramirez, J.A. (2007) The earth-atmosphere system (Course notes), Colorado State University.
- Randall, D. A., and S. Tjemkes, Clouds, the Earth's radiation budget and the hydrological cycle, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 90, 3-9, 1991.
- Resch, G. M., Water vapor radiometry in geodetic applications, in *Geodetic Refraction*, edited by F. K. Brunner, pp. 53-84, Springer- Verlag, New York, 1984.
- Rocken, C., R.A. Anthes, M. Exner, D. Hunt, S. Sokolovskiy, R. Ware, M. Gorbunov, W. Schreiner, D. Feng, B. Herman, Y.H. Kuo, and X. Zou (1991). Analysis and Validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere, *J. Geophys. Res.* 102 D25, 29849–29866.
- Rocken, C., V. Hove, J. Johnson, F. Solheim, R. Ware, R. Bevis, M. Chiswell, and S. Businger (1995). GPS/STORM – GPS sensing of atmospheric water vapor for Meteorology. *Journal of Atmospheric and Oceanographic Technology* 12, sf: 468-479
- Schuler T. (2001), On ground-based GPS tropospheric delay estimation, Ph.D. thesis, Univ. of Bundeswehr München, Neubiber eingereicht, 1 February.
- Seeber, G. [1993], *Satellite Geodesy - Foundations, Methods, and Applications*, Berlin; New York: de Gruyter, 1993, ISBN 3-11-012753-9

Sergey V. Sokolovskiy, Christian Rocken, and Anthony R. Lowry. "Use of GPS for estimation of Bending Angles of Radio Waves at low elevations", Vol.36, No:3, (May, 2001).

Smith, E. K., and S. Weintraub, The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies, Proc. IRE, 41, 1035-1037, 1953.

Spilker, J. J., GPS signal structure and performance characteristics, in Global Positioning System, vol. 1, The Institute of Navigation, Washington, D.C., 1980.

Thayer, G. D. (1974). "An improved equation for the radio refractive index of air", Radio Science, Vol.9, No.10, sf: 803-807.

Tralli, D.M. and S.M. Lichten (1990). The stochastic estimation of tropospheric path delays in global positioning system geodetic measurements, *Bull. Geod.* pp: 127-159.

Tralli, D. M., T. H. Dixon, and S. A. Stephens, Effect of wet tropospheric path delays on estimation of geodetic baselines in the Gulf of California using the global positioning system, J. Geophys. Res., 93, 6545-6557, 1988.

Ware, R., C. Rocken, C. Alber, and F. Solheim (2001). Sensing integrated water vapor along GPS ray paths, Geophysical Research Letters, Vol. 24, No. 4, sf: 417- 420.

Ware, R.H., D.W. Fulker, S.A. Stein, D.N. Anderson, S.K. Avery, R.D. Clark, K.K. Droegemeier, J.P. Kuettner, J. B. Minster, and S. Sorooshian (2001). Real-time national GPS networks for atmospheric sensing, Journal of Atmospheric and Solar – Terrestrial Physics, Vol 63, Issue 12, sf:1315-1330.

Williams (2008). Earth's Atmosphere  
(<http://www.williamsclass.com/EighthScienceWork/Atmosphere/>)

Yuan L.L., R.A. Anthes , R.H. Ware, C. Rocken, W.D. Bonner, M.G. Bevis, and S. Businger (1993). Sensing climate change using the global positioning system, Journal of geophysical research, Vol. 98, NO. D6, sf: 14,925-14,937.

Yunck T.P (2002). An Overview of Atmospheric Radio Occultation, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology Pasadena, California 91109, Journal of Global Positioning Systems Vol. 1, No. 1: 58-60

### **Yararlanılan İnternet Siteleri**

Cimo Guide - Doymu Buhar Basıncı Formülleri -  
<http://cires.colorado.edu/~voemel/vp.html>

COSMIC - UCAR- <http://www.cosmic.ucar.edu>

Enlem Birimi De erini Dönü türme Tabloları  
[http://www.zodiacal.com/tools/lat\\_table.php](http://www.zodiacal.com/tools/lat_table.php)

GAO- (<http://www.gao.gov>)

GRAS- <http://www.grassaf.org>

BB- stanbul / Avrupa Kültür Ba kenti-( BB – ST/ AKB, 2010)- Co rafi Konum ve Stratejik Önem - <http://www.ibb.gov.tr/sites/IstanbulTanitim/konum>

JPL-NASA - <http://www.jpl.nasa.gov/>

NASA- <http://www.nasa.gov/>

SOPAC & CSRC Garner GPS Ar iv - <http://garner.ucsd.edu/>

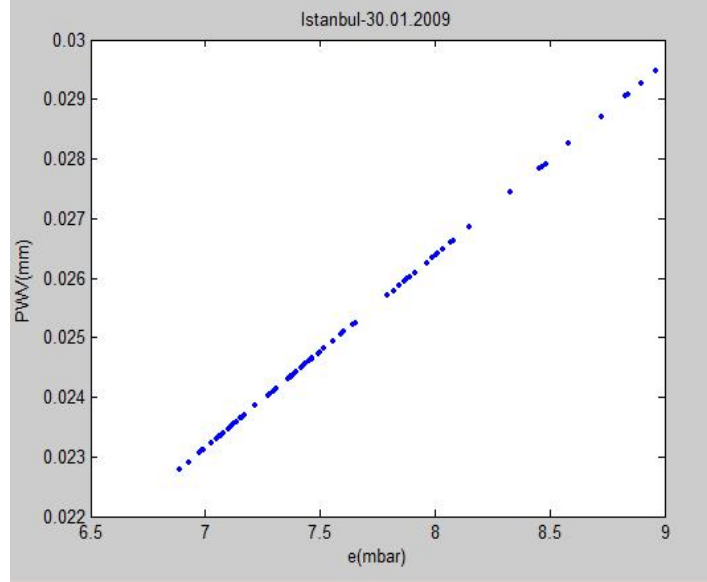
UCAR-<http://www.gst.ucar.edu>

USGS- [www.ga.water.usgs.gov/edu](http://www.ga.water.usgs.gov/edu)

## **EKLER**

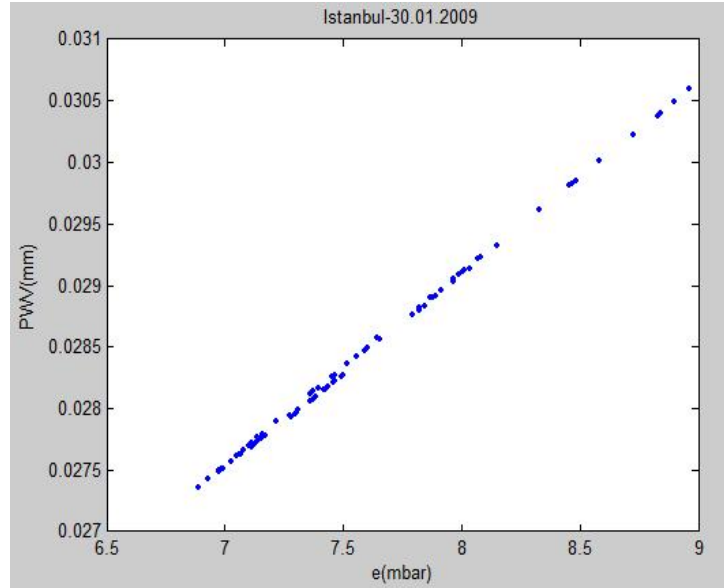
## EK A : Model Denklemler ile Mendes Modeli PWV Grafiklerinin Karşılaştırılması

### Model Denklemler



ekil A.1

### Mendes ZWD Modeli

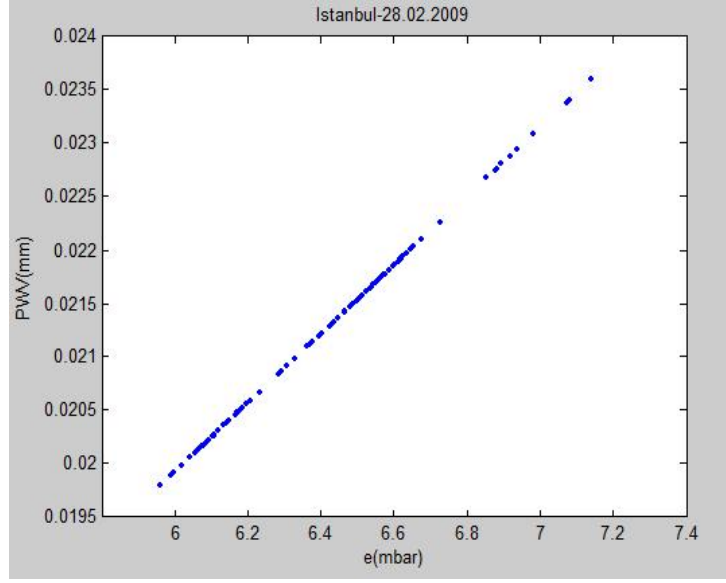


ekil A.2

ekil (A.1) ve (A.2)' de ISTA istasyonunun 2009 yılı 30 Ocak gününün verileri kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır.

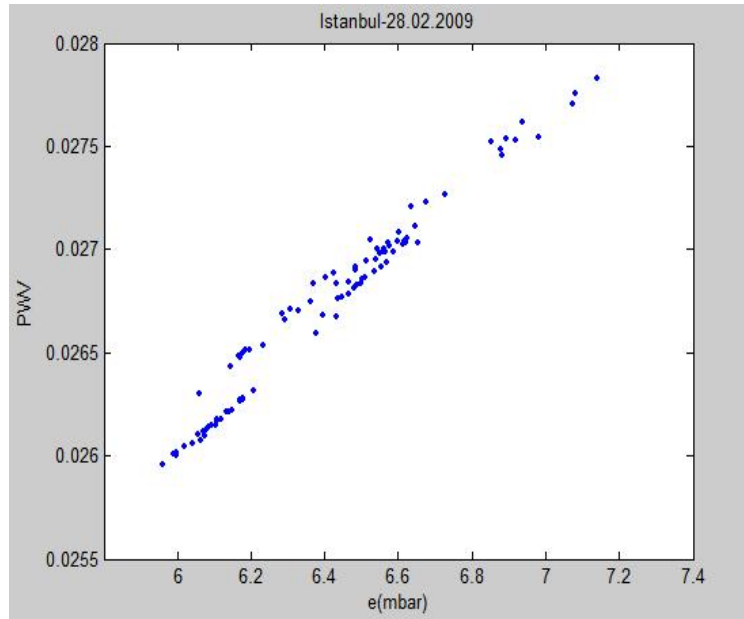


### Model Denklem



ekil A.3

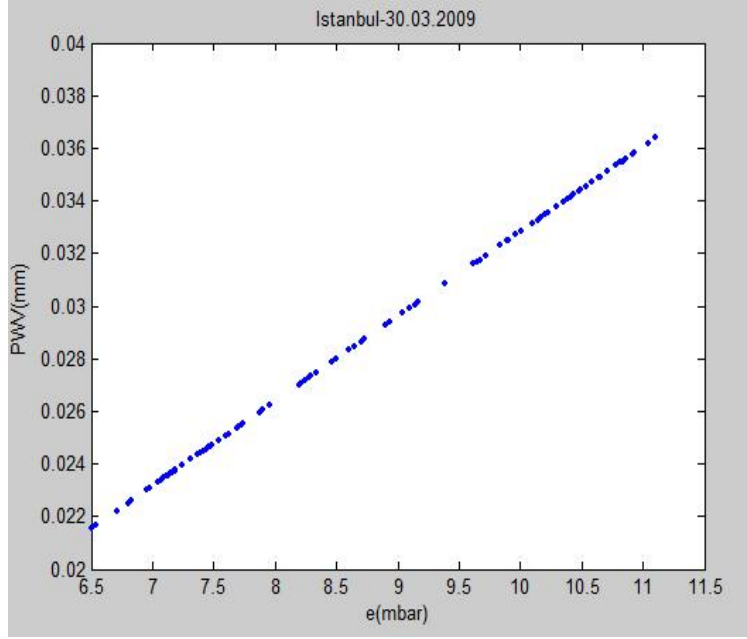
### Mendes ZWD Modeli



ekil A.4

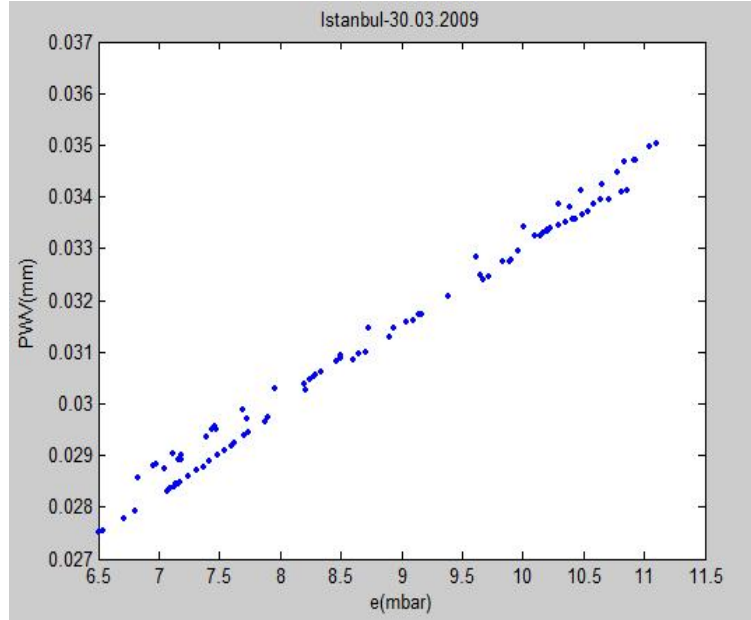
ekil (A.3) ve (A.4)' te ISTA istasyonunun 2009 yılı 28 ubat gününün verileri kullanılarak kar ıla tırma yapılmı tır.

## Model Denklem



ekil A.5

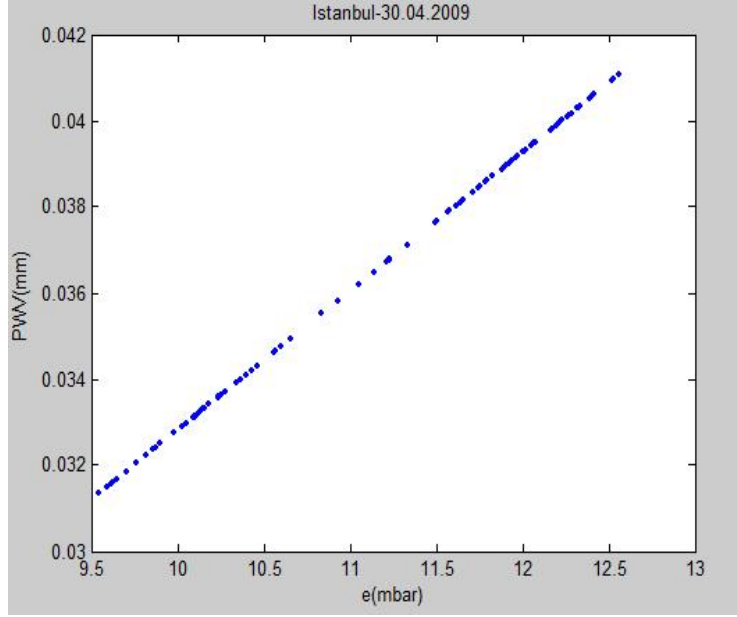
## Mendes ZWD Modeli



ekil A.6

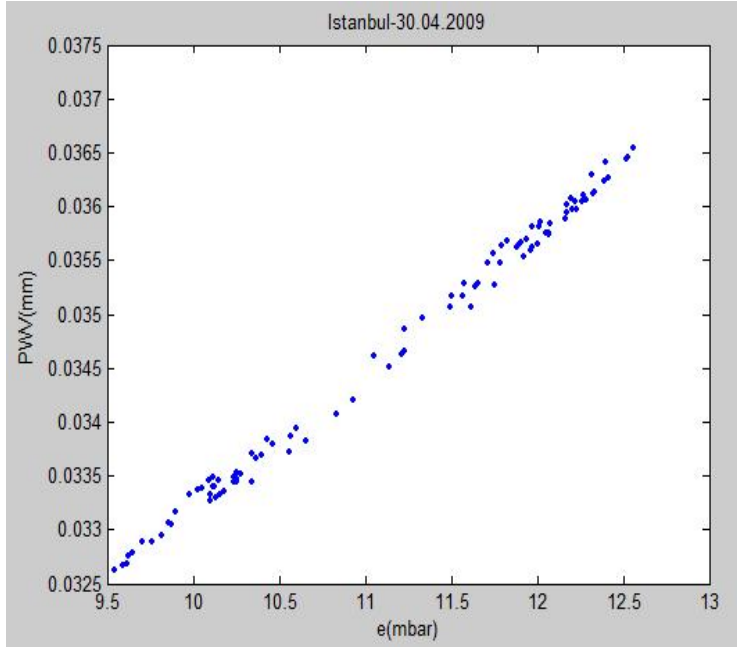
ekil (A.5) ve (A.6)' da ISTA istasyonunun 2009 yılı 30 Mart gününün verileri kullanılarak kar ıla tırma yapılmı tır.

## Model Denklem



ekil A.7

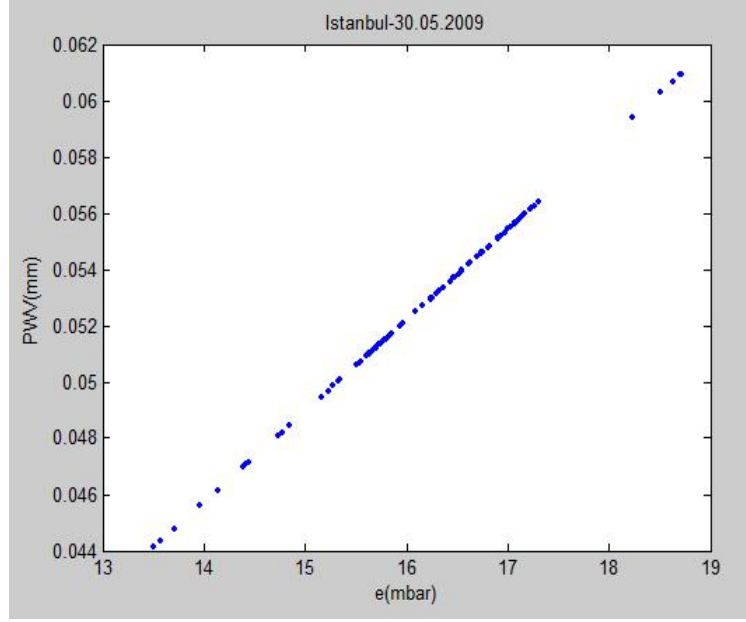
## Mendes ZWD Modeli



ekil A.8

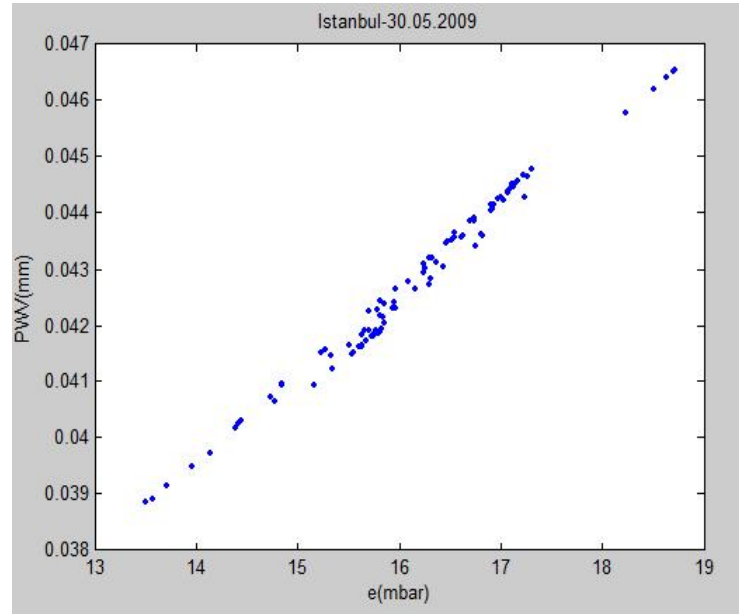
ekil (A.7) ve (A.8)' de ISTA istasyonunun 2009 yılı 30 Nisan gününün verileri kullanılarak kar ıla tırma yapılmı tır.

## Model Denklem



ekil A.9

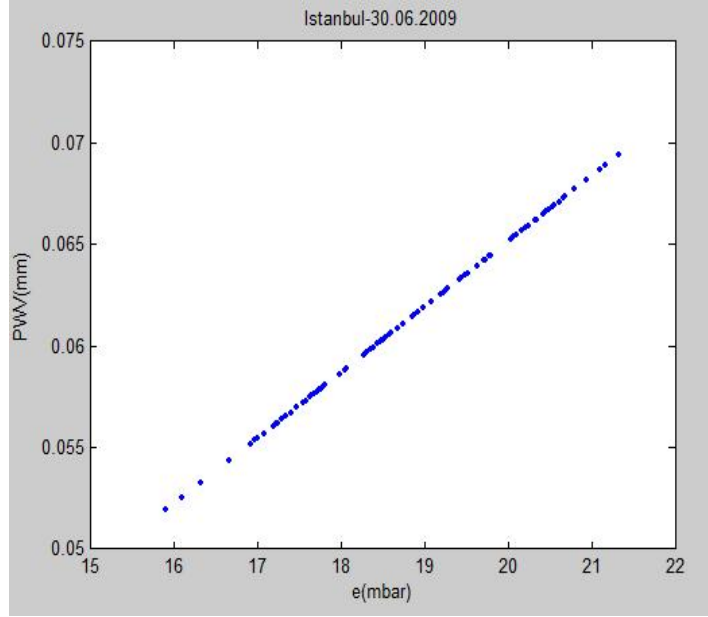
## Mendes ZWD Modeli



ekil A.10

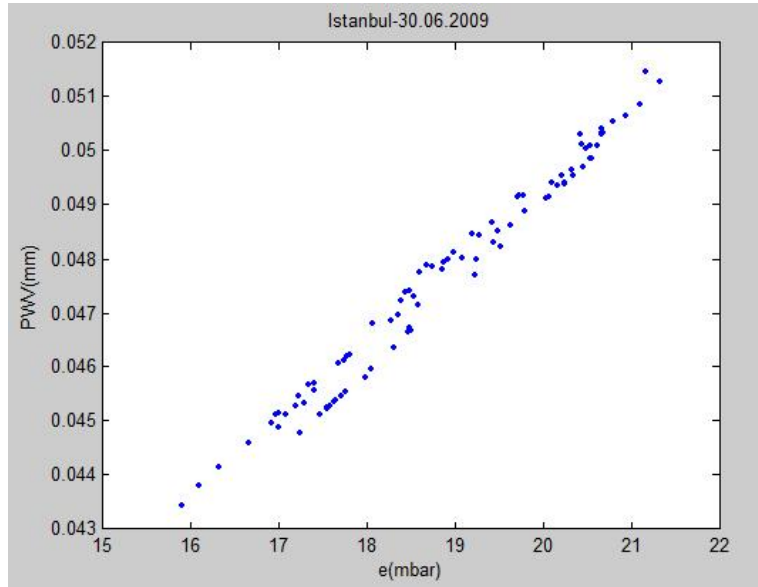
ekil (A.9) ve (A.10)' da ISTA istasyonunun 2009 yılı 30 Mayıs gününün verileri kullanılarak kar ıla tırma yapılmı tır.

## Model Denklem



ekil A.11

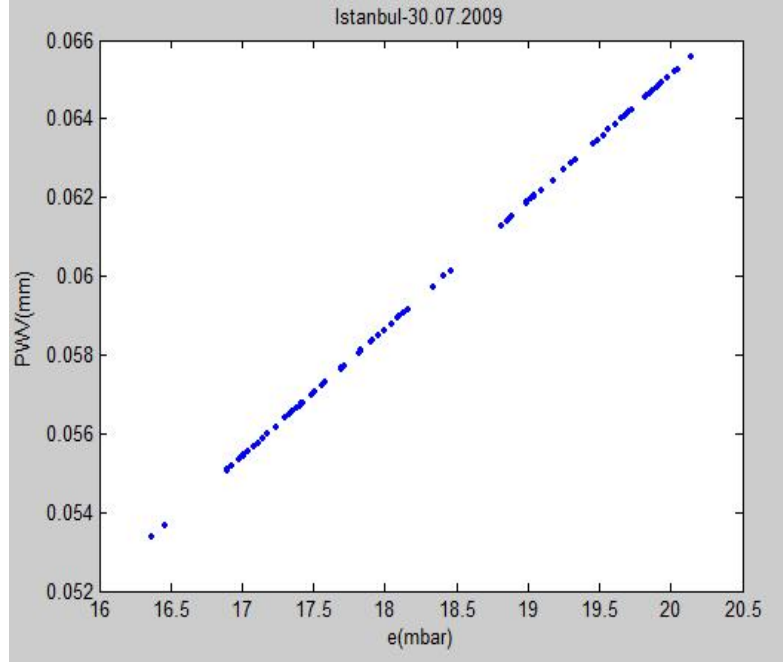
## Mendes ZWD Modeli



ekil A.12

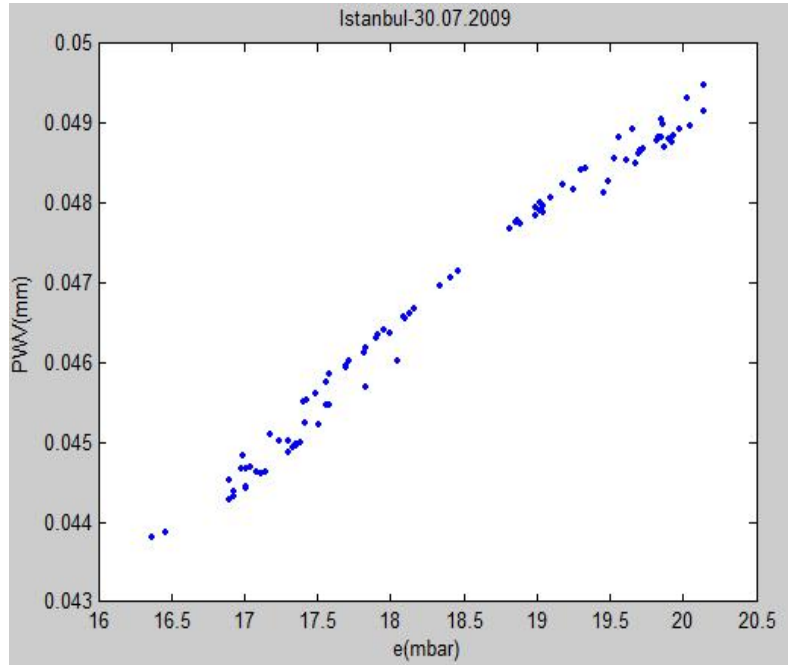
ekil (A.11) ve (A.12)' de ISTA istasyonunun 2009 yılı 30 Haziran gününün verileri kullanılarak kar ıla tırma yapılmı tır.

## Model Denklem



ekil A.13

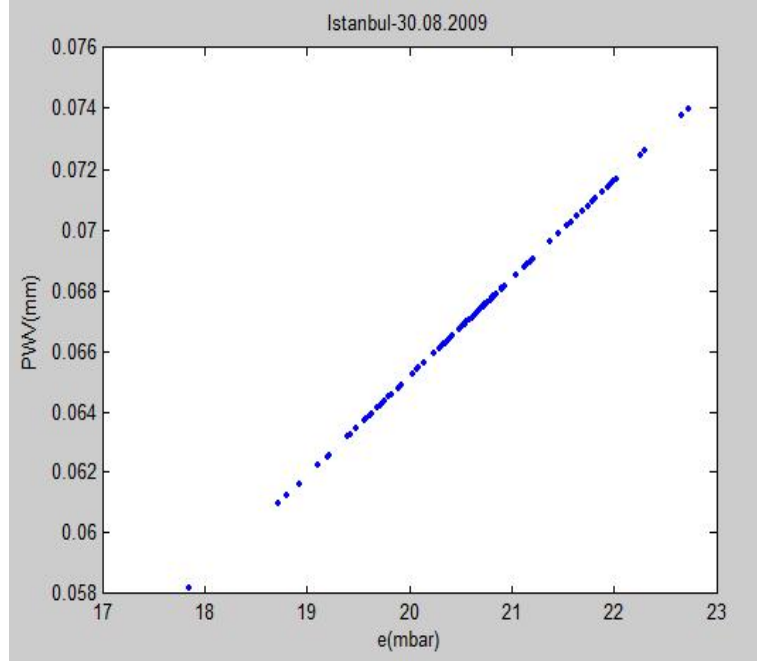
## Mendes ZWD Modeli



ekil A.14

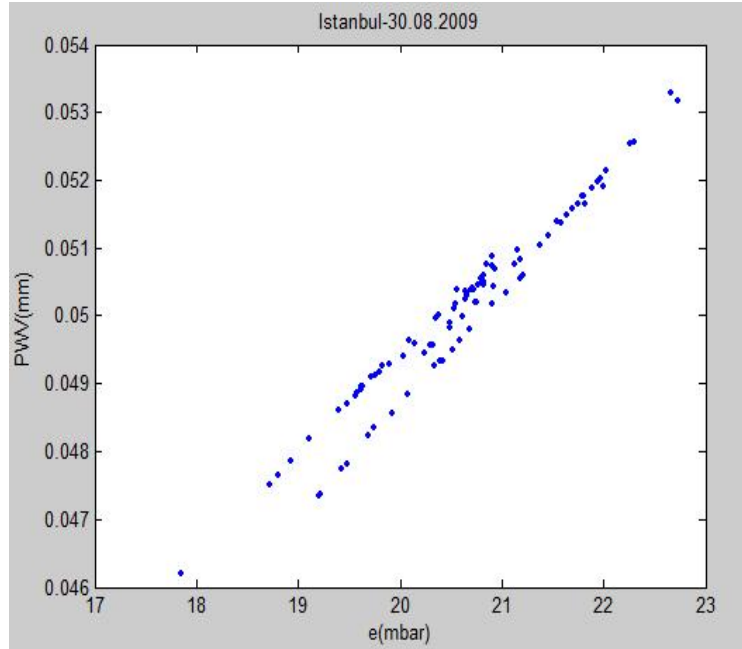
ekil (A.13) ve (A.14)' de ISTA istasyonunun 2009 yılı 30 Temmuz gününün verileri kullanılarak kar ıla tırma yapılmı tır.

## Model Denklem



ekil A.15

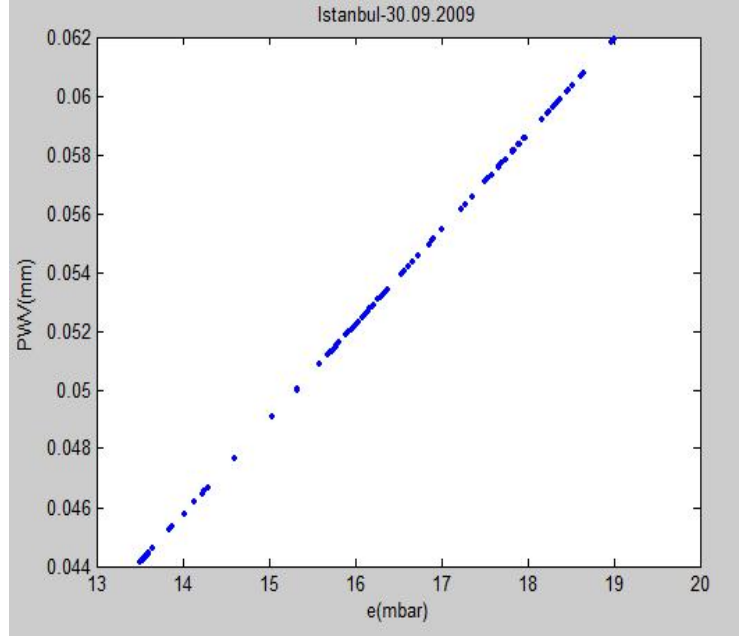
## Mendes ZWD Modeli



ekil A.16

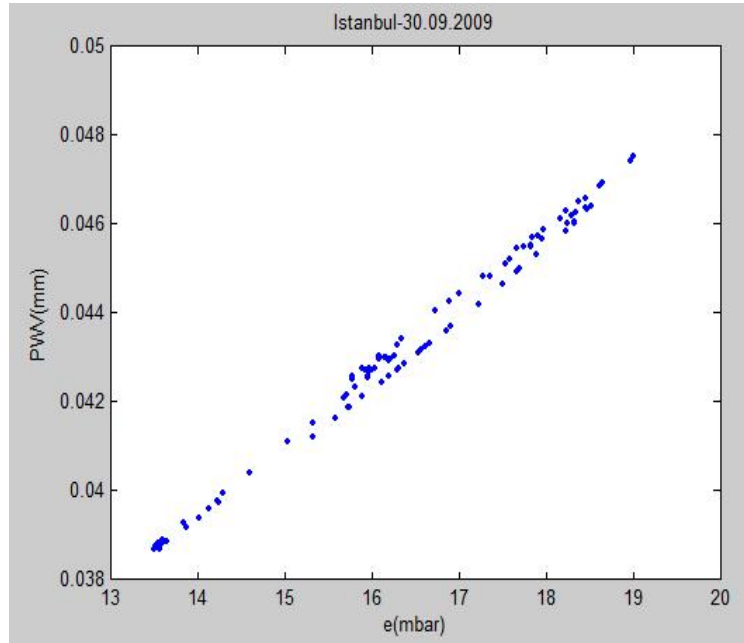
ekil (A.15) ve (A.16)' da ISTA istasyonunun 2009 yılı 30 A ustos gününün verileri kullanılarak kar ıla tırma yapılmı tır.

## Model Denklem



ekil A.17

## Mendes ZWD Modeli

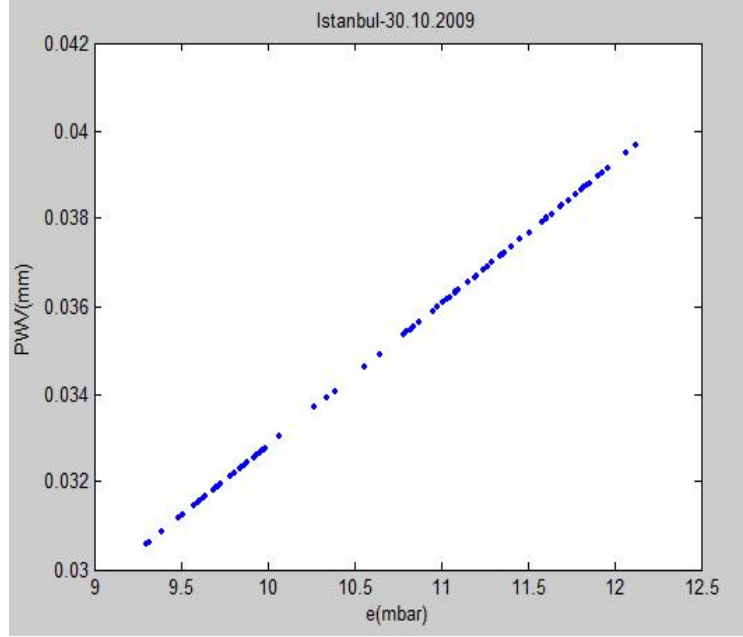


ekil A.18

ekil (A.17) ve (A.18)' da ISTA istasyonunun 2009 yılı 30 Eylül gününün verileri kullanılarak kar ıla tırma yapılmı tır.

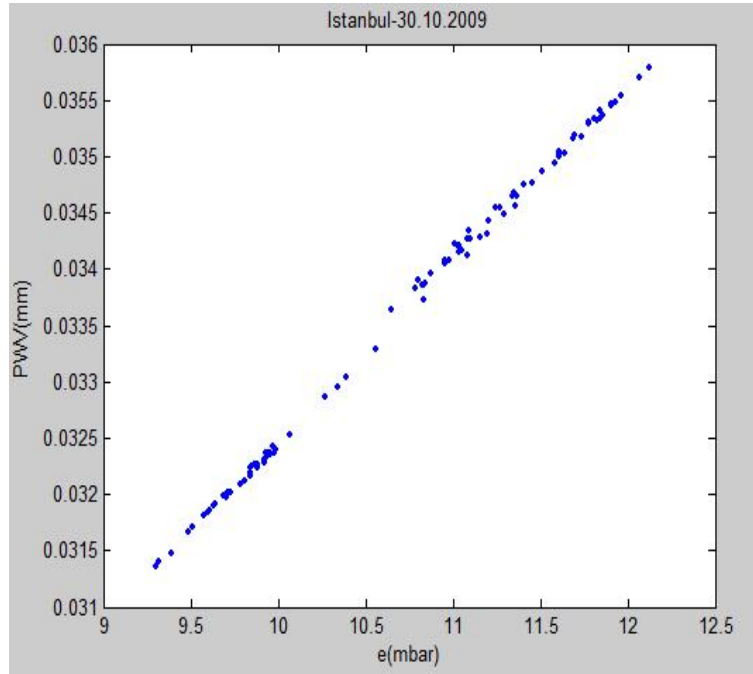


## Model Denklem



ekil A.19

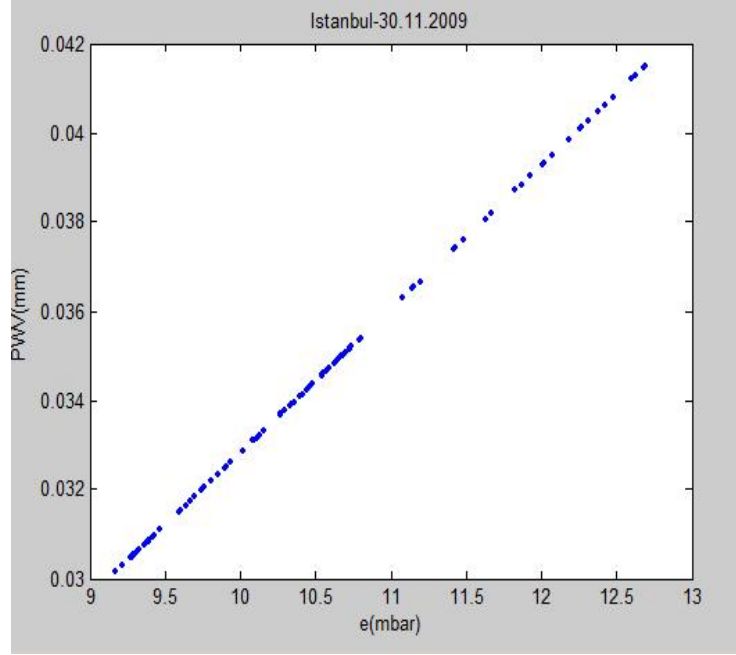
## Mendes ZWD Modeli



ekil A.20

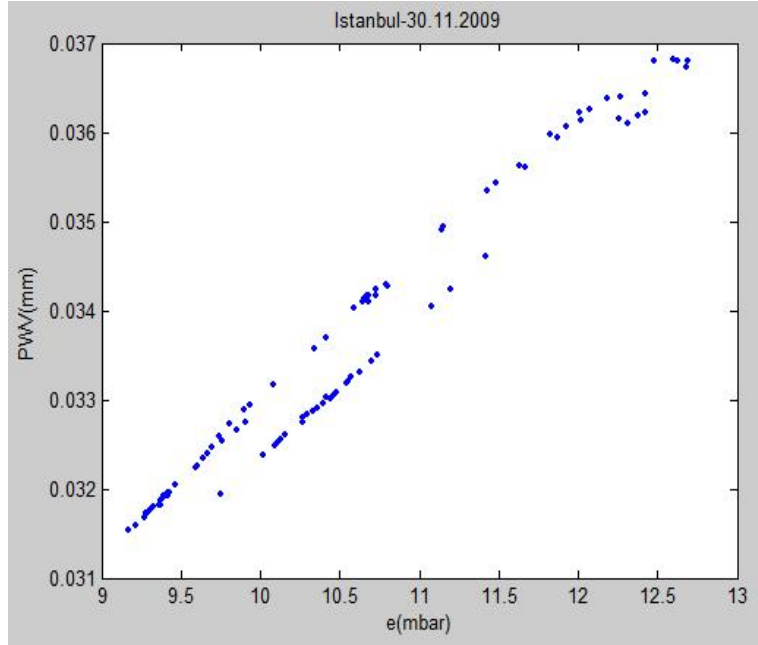
ekil (A.19) ve (A.20)' de ISTA istasyonunun 2009 yılı 30 Ekim gününün verileri kullanılarak kar ıla tırma yapılmı tır.

### Model Denklem



ekil A.21

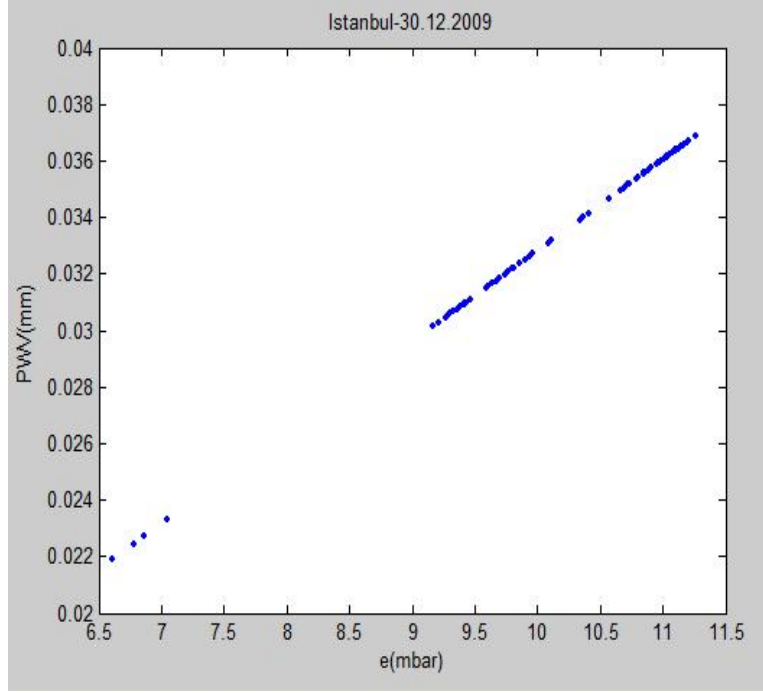
### Mendes ZWD Modeli



ekil A.22

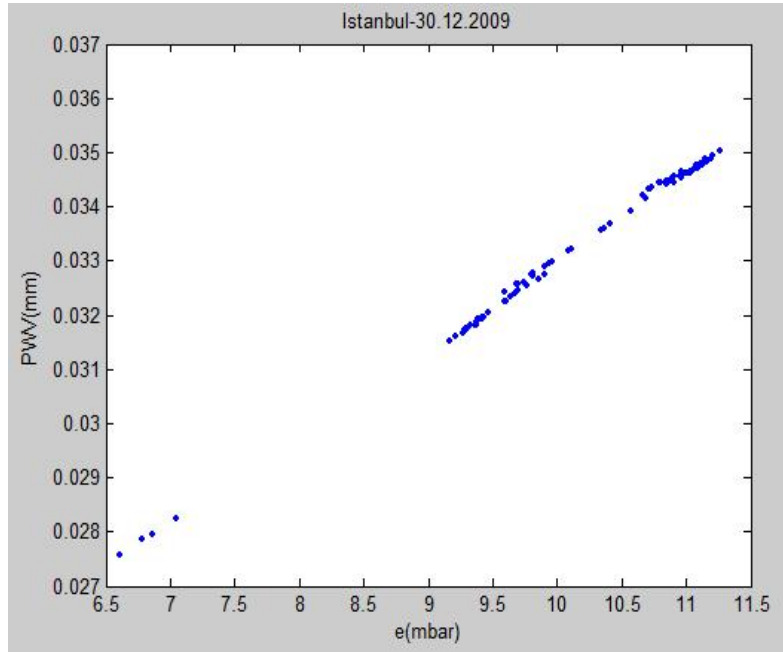
ekil (A.21) ve (A.22)' de ISTA istasyonunun 2009 yılı 30 Kasım gününün verileri kullanılarak kar ıla tırma yapılmı tır.

## Model Denklem



ekil A.23

## Mendes ZWD Modeli

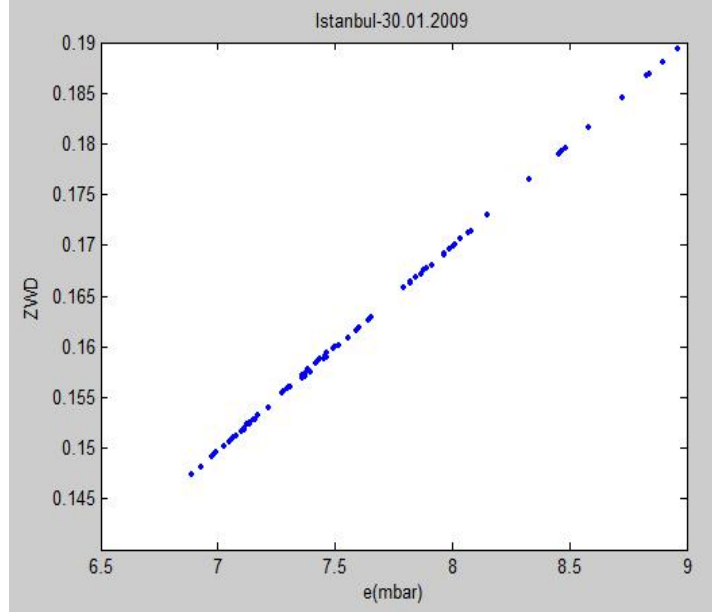


ekil A.24

ekil (A.23) ve (A.24)' te ISTA istasyonunun 2009 yılı 30 Aralık gününün verileri kullanılarak kar ıla tırma yapılmı tır.

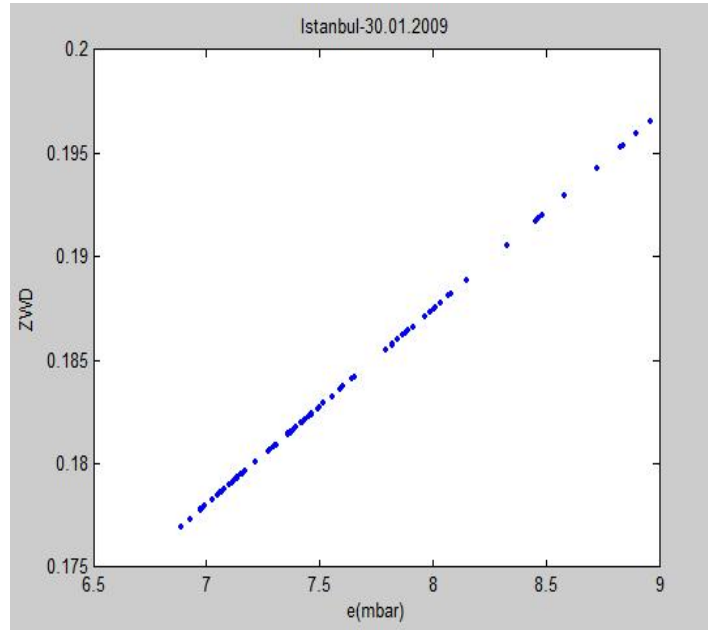
## EK B : Model Denklemler ile Mendes ZWD Modeli Grafiklerinin Karşılaştırılması

### Model Denklemler



ekil B.1

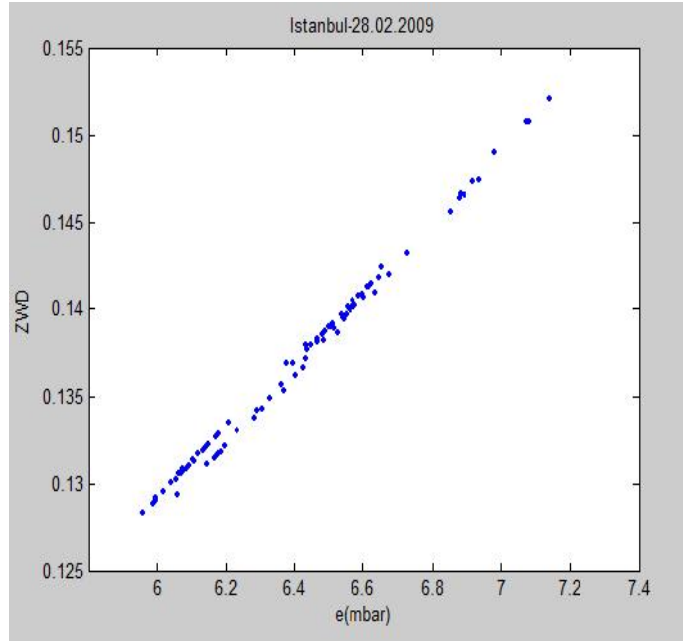
### Mendes ZWD Modeli



ekil B.2

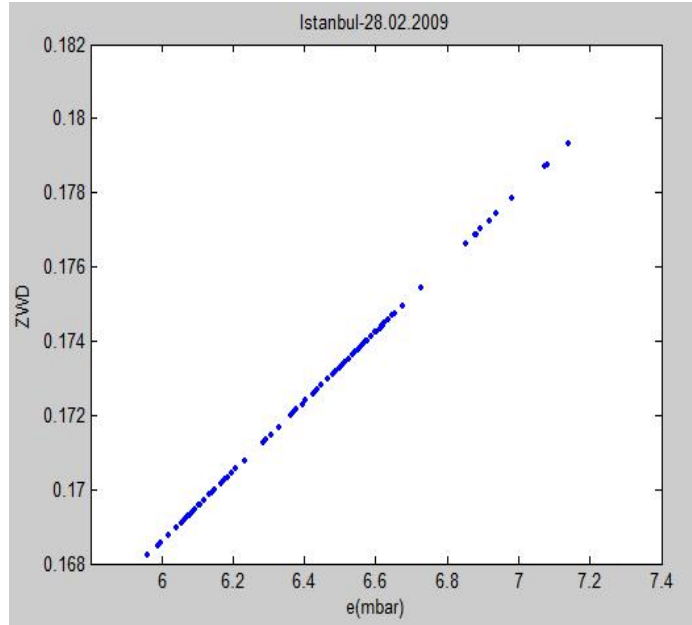
ekil (B.1) ve (B.2)' de ISTA istasyonunun 2009 yılı 30 Ocak gününün verileri kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır.

## Model Denklem



ekil B.3

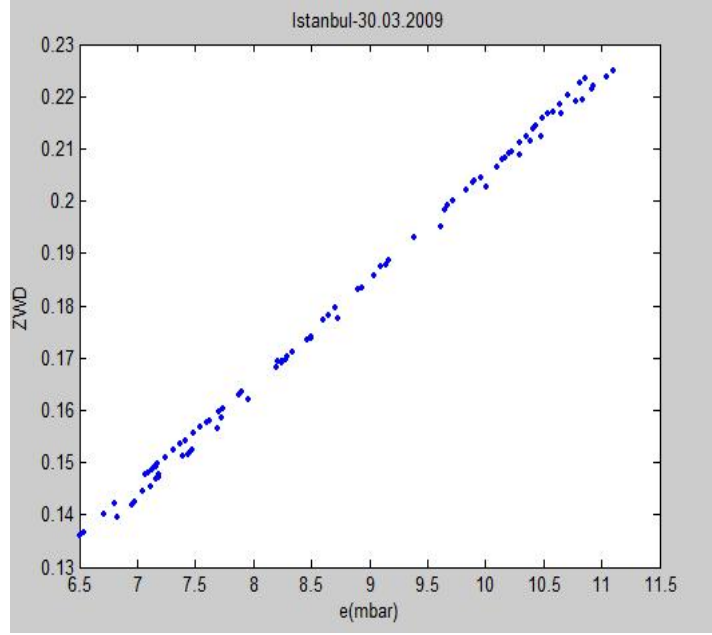
## Mendes ZWD Modeli



ekil B.4

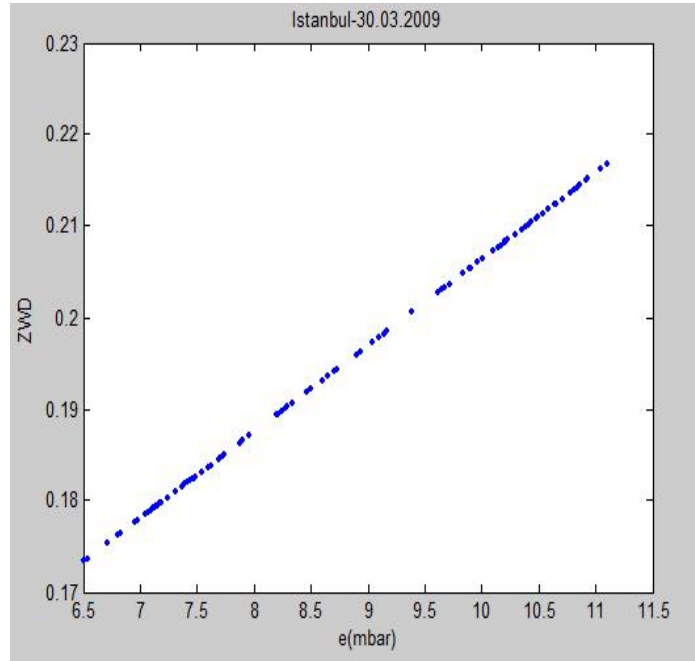
ekil (B.3) ve (B.4)' te ISTA istasyonunun 2009 yılı 28 ubat gününün verileri kullanılarak kar ıla tırma yapılmı tır.

## Model Denklem



ekil B.5

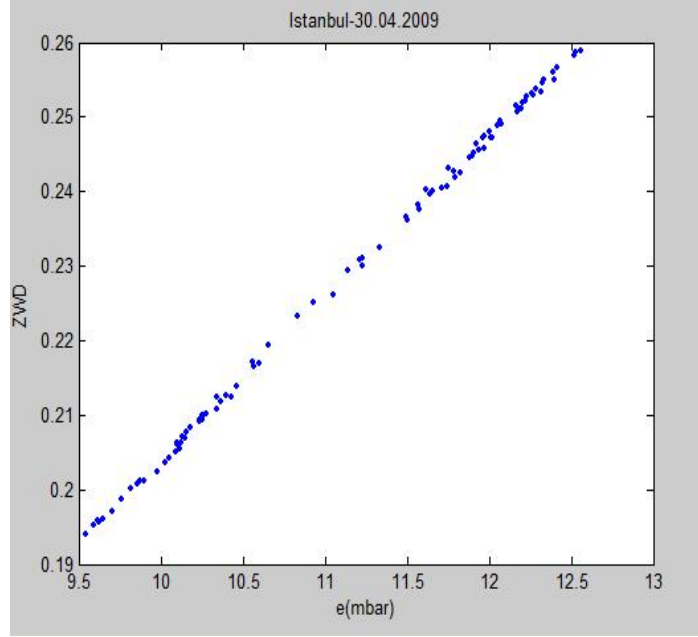
## Mendes ZWD Modeli



ekil B.6

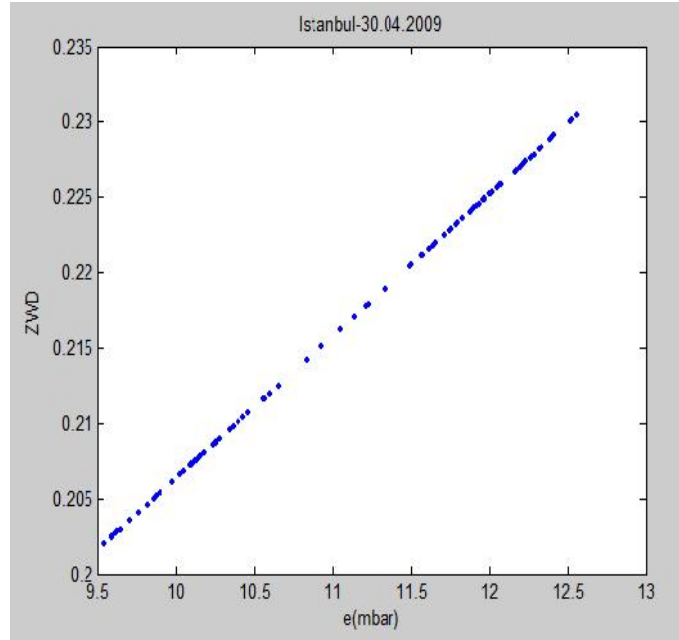
ekil (B.5) ve (B.6)' da ISTA istasyonunun 2009 yılı 30 Mart gününün verileri kullanılarak kar ıla tırma yapılmı tır.

## Model Denklemleri



ekil B.7

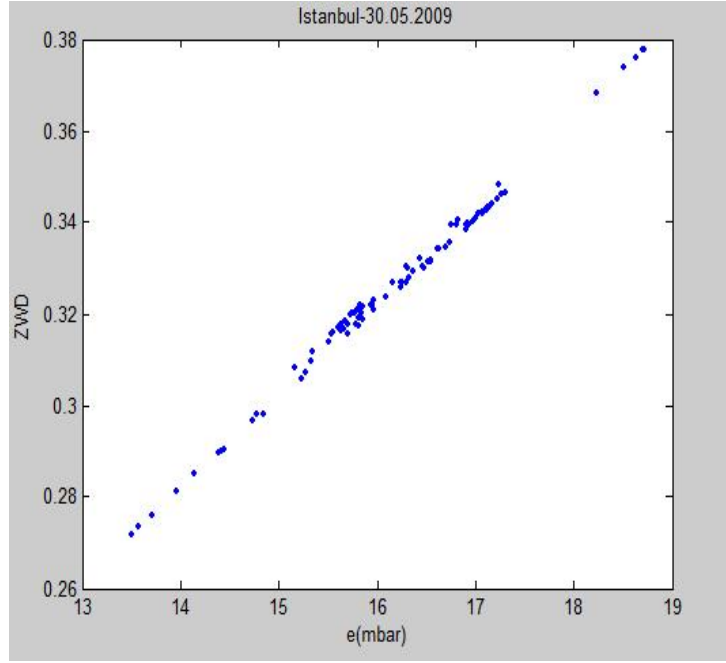
## Mendes ZWD Modeli



ekil B.8

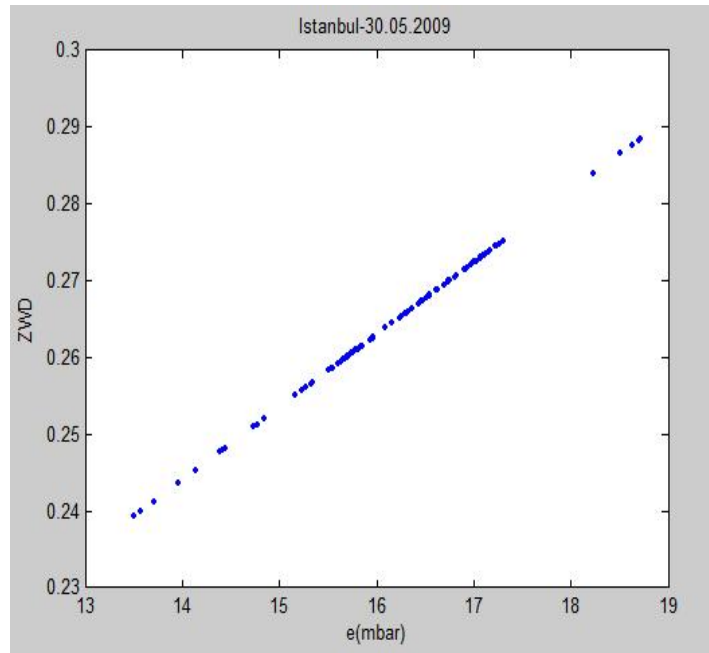
ekil (B.7) ve (B.8)' te ISTA istasyonunun 2009 yılı 30 Nisan gününün verileri kullanılarak kar ıla tırma yapılmı tır.

## Model Denklemleri



ekil B.9

## Mendes ZWD Modeli

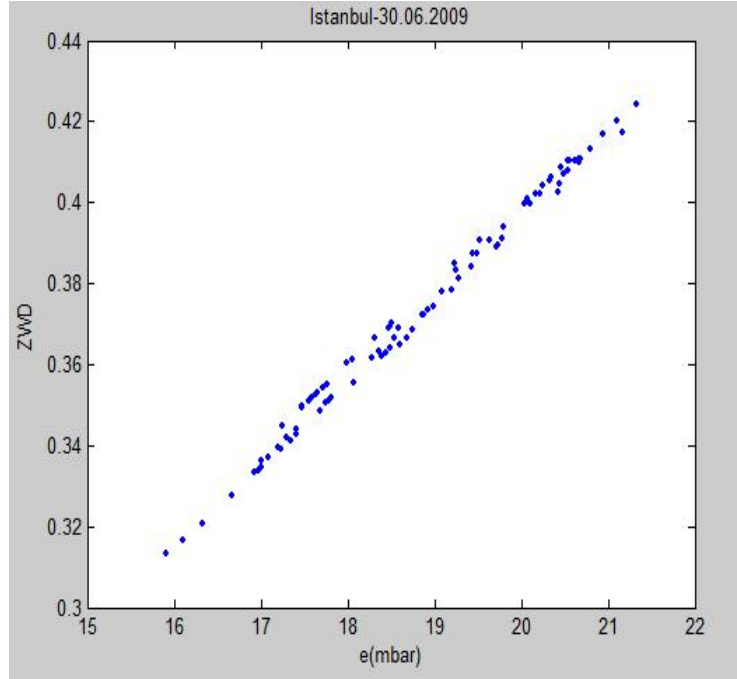


ekil B.10

ekil (B.9) ve (B.10)' da ISTA istasyonunun 2009 yılı 30 Mayıs gününün verileri kullanılarak kar ıla tırma yapılmı tır.

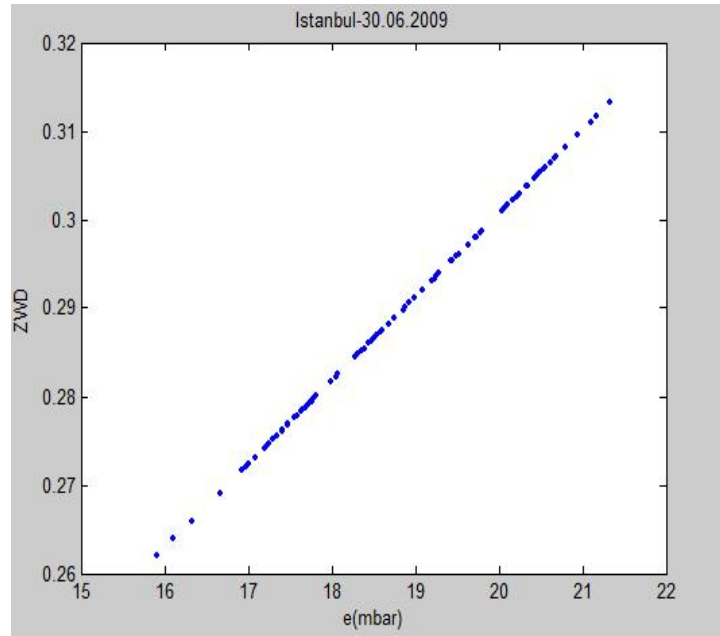


## Model Denklem



ekil B.11

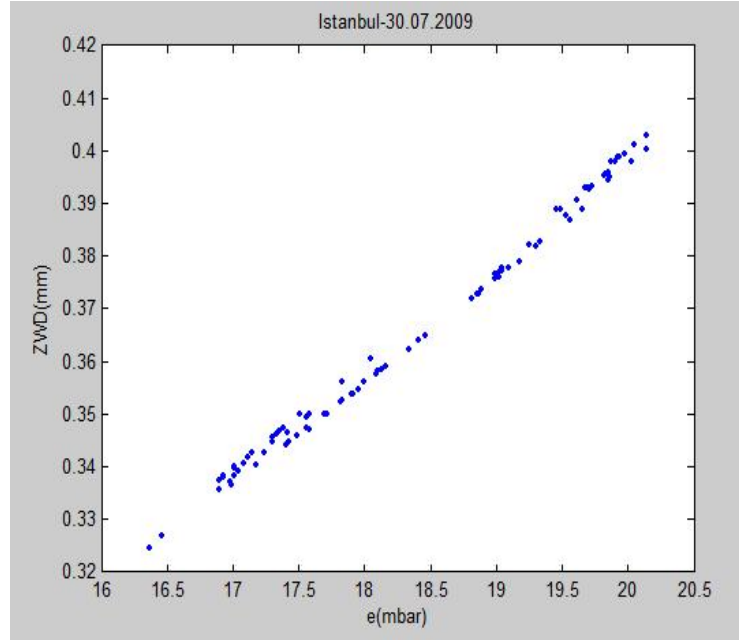
## Mendes ZWD Modeli



ekil B.12

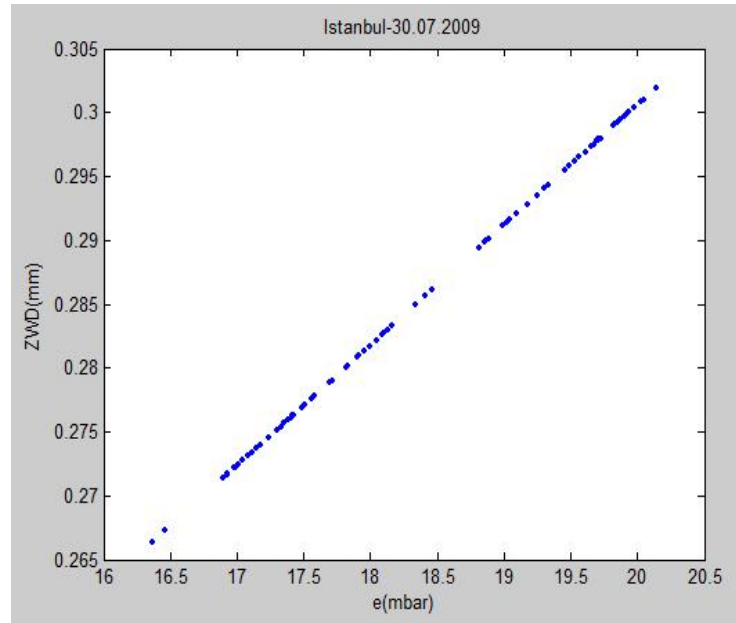
ekil (B.11) ve (B.12)' de ISTA istasyonunun 2009 yılı 30 Haziran gününün verileri kullanılarak kar ıla tırma yapılmı tır.

## Model Denklem



ekil B.13

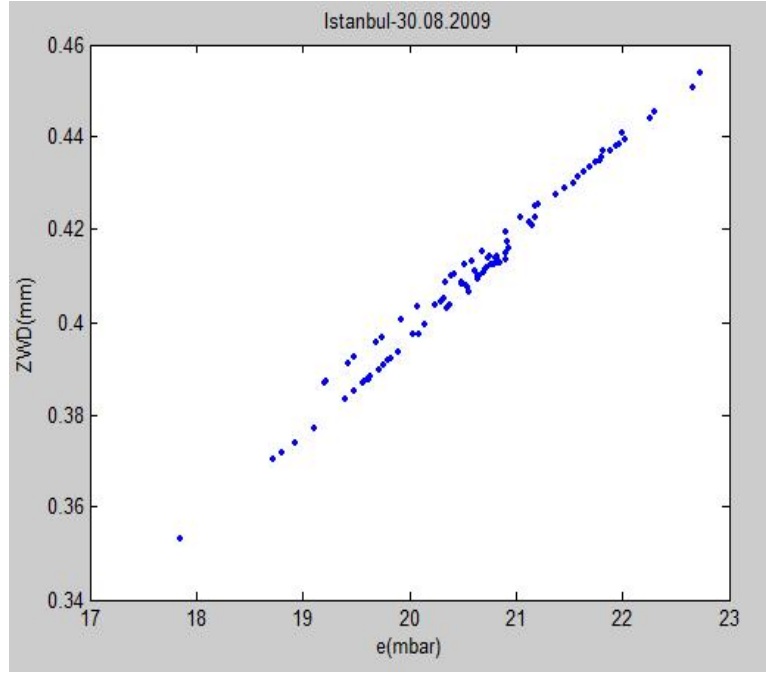
## Mendes ZWD Modeli



ekil B.14

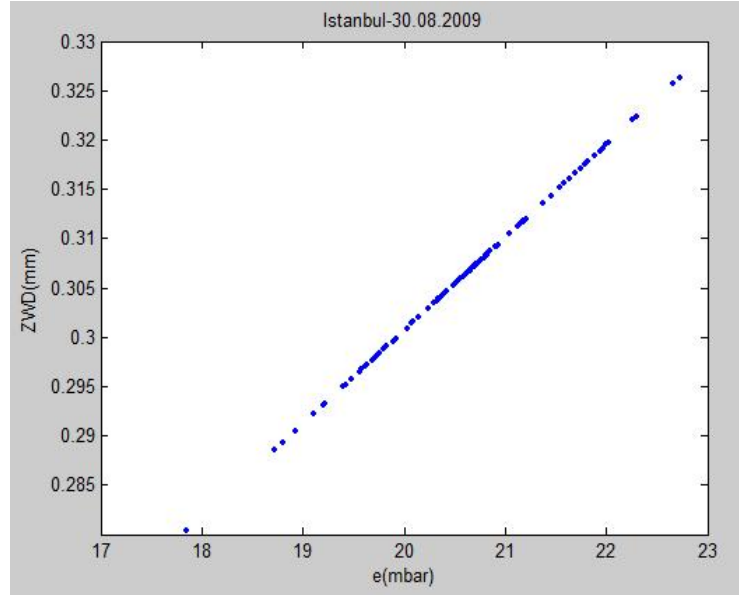
ekil (B.13) ve (B.14)' te ISTA istasyonunun 2009 yılı 30 Temmuz gününün verileri kullanılarak kar ıla tırma yapılmı tır.

### Model Denklem



ekil B.15

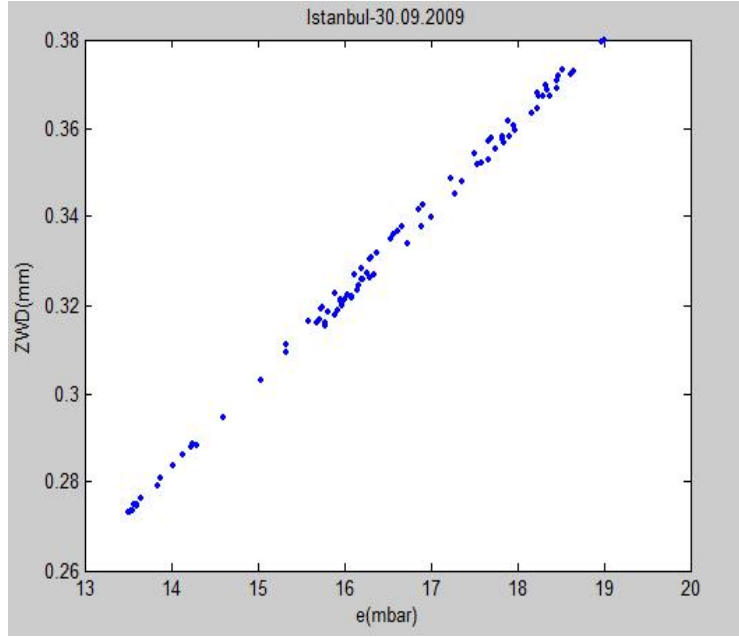
### Mendes ZWD Modeli



ekil B.16

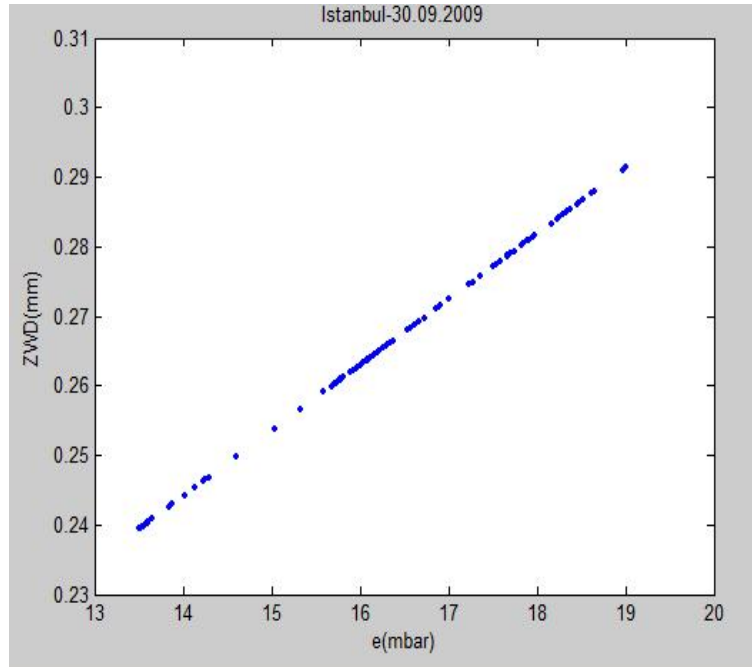
ekil (B.15) ve (B.16)' da ISTA istasyonunun 2009 yılı 30 A ustos gününün verileri kullanılarak kar ıla tırma yapılmı tır.

### Model Denklemler



ekil B.17

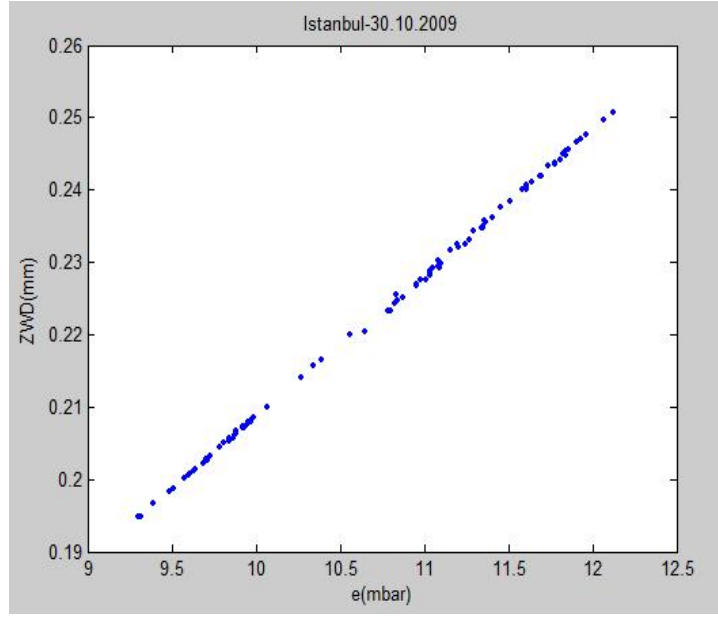
### Mendes ZWD Modeli



ekil B.18

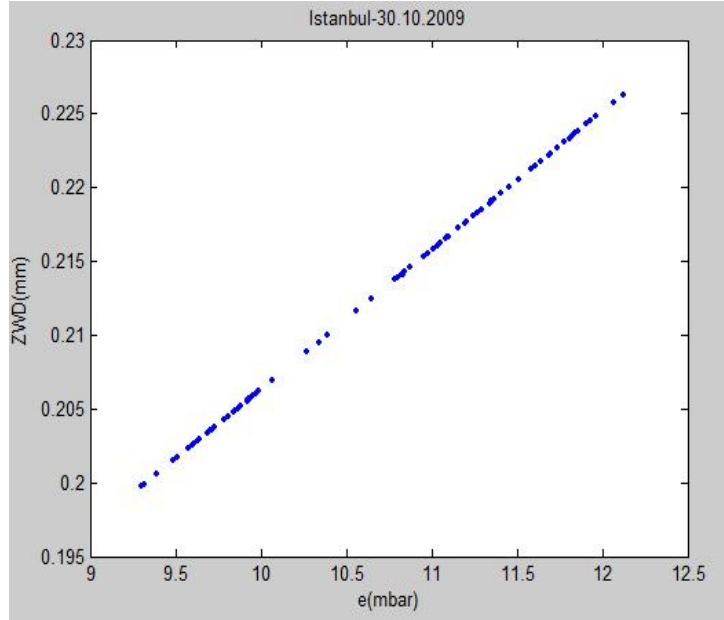
ekil (B.17) ve (B.18)' de ISTA istasyonunun 2009 yılı 30 Eylül gününün verileri kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır.

## Model Denklem



ekil B.19

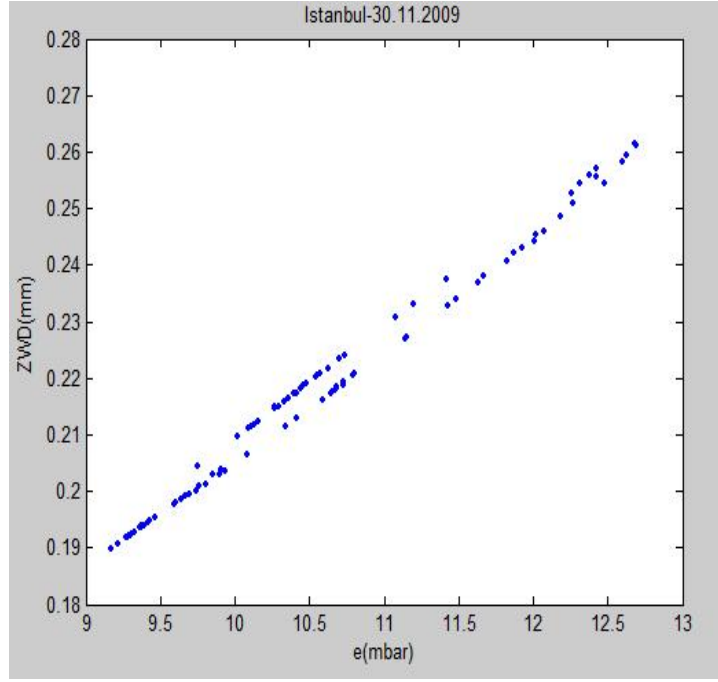
## Mendes ZWD Modeli



ekil B.20

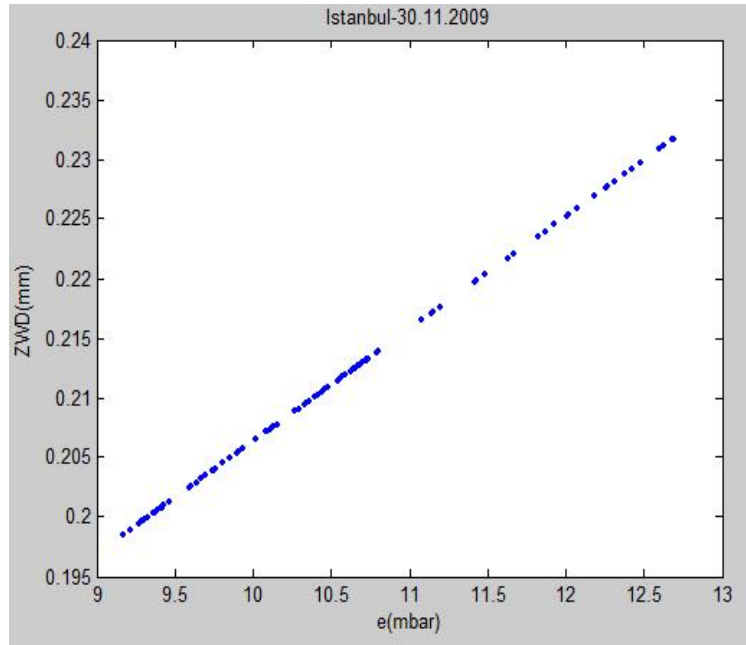
ekil (B.19) ve (B.20)' de ISTA istasyonunun 2009 yılı 30 Ekim gününün verileri kullanılarak kar ıla tırma yapılmı tır.

### Model Denklem



ekil B.21

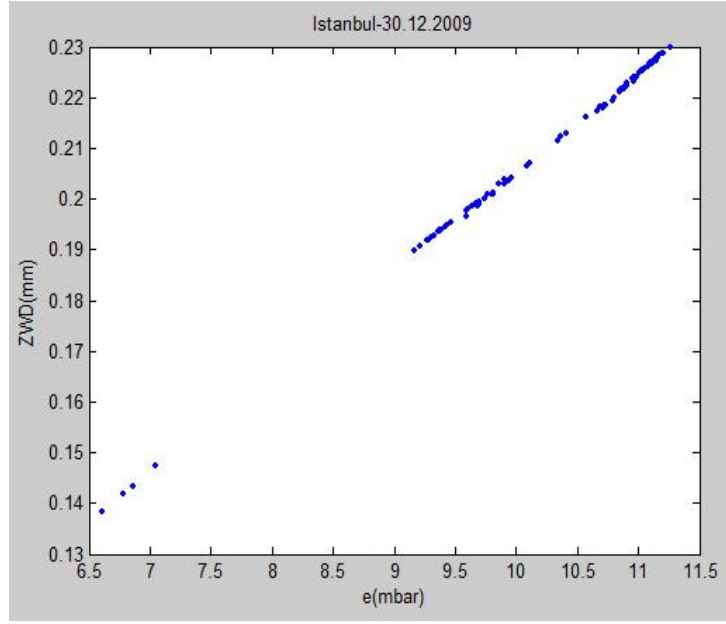
### Mendes ZWD Modeli



ekil B.22

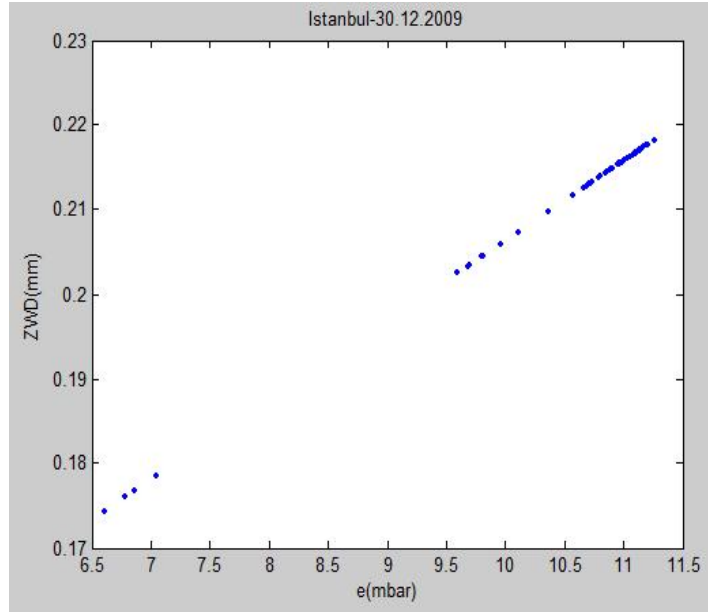
ekil (B.21) ve (B.22)' de ISTA istasyonunun 2009 yılı 30 Kasım gününün verileri kullanılarak kar ıla tırma yapılmı tır.

## Model Denklem



ekil B.23

## Mendes ZWD Modeli



ekil B.24

ekil (B.23) ve (B.24)' te ISTA istasyonunun 2009 yılı 30 Aralık gününün verileri kullanılarak kar ıla tırma yapılmı tır.