

**BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SÜREKLİ GÖZLEM YAPAN GNSS AĞLARI İLE SU BUHARININ YÜKSEK  
DOĞRULUKLU OLARAK MODELLENMESİ**

**GEOMATİK MÜHENDİSLİĞİ**

**DOKTORA TEZİ**

**İLKE DENİZ**

**EKİM 2016**

**BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SÜREKLİ GÖZLEM YAPAN GNSS AĞLARI İLE SU BUHARININ YÜKSEK  
DOĞRULUKLU OLARAK MODELLENMESİ**

**GEOMATİK MÜHENDİSLİĞİ**

**DOKTORA TEZİ**

**İlke DENİZ**

**DANIŞMAN: Doç. Dr. Çetin MEKİK**

**ZONGULDAK**

**Ekim 2016**

**KABUL:**

İlke DENİZ tarafından hazırlanan “Sürekli Gözlem Yapan GNSS Ağları ile Su Buharının Yüksek Doğruluklu Olarak Modellenmesi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 28/10/2016

**Danışman:** Doç. Dr. Çetin MEKİK

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü



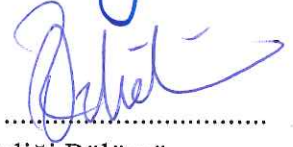
**Üye:** Prof. Dr. Şenol Hakan KUTOĞLU

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü



**Üye:** Doç. Dr. Mustafa Tefik ÖZLÜDEMİR

İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü



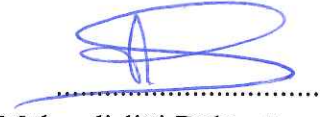
**Üye:** Yrd. Doç. Dr. Emine TANIR KAYIKÇI

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü



**Üye:** Yrd. Doç. Dr. Kurtuluş Sedar GÖRMÜŞ

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü



**ONAY:**

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım. ..../..../2016



Prof. Dr. Baki HAZER  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*



İlke DENİZ

## **ÖZET**

**Doktora Tezi**

### **SÜREKLİ GÖZLEM YAPAN GNSS AĞLARI İLE SU BUHARININ YÜKSEK DOĞRULUKLU OLARAK MODELLENMESİ**

**İlke DENİZ**

**Bülent Ecevit Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Çetin MEKİK**

**Ekim 2016, 119 sayfa**

İklim değişimlerinin olumsuz etkileri, sürdürülebilir kalkınma çerçevesinde iklim ve meteorolojik tahmin araştırmalarını ön plana çıkarmıştır. En önemli meteorolojik parametrelerden biri olan yoğuşabilir su buharının konumsal ve zamansal olarak yüksek doğruluklarla, sürekli GNSS istasyonlar ağlarında belirlenmesi ve izlenmesi olanakları ise GNSS meteorolojisi çalışmalarının gelişmesine neden olmuştur.

Bu çalışmada, TUSAGA-Aktif Ağının bir GNSS meteorolojisi ağı olarak da görev yapabilmesi için, toplam zenit gecikmesi değerlerinin (ZTD) yoğuşabilir su buharına (PWV) dönüştürülmesinde temel parametreler olan ağırlıklı ortalama sıcaklık  $T_m$  veya  $Q$  dönüşüm faktörü tüm Türkiye için geliştirilmiştir. Türkiye'deki 8 radyosonda istasyonunun 2011 yılına ait profil gözlemlerinin analiziyle  $T_m$  ve  $Q$  modelleri geliştirilmiş ve bu modeller; Ankara ve İstanbul'daki GNSS-RS istasyonlarında hesaplanan yaklaşık 1 yıllık  $PWV_{GNSS}$  ile  $PWV_{RS}$  değerlerinin karşılaştırılmasıyla test edilmiştir.

## ÖZET (devam ediyor)

Tüm Türkiye için ağırlıklı ortalama sıcaklık  $T_m = 48,55+0,80T_s \pm 2,57$  K ve istasyon yüksekliğiyle genişletilmiş hibrit Q modeli % 1,2 presizyonla geliştirilmiştir.

Ankara ve İstanbul GNSS-RS istasyonlarında yapılan karşılaştırma sonuçları; tüm Türkiye için geliştirilen  $T_m$  modeli ile ortalama  $\pm 1,72$  mm ve hibrit Q modeli ile  $\pm 1,65$  mm doğrulukla yoğuşabilir su buharı kestirimi yapılabileceğini göstermiştir.

Küresel harmonik fonksiyonlarla; sıcaklık, basınç, nemlilik, toplam zenit gecikmesi ve yoğuşabilir su buharının, meteoroloji istasyonları ve TUSAGA-Aktif istasyonlarından seçilen  $2^\circ \times 2^\circ$  boyutlarındaki test ağlarında modellenmesi ve enterpolasyonu araştırılmıştır. Test ağlarında;  $\pm 1,70$  K sıcaklık,  $\pm 1,74$  hPa basınç,  $\pm \% 8,7$  nemlilik,  $\pm 12,8$  mm toplam zenit gecikmesi ve  $\pm 2,0$  mm yoğuşabilir su buharı modellemesi ve enterpolasyonu presizyonları elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** TUSAGA-Aktif, GPS Meteorolojisi, GPS-MET, Yoğuşabilir Su Buharı, Ağırlıklı Ortalama Sıcaklık, Dönüşüm Faktörü, Toplam Zenit Gecikmesi, Islak Zenit Gecikmesi.

**Bilim Kodu:** 616.01.00.

## **ABSTRACT**

**Ph. D. Thesis**

# **HIGH-ACCURACY MODELING OF WATER VAPOR FROM CONTINUOUS GNSS NETWORKS**

**İlke DENİZ**

**Bülent Ecevit University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Geomatics Engineering**

**Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Çetin MEKİK**

**October 2016, 119 pages**

The adverse effects of climate change have brought about climate and meteorological forecasting research within the framework of sustainable development. Opportunities regarding the estimation and monitoring of the precipitable water vapor which is one of the most important meteorological parameters using continuously operating GNSS at high spatial and temporal accuracy have become popular on the studies of GNSS Meteorology.

The weighted mean temperature  $T_m$  and the conversion factor  $Q$  are the basic parameters in the conversion between Total Zenith Delay (ZTD) and Precipitable Water Vapor (PWV). In this study, in order to use TUSAGA-Active as a GNSS-MET network,  $T_m$  and  $Q$  models were developed for Turkey. These parameters were estimated with the analysis of radiosonde profile observations at 8 Turkish radiosonde stations for the year 2011. The verification of these models was tested by comparing approximately one year of  $PWV_{GNSS}$  and  $PWV_{RS}$  observations at Ankara and Istanbul RS-GNSS stations.

## ABSTRACT (continued)

$T_m = 48.55 + 0.80 T_s \pm 2.57$  K model and hybrid Q model with extended height of the station was developed with 1.2 % precision for Turkey.

The results of the comparison between Ankara and Istanbul GNSS-RS stations showed that the precipitable water vapor can be estimated with  $\pm 1.72$  mm mean accuracy by all the developed  $T_m$  models and with  $\pm 1.65$  mm mean accuracy by the hybrid Q model.

The spherical harmonic function; temperature, pressure, humidity, water vapor can condense the total zenith delay and of the selected size in the modeling of  $2^\circ \times 2^\circ$  test network and interpolation is investigated.

Modelling and interpolation of temperature, pressure, humidity, total zenith delay and precipitable water vapor on the  $2^\circ \times 2^\circ$  test network covering selected meteorological and TUSAGA-Active stations using spherical harmonic functions were investigated. In the  $2^\circ \times 2^\circ$  test network, temperature, pressure, humidity, total zenith delay and precipitable water vapor were obtained with  $\pm 1,70$  K,  $\pm 1,74$  hPa,  $\pm 8,7$  %,  $\pm 12,8$  mm and  $\pm 2,0$  mm precision, respectively.

**Keywords:** TUSAGA-Active, GPS Meteorology, GPS-MET, Precipitable Water Vapor, Weighted Mean Temperature, Conversion Factor, Total Zenith Delay, Wet Zenith Delay.

**Science Code:** 616.01.00.



## TEŞEKKÜR

Bu çalıőmamda bana yardımcı olan, “GPS ile Atmosferik Su Buharı Kestirimi” Projesinin yrtclgn yapan ve böylece projenin olanaklarından yararlanmamı sağlayan Doç. Dr. etin MEKİK hocama teşekkür ederim. Bu projenin yürütülmesinde katkıda bulunan araőtırmacılar, Prof. Dr. Bahadır AKTUĞ’a, Doç. Dr. M. Tefik ÖZLÜDEMİR’e, Yrd. Doç. Dr. K. Sedar GÖRMÜŞ’e, Müh. İsmail MERT’e ve projeyi destekleyen TÜBİTAK’a teşekkür ederim.

Bu projede birlikte çalıőtıėım bursiyer meslektaőım Arő. Gör. Gökhan GÜRBÜZ’e katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Çalıőmamı destekleyen arkadaőım ve meslektaőım Arő. Gör. Nevin Betül AVŐAR’a teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olduklarını hissettiğim anneme, babama ayrıca teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL .....	ii
ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xv
EK AÇIKLAMALAR DİZİNİ.....	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xix
BÖLÜM 1 GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 GNSS İLE YOĞUŞABİLİR SU BUHARI KESTİRİMİNİN FİZİKSEL VE MATEMATİKSEL ESASLARI.....	7
2.1 TROPOFERDE MİKRODALGALARIN YAYILMASININ FİZİKSEL ESASLARI 7	
2.1.1 Toplam Zenit Gecikmesi İle Yoğuşabilir Su Buharının Hesabı .....	11
2.2 GNSS İLE TOPLAM ZENİT GECİKMESİNİN KESTİRİMİ.....	13
2.3 ZAMAN SERİLERİNİN SPEKTRAL ANALİZİ .....	17
2.4 KÜRESEL HARMONİK FONKSİYONLARLA NÜMERİK MODELLEMENİN MATEMATİKSEL ESASLARI.....	20
BÖLÜM 3 GEREÇLER VE YÖNTEMLER.....	25
3.1 GNSS'İN GÜNCEL DURUMU .....	25
3.2 RAVINSONDE GÖZLEMLERİ VE RADYOSONDA İSTASYONLARI .....	28
3.2.1 Veri Kayıtları ve Veri Formatı .....	31
3.3 RADYOSONDA VERİLERİNİN ANALİZİ.....	31

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
3.4 GNSS İLE SU BUHARI KESTİRİMİ .....	39
<b>BÖLÜM 4 ANALİZ VE MODELLEME ÇALIŞMALARI</b> .....	<b>45</b>
4.1 PROFİL ANALİZLERİ.....	45
4.1.1 Radyosonda Profillerinin Ağırlıklı Ortalama Sıcaklıklarının ( $T_m$ ) Hesabı .....	45
4.1.2 $T_m$ - $T_s$ Lineer Bağıntısının Çıkarılması .....	46
4.2 Q DÖNÜŞÜM FAKTÖRÜNÜN MODELLENMESİ.....	51
<b>BÖLÜM 5 GELİŞTİRİLEN <math>T_m</math> VE Q MODELLERİNİN GNSS VERİLERİ İLE DOĞRULANMASI ÇALIŞMALARI</b> .....	<b>59</b>
5.1 GNSS GÖZLEMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ, $PWV_{GNSS}$ AĞININ SEÇİMİ .	59
5.2 GNSS GÖZLEMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ STRATEJİLERİ .....	60
5.3 GNSS İLE SU BUHARI KESTİRİMİNİN HATA ANALİZİ.....	62
5.3.1 Hata Yayılma Yasasına Göre Analiz, Presizyon Araştırması .....	62
5.3.1.1 Toplam Zenit Gecikmesinin Karesel Ortalama Hatasının ( $m_{ZTD}$ ) Belirlenmesi ...	62
5.3.1.2 Kuru veya Hidrostatik Bileşenin Oransal Hatalarının Toplamı.....	63
5.3.1.3 Dönüşüm Faktörü Hatasının $PWV$ 'ye Etkisi .....	64
5.3.1.4 GNSS İle $PWV$ 'nin Elde Edilme Sürecinin Hata Analizi .....	65
5.3.2 Uzun Süreli $PWV_{RS}$ ile $PWV_{GNSS}$ Farklarının Analizlerinde, Radyosondaya Göre, $PWV$ 'nin Karesel Ortalama Hatasının Belirlenmesi ve Doğruluk Araştırması .....	66
5.4 $T_m$ MODELLERİYLE HESAPLANAN $PWV_{GNSS}$ VE $PWV_{RS}$ 'LERİN KARŞILAŞTIRILMASI .....	67
5.5 Q MODELLEYLE HESAPLANAN $PWV_{GNSS}$ VE $PWV_{RS}$ 'LERİN KARŞILAŞTIRILMASI .....	71
<b>BÖLÜM 6 TEST AĞI ÇALIŞMALARI</b> .....	<b>75</b>
6.1 TEST 1 AĞININ SEÇİMİ.....	76

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

6.2 METEOROLOJİK PARAMETRELERİN KÜRESEL HARMONİK FONKSİYONLARLA MODELLENMESİ VE ENTERPOLASYONU YAZILIMI....	76
6.3 TEST 2 AĞININ SEÇİMİ.....	82
6.4 TEST 2 AĞININ TUSAGA-AKTİF İSTASYONLARININ GNSS VERİLERİ .....	84
6.5 TEST 2 AĞINDA TOPLAM ZENİT GECİKMESİNİN (ZTD) VE YOĞUŞABİLİR SU BUHARININ (PWV) MODELLENMESİ ÇALIŞMALARI .....	84
BÖLÜM 7 SONUÇ VE ÖNERİLER.....	89
KAYNAKLAR.....	95
BİBLİYOGRAFYA .....	103
EK AÇIKLAMALAR .....	105
EK A: Radyosonda Profil Analizi MATLAB Kodu .....	105
EK B: Küresel Harmonik Analizi MATLAB Kodu.....	111
EK C: PWV Hesabı İçin MATLAB Kodu.....	117
ÖZGEÇMİŞ .....	119



## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1	Mikrodalga yayılmasının geometrisi.....	8
Şekil 3.1	Dünya genelinde 1500 IGRA istasyonu.....	28
Şekil 3.2	Radyosonda balonu.....	29
Şekil 3.3	Türkiye radyosonda istasyonlarının dağılımı.....	30
Şekil 3.4	Radyosonda sıcaklık profili analizi algoritmasının akış diyagramı. ....	36
Şekil 3.5	Adana, Erzurum, Isparta ve İzmir radyosonda sıcaklık profil örnekleri. ....	37
Şekil 3.6	Tüm radyosonda istasyonları için $PWV_{RS} - PWV_{alg}$ farkları. ....	38
Şekil 3.7	NOAA ağı.....	39
Şekil 3.8	E-GVAP GNSS ağı.....	41
Şekil 3.9	SuomiNet ağı.....	42
Şekil 3.10	GEONET ağı.....	43
Şekil 4.1	Tüm Türkiye için $T_m - T_s$ grafiği.....	47
Şekil 4.2	Tüm radyosonda istasyonlarında elde edilen Q dönüşüm faktörleri grafiği. ....	52
Şekil 4.3	Radyosonda istasyonlarının Q periodogramları. ....	55
Şekil 4.4	Tüm Türkiye için Q periodogramı. ....	55
Şekil 5.1	GANM ve GISM GNSS istasyonları.....	59
Şekil 5.2	PWV kestiriminde kullanılan jeodezik ağ.....	60
Şekil 5.3	GANM ve GISM istasyonlarının $PWV_{GNSS}$ değerleri.....	68
Şekil 5.4	GANM ve GISM istasyonlarında $PWV_{GNSS}$ ile $PWV_{RS}$ arasındaki farklar.....	70
Şekil 5.5	Ankara ve İstanbul istasyonlarında Bernese GNSS Software v5.0 ile hesaplanan $PWV_{RS} - PWV_{GNSS}$ farklarının grafikleri. ....	73
Şekil 5.6	Ankara ve İstanbul istasyonlarında GAMIT/GLOBK ile hesaplanan $PWV_{RS} - PWV_{GNSS}$ farklarının grafikleri.....	74
Şekil 6.1	Test 1 ağı.....	76
Şekil 6.2	Tikhonov algoritmasına göre L şekli grafiği. ....	79
Şekil 6.3	Yazılım akış diyagramı. ....	80
Şekil 6.4	Test 2 ağı. ....	83
Şekil 6.5	GNSS-MET ağı.....	84

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
Şekil 6.6	Test 2 ağında hesaplanan PWV değerleri örnekleri: 1 Ağustos 2013 (a) saat 6, (b) saat 9, (c) saat 12, (d) saat 15 ve (e) saat 18. ....	85
Şekil 6.7	GNSS-MET ağında toplam zenit gecikmesi dağılımı 19 Ağustos 2013 (a) saat 6, (b) saat 9, (c) saat 12, (d) saat 15 ve (e) saat 18. ....	87
Şekil 6.8	GNSS-MET ağında yoğuşabilir su buharı dağılımı 19 Ağustos 2013 (a) saat 6, (b) saat 9, (c) saat 12, (d) saat 15 ve (e) saat 18.....	88



## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 İzdüşüm fonksiyonlarının temel özellikleri .....	15
Çizelge 3.1 Global Navigasyon Uydu Sistemleri. ....	25
Çizelge 3.2 Bilimsel ve ticari yazılımlar. ....	27
Çizelge 3.3 Radyosondanın veri kayıt türü ve ölçüm doğrulukları.....	30
Çizelge 3.4 İnternet kaynaklarında bulunabilecek bir radyosonda çıktısı .....	31
Çizelge 3.5 İstanbul istasyonu için radyosonda analiz sonuçları. ....	38
Çizelge 4.1 Her bir istasyon için ve tüm istasyonlar için $T_m$ - $T_s$ lineer modeli katsayıları.....	48
Çizelge 4.2 $T_m$ modelindeki mevsimsel değişimleri. ....	48
Çizelge 4.3 $T_m$ modelindeki konumsal değişimleri.....	49
Çizelge 4.4 $T_m$ modelindeki gündüz-gece değişimleri.....	49
Çizelge 4.5 $T_m$ modellerinin test istatistiği. ....	49
Çizelge 4.6 $T_m$ - $T_s$ modelleri arasındaki farklar. ....	50
Çizelge 4.7 Q Modelleri katsayıları. ....	51
Çizelge 4.8 Q faktörünün trigonometrik Fourier serisi katsayıları. ....	53
Çizelge 4.9 Hesaplanan Q dönüşüm faktörleri modellerinin katsayıları. ....	57
Çizelge 5.1 Bernese GNSS Software v5.0 ve GAMIT/GLOBK yazılımlarında kullanılan değerlendirme stratejileri. ....	61
Çizelge 5.2 Hata analizi sonuçları.....	65
Çizelge 5.3 Su buharı radyometresi (WVR), güneş spektrometresi (SSM) ve radyosonda (RS) sistemleri ile GNSS arasındaki farklar .....	66
Çizelge 5.4 RS, GNSS ve WVR arasındaki ZWD ve PWV farkları .....	66
Çizelge 5.5 GISM ve GANM istasyonlarının tüm istasyonlar için geliştirilen $T_m$ modelinin Bernese GNSS Software v5.0 ile elde edilen sonuçlarının istatistiği ( $PWV_{RS}-PWV_{GNSS}$ ). ....	69
Çizelge 5.6 GISM ve GANM istasyonlarının tüm istasyonlar için geliştirilen $T_m$ modelinin GAMIT/GLOBK ile elde edilen sonuçlarının istatistiği ( $PWV_{RS}-PWV_{GNSS}$ ). ...	71
Çizelge 5.7 Ankara istasyonunda geliştirilen Q modelleri test istatistiği. ....	71
Çizelge 5.8 Ankara istasyonunda Emardson and Derks'in Q modelleri test istatistiği.....	72

## ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5.9 İstanbul istasyonunda geliştirilen Q modelleri test istatistiği. ....	72
Çizelge 5.10 İstanbul istasyonunda Emardson and Derks'in Q modelleri test istatistiği. ....	72
Çizelge 5.11 İstanbul ve Ankara istasyonlarında yükseklik parametresi eklenerek geliştirilen hibrit modelinin GAMIT/GLOBK ile elde edilen sonuçlarının istatistiği (PWV <sub>RS</sub> -PWV <sub>GNSS</sub> ). ....	74
Çizelge 6.1 $\lambda$ ve $m_0$ değerleri. ....	78
Çizelge 6.2 Test 1 ağı kontrol noktalarında, sıcaklık, basınç ve nemlilik enterpolasyonu sonuçları ....	81
Çizelge 6.3 Hata analizi sonuçları. ....	81

## EK AÇIKLAMALAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
EK A: Radyosonda Profil Analizi MATLAB Kodu .....	105
EK B: Küresel Harmonik Analizi MATLAB Kodu.....	111
EK C: PWV Hesabı İçin MATLAB Kodu.....	117



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

$\rho$	: Uydu-alıcı uzaklığı
$n$	: Kırılma indisi
$N$	: Kırıcılık
$R$	: Molar gaz sabiti
$m_w$	: Suyun molar kütlesi
$m_d$	: Kuru havanın molar kütlesi
$g$	: Gravite
$p$	: Basınç
$e$	: Kısmi su buharı basıncı
$m$	: Kareselel ortalama hata
$r$	: Korelasyon katsayısı
$A$	: Dizayn matrisi
$l$	: Ölçüler matrisi
$x$	: Bilinmeyenler matrisi
$v$	: Düzeltmeler matrisi
$\theta$	: Enlem

### KISALTMALAR

<b>CORS</b>	: Continously Operating Reference System, Sürekli Gözlem Yapan Referans Sistemi
<b>EGM96</b>	: Earth Gravitational Model 1996, Dünya Gravite Modeli 1996
<b>E-GVAP</b>	: EUMETNET EIG GNSS Water Vapour Programmes
<b>FFT</b>	: Fast Fourier Transform, Hızlı Fourier Dönüşümü
<b>GNSS</b>	: Global Navigation Satellite System, Global Navigasyon Uydu Sistemleri
<b>GNSS-MET</b>	: GNSS Meteorology, GNSS Meteoroloji
<b>GEONET</b>	: GPS Earth Observation Network
<b>CHAMP</b>	: CHAallenging Minisatellite Payload
<b>GRACE</b>	: Gravity Recovery And Climate Experiment

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

<b>GPS-RO</b>	: GPS Radio Occultation
<b>GPT</b>	: Global Pressure and Temperature, Global Basınç ve Sıcaklık
<b>GMF</b>	: Global Mapping Function, Global İzdüşüm Fonksiyonu
<b>IGRA</b>	: Integrated Global Radiosonde Archive
<b>IGS</b>	: International GNSS Service, Uluslararası GNSS Servisi
<b>LIDAR</b>	: Light Detection and Ranging ya da Laser Imaging Detection And Ranging
<b>METEOSAT</b>	: Meteorological Satellites
<b>NOAA</b>	: National Oceanic and Atmospheric Administration
<b>PWV</b>	: Precipitable Water Vapour, Yoğuşabilir Su Buharı
<b>RO</b>	: Radio Occultation, Radyo Tutulması
<b>RS</b>	: Radiosonde, Radyosonda
<b>RTK</b>	: Real Time Kinematics, Gerçek Zamanlı Kinematik
<b>SAC-C</b>	: Scientific Application Satellite-C
<b>SMMR</b>	: Scanning Multichannel Microwave Radiometer, Çok Kanallı Mikrodalga Radyometre Tarayıcısı
<b>T<sub>m</sub></b>	: Ağırlıklı Ortalama Sıcaklık
<b>T<sub>s</sub></b>	: Yüzey Sıcaklığı
<b>TUSAGA-Aktif</b>	: Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı Aktif
<b>UTC</b>	: Universal Time
<b>WMO</b>	: World Meteorological Organization, Dünya Meteoroloji Birliği
<b>ZTD</b>	: Zenith Total Delay, Toplam Zenit Gecikmesi
<b>ZHD</b>	: Zenith Hydrographic Delay, Hidrostatik Zenit Gecikmesi
<b>ZWD</b>	: Zenith Wet Delay, Islak Zenit Gecikmesi

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

GNSS'nin klasik araştırma ve uygulama alanları; konum belirleme, navigasyon ve zaman çerçevesi ile sınırlandırılmıştır. Ancak günümüzde, troposferin izlenmesi, iyonosferin stokastik özelliklerinin belirlenmesi ve haritalanmasını içeren meteorolojik araştırmalar, gravite alanının belirlenmesi, kutup hareketi, nütasyon, gün uzunluğunu da içeren, global sabit GNSS ağlarının kullanılmasıyla gerçekleştirilen jeodinamik araştırmalar da araştırma ve uygulama alanına girmiştir (Beutler 2015).

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

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

Su buharı atmosferdeki birçok süreçte yer almaktadır. Su buharı doğal olarak oluşan sera gazlarından biridir ve önemli bir kimyasal tepkimecidir (Troller 2004; Perler 2011). Birçok atmosferik sera gazı olup bazıları doğal olarak, bazıları ise endüstriyel etkinlikler sonucu oluşur (Perler 2011).

Ayrıca, su buharı global sıcaklıklar üzerinde bir termostat görevi yapmaktadır. Bir taraftan fazla ısınmaya neden olurken, diğer taraftan daha fazla su buharı yere gelen Güneş radyasyonunun miktarını azaltarak bulutların oluşmasına ve böylece global sıcaklığın azalmasına neden olmaktadır (Sierk 2000; Lutz 2008). Bu nedenle, uzun süreli su buharı değişimleri bilgisi, iklim değişimlerini modellemek için bağımsız bir kaynak olabilir (Ning 2012).

Su buharı, önemli bir iklim geri besleme çevrimi parametresidir: karbon dioksitin artan yoğunluğu sonucu, atmosferin ve yer yüzeyinin sıcaklığı artar ve daha yüksek buharlaşma basıncı nedeniyle atmosfer daha fazla su buharı tutar. Su buharı, uzaya kaçacak enerjiyi absorbe eder ve daha fazla ısınmaya neden olur.

Yağış miktarı, atmosferde asılı bulunan yoğuşabilir su buharı veya su buharı içeriğinin miktarına doğrudan bağlıdır. Bu nedenle, su buharının konumsal ve zamansal dağılımlarının doğruluğu, hava tahminlerinin doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Su buharının hava tahminlerine dahil edilmesi hava tahminlerini önemli derecede iyileştirmektedir. Yoğun yağmurların prediksyonunu iyileştirmede, özellikle su buharı önemli bir faktördür (Sato et al. 2013).

Su buharı, hidrolojik çevrim içinde, atmosferde, okyanuslarda ve karalardaki hareketleri yoluyla, yoğunlaşma ve buharlaşma süreçleriyle, buharlaşma-donma enerjisinin çok uzun mesafelere taşınmasına, El Nino vb. oluşumlara neden olur (Sierk 2000; Lutz 2008; Perler 2011). Su buharı, atmosferin modellenmesi ve iklim araştırmaları için bir anahtar büyüklüktür (Perler 2011)

Endüstrileşmiş ülkelerde, ulusal meteorolojik hizmetlerin maliyet/yarar oranı 1/5 civarındadır. Bu hizmetlerden yararlanan ekonomi sektörlerinden bazıları; tarım, inşaat, enerji, sigorta, iletişim, taşıma, lojistik ve su temini olarak sayılabilir (Perler 2011).

Su buharı gözlem sistemleri; kızıl ötesi sensörlü (TOVS), mikrodalga sensörlü (SMMR, SSM/1) uydularla, CHAMP, GRACE, SAC-C, COSMIC uyduları ve GPS radyo tutulma (GPS RO) yöntemleri ile, Güneş tutulması (SAGE II) ile, uzay araçları (METEOSAT, lidar) ile, balonlarla (rutin radyosondalar), yer yüzeyindeki su buharı radyometreleri (WVR) ve diferansiyel absorpsiyon lidarı ile, yersel GPS alıcıları ile vb. teknolojik aygıtların kullanıldığı sistemler olarak sayılabilir (Schüler 2001; Troller 2004; Ning 2012).



Su buharının alışılmışın dışındaki önemliliği nedeniyle, çok sayıda araştırma etkinliği, gözlemlerin global ölçekte iyileştirilmesine yönelmektedir. Nemliliğin içeriği ve onun atmosferde dağılımı için değişik uzaktan algılama teknikleri geliştirilmiştir. Ancak, yüksek konumsal ve zamansal çözünürlükleri nedeniyle yer bazlı teknikler hala önemli veri kaynaklarıdır (Sierk 2000).

Farklı sistemlerden elde edilen verilerin entegrasyonu için bu verilerin doğruluklarının bağımsız gözlemlerle denetlenmesi gerekir. Bu nedenle, farklı sistemlerden elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılır ve değerlendirilir. Bu sonuçların Uluslararası Meteoroloji Organizasyonunun benimsediği doğruluklarla uyumlu olması beklenir. Veri entegrasyonu için doğruluk standardizasyonu gerekir (Haan 2006).

GNSS ile meteorolojik veri üretiminde üç farklı uygulama üzerinde çalışılmaktadır. Bunlar; GNSS meteorolojisi, GNSS tomografisi ve GPS radyo tutulmasıdır (radio occultation).

GNSS tomografisi; düşey tabakalaşmayı gözlemlemek için, uydu-alıcı eğik yolundaki troposferik etkilerin modellenmesi yoluyla, istasyonlar ağı kapsama alanında voksel olarak tanımlanan hacimler içinde, su buharının konumsal (3 boyutlu) ve zamansal olarak kestirimini amaçlamaktadır. Araştırmalar yüksek doğrulukta çözümlere ulaşabildiğini kanıtlamaktadır (Sierk 2000; Lutz 2008; Müdla et al. 2009; Perler 2011; Rohm 2012).

GNSS radyo tutulması (GNSS RO) uygulamalarında, GNSS uyduları ile üzerinde GNSS alıcısı bulunan CHAMP, GRACE, vb. uydular arasındaki yüksek presizyonlu konum bilgilerinden, düşey atmosferik kırılma indisi profilleri üretilmekte ve bu profiller, özgül nemlilik, basınç ve sıcaklık profillerine dönüştürülmektedir. GNSS RO ile farklı profillerin elde edilmesi ve karşılaştırma çalışmaları, ulaşılan çözümlerin doğruluklarının giderek arttığını göstermektedir (Vespe et al. 2004; Heise et al. 2006; Wickert et al. 2009; Huang et al. 2009; Schmidt et al. 2008; Schmidt et al. 2010; Sharifi et al. 2013).

GNSS meteorolojisinde su buharına dönüştürülen temel büyüklük “toplam zenit gecikmesi” dir (ZTD). Bir istasyon noktasındaki toplam zenit gecikmesi; bu istasyondaki ve çevresinde uygun dağılmış istasyonlardaki (GNSS MET ağı) GNSS gözlemlerinden, öncül troposferik model, izdüşüm fonksiyonu kullanılarak kestirilir. Elde edilen büyüklük, istasyonun zenit doğrultusundaki, troposferde uydu-alıcı arasındaki optik ve geometrik yolların arasındaki farktır.

ZTD; kuru (ZHD) ve ıslak (ZWD) olmak üzere iki bileşene ayrılır. Kuru bileşen atmosferik basınca bağlıdır ve istasyon noktasındaki basınç değeri kullanılarak doğrudan yüksek doğrulukla elde edilir. ZWD ise, ZTD'den ZHD çıkarılarak elde edilir. ZWD yoğuşabilir su buharına (PWV) dönüştürülür.

Yoğuşabilir su buharı bilindiğinde, toplam zenit gecikmesi hesaplanabilir (Hogg et al. 1981). Bunun tersi olarak, ZWD bilindiğinde de; mikrodalgalar için troposferik kırılma indisi eşitliğinden PWV çıkarılmaktadır (Askne and Nordius 1987). Bu çıkarımda temel parametre, istasyon noktasının zenit doğrultusunda troposferin ağırlıklı ortalama sıcaklığı  $T_m$ 'dir.

$T_m$  değerleri uzun süreli radyosonda profil gözlemlerinin analizi ile elde edilir. Bir istasyonda, yüzey sıcaklıkları  $T_s$  ile  $T_m$  değerleri arasında lineere yakın bir bağıntı gözlenmektedir. Bu ilişki  $T_m = a + bT_s$  olarak modellendirilerek a ve b katsayıları kestirilebilir (Bevis et al. 1992). Bevis et al. (1992, 1994) tarafından, Kuzey Amerika için geliştirilen modelden sonra; Avrupa (Emardson et al. 1998), Avustralya (Tregoning et al. 1998), Almanya (Solbrig 2000), Tayvan (Liou et al. 2001), Güney Kore (Ha et al. 2006), Kuzey Kore (Song 2006), Hindistan (Raju et al. 2007), Cezayir (Boutiouta and Lahcene 2013), Kanada (Bokoye et al. 2003), Hollanda ve Baltık (Baltink et al. 2002), Afrika (Bock et al. 2008), Brezilya (Sapucci 2014) için yerel ve bölgesel modeller geliştirilmiştir. Bu çalışmalarda yüzey sıcaklığına bağlı olarak, ağırlıklı ortalama sıcaklığın  $\pm 2-5$  K karesel ortalama hata ile belirlenebildiği ifade edilmektedir (Wang et al. 2005; Pacione et al. 2014). Global  $T_m-T_s$  bağıntısı için de çalışmalar vardır (Wang et al. 2005). Lineer model; yüzey basıncı ve yüzey nemliliği parametreleri ile genişletilerek de değerlendirilmiştir (Sapucci 2014).

$T_m-T_s$  lineer bağıntısının; istasyona bağlı, mevsimsel ve günlük değişimleri içerdiği gözlenmiştir (Liou et al. 2000; Wang et al. 2005; Malderen 2014).

$ZWD/PWV=Q$  şeklinde bir Q dönüşüm faktörü tanımlanmıştır (Emardson and Derks 2000). Q dönüşüm faktörleri yine radyosonda profil analizleriyle elde edilirler. Birkaç radyosonda istasyonunda uzun süre gözlemlerle belirlenen Q dönüşüm faktörleri, istasyon yüzey sıcaklığı, istasyonun enlemi ve yılın gününe bağlı olarak modellendirilmiştir (Emardson and Derks 2000). Q dönüşüm faktörleri, istasyonun enlemi ve yüksekliğinin üstel fonksiyonu olarak da incelenmiştir (Jade and Vijayan 2008). Q dönüşüm faktörüne ilişkin çalışmalardan, bu faktörün yaklaşık  $\pm 1\%$ 'e yakın oransal presizyonlarla elde edilebileceği görülmektedir.

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

Su buharının gerçek zamana yakın elde edilmesi önemlidir. Gerçek zamana yakın (Near Real Time =NRT ) çözüm algoritmaları da araştırılmaktadır (Bosy et al. 2012; Lo and El-Mowafy 2011; Dousa 2013).

GNSS PWV'nin presizyonu; ZTD'nin doğruluğu (ağ yapısı, değerlendirme stratejisi), ZHD'deki hatalar ve  $T_m$ 'deki hatalar dikkate alınarak ve bu hatalar hata yayılma yasasına göre irdelenerek,  $\pm 1-2$  mm olarak verilmektedir (Schüler 2001; Pottieux et al. 2014; Ning 2012; Pacione et al. 2014).

GNSS ile PWV'nin elde edilmesinde, dönüşümün doğruluğunun, diğer yöntemlerle elde edilen PWV değerleriyle karşılaştırmalar ile belirlenmesi önerilmektedir (Emardson and Derks 2000). Bu çerçevede, radyosonda ile karşılaştırmalar çoğunluktadır. Global radyosondaların standart sapmaları ZTD için  $\pm 5-16$  mm ve PWV için  $\pm 1-2,5$  mm olarak veriliyor (Suortti et al. 2008; Dousa et al. 2013).

Nümerik yoğunlaşabilir su buharı modeli, hava tahmin ve iklim araştırmalarında önemli bir altlıktır. Literatürde bu amaçlarla en çok kullanılan nümerik modellerin başında iki boyutlu küresel harmonik fonksiyonlar gelmektedir. Global nümerik sıcaklık ve basınç modeli (Böhm et al. 2007) ve global izdüşüm fonksiyonu modeli (Böhm et al. 2006) örnek olarak verilebilir.

Küçük alanlarda, analitik fonksiyonlarla da yapılan nümerik modelleme uygulamaları vardır (Troller 2004). Nümerik modellerden, uygulama kolaylığı açısından grid veri de üretilmektedir. Bu amaçla, jeodezide de sıkça kullanılan iki boyutlu enterpolasyon yöntemlerinden biri (sayısal arazi modellerindeki gibi) kullanılır. Meteorolojik verilerin enterpolasyonları için, lokal alanlardaki Kriging yöntemi (Sato et al. 2013), kenarlarla ağırlıklı ortalama (Bosy et al. 2012), Hermite enterpolasyon (John and Buehler 2005) uygulamaları da vardır.

Bu çalışma ile;

1- Türkiye’de mevcut 8 radyosonda istasyonunda 0<sup>h</sup> ve 12<sup>h</sup> saatlerinde gerçekleştirilen profil gözlemlerinin analizi ile tüm Türkiye için kullanılabilir ağırlıklı ortalama sıcaklık  $T_m$  ve  $Q$  faktörünün modellenmesi, İstanbul ve Ankara radyosonda istasyonlarına kurulacak sürekli GPS istasyon verileriyle bu modellerin kontrolü ve geliştirilmesi,

2- Enlemi 38°-42° ve boylamı 29°-33° olarak seçilen test bölgesindeki meteoroloji istasyonlarının verilerinin (sıcaklık, basınç, nemlilik) nümerik modellenmesiyle, test alanı içinde meteorolojik gözlem yapılmamış TUSAGA-Aktif meteoroloji dosyalarının oluşturulması,

3- Üretilen meteoroloji dosyaları kullanılarak, her istasyon için toplam zenit gecikmesi ZTD değerlerinin, ıslak (hidrostatik olmayan) zenit gecikmesi değerlerinin (ZWD) hesaplanması ve buradan yoğunlaşabilir su buharı miktarlarının (PWV) hesaplanması, istasyonlar için elde edilen toplam zenit gecikmesi ve yoğunlaşabilir su buharı zaman serilerinin nümerik modellenmesi,

amaçlanmış ve bu yönde uygulamalar gerçekleştirilmiştir.

## BÖLÜM 2

### GNSS İLE YOĞUŞABİLİR SU BUHARI KESTİRİMİNİN FİZİKSEL VE MATEMATİKSEL ESASLARI

#### 2.1 TROPOFERDE MİKRODALGALARIN YAYILMASININ FİZİKSEL ESASLARI

Troposferden geçen mikrodalgaların, ortamın kırılma indisinin değişmesi nedeniyle hızları ve yörünge eğrilikleri değişir (Şekil 2.1). Bunun sonucunda, bir uydu-alıcı arasında, optik yol ( $\rho_o$ ) ile geometrik yol ( $\rho_g$ ) arasındaki yol farkı;

$$\rho_g - \rho_o = \Delta L = c_0(t - t_0) = \int_H^\infty (n - 1) dz = 10^{-6} \int_H^\infty N dz \quad (2.1)$$

ile bulunur. Burada;

$n$ ; kırılma indisi

$N$ ;  $N = (n - 1)10^6$  ile elde edilen ortamın kırıcılığı

$H$ ; alıcının yüksekliği

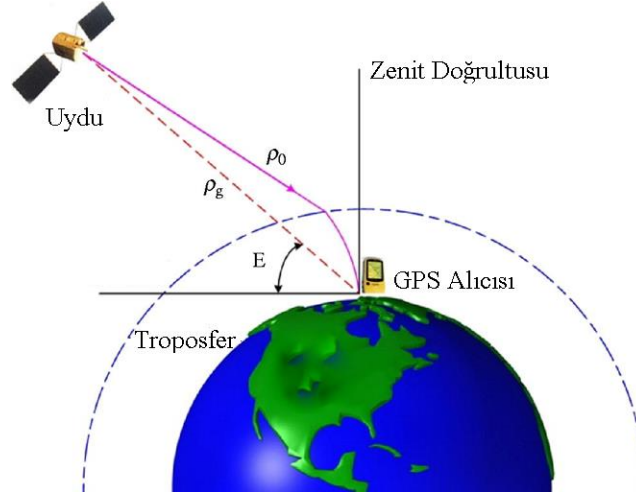
$c_0$ ; boşluktaki ışık hızı

$t$ ; mikrodalğanın troposferde geçiş zamanı

$t_0$ ; boşluktaki aynı uzunluğun geçiş zamanı

$\Delta L$ ; troposferik yol gecikmesi

olarak adlandırılır.



**Şekil 2.1** Mikrodalga yayılmasının geometrisi (URL-1 2014'ten değiştirilerek).

Diğer doğrultulardaki gecikmeler; izdüşüm fonksiyonu yardımıyla zenit doğrultusuna izdüşürülür.

Ortamın kırıcılığı için çoğunlukla kullanılan eşitlik;

$$N = \left( k_1 \frac{p_d}{T} \right) z_d + \left( k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right) z_w \quad (2.2)$$

olarak verilmektedir (Thayer 1974). Burada;

$p_d$ ; kuru havanın basıncı [hPa],

$e$ ; kısmi su buharı basıncı [hPa],

$T$ ; sıcaklık [K]

$z_d$  ve  $z_w$ ; atmosferde % 1'den daha az birimle farklılık gösteren sıkıştırılabilirlik faktörleridir.

Bu katsayılar genel olarak dikkate alınmazlar. Eşitlikteki katsayılar;

$$k_1 = 77,604 \pm 0,014 \text{ [K/hPa]}$$

$$k_2 = 64,79 \pm 0,08 \text{ [K/hPa]}$$

$$k_3 = 22,1 \pm 2,2 \text{ [K/hPa]}$$

$$k_3=(3,776\pm 0,04)10^5 \text{ [K}^2/\text{hPa]}$$

olarak verilmektedir (Thayer 1974).

Eşitlik 2.2 ile verilen toplam zenit gecikmesi; sadece yüzey basıncına bağlı olan terim (hidrostatik terim) ve geri kalanı su buharı profiline bağlı olan terim olarak yeterli doğrulukla ikiye ayrılabilir.

İdeal gaz kanununu kullanarak, havanın yoğunluğu;

$$\rho = \rho_d + \rho_w = \frac{m_d}{R} \left[ \frac{p}{T} \left( 1 - \frac{m_w}{m_d} \right) \frac{e}{T} \right] \quad (2.3)$$

olarak yazılabilir. Burada;

R; molar gaz sabiti [8,314 J(molK)]

$m_w$ ; suyun molar kütlesi [18,0152g/Mol]

$m_d$ ; kuru havanın molar kütlesi [28,9644g/Mol]

olarak verilmektedir.

Eşitlik 2.3 bir düşey profil için;

$$\int_H^{\infty} \frac{p}{T} dz = \frac{R}{m_d} \int_H^{\infty} \rho dz + \left( 1 - \frac{m_w}{m_d} \right) \int_H^{\infty} \frac{e}{T} dz \quad (2.4)$$

olarak düzenlenebilir.

Atmosferde normal olarak;

$$\frac{dp}{dz} = -pg \quad (2.5)$$

eşitliği sağlanmaktadır. Burada;

$$\int_H^{\infty} g dz = - \int_{p_d}^0 \frac{dp}{g} = \frac{p_s}{g_m} \quad (2.6)$$

bulunur. Burada;

$p_s$ ; toplam yüzey basıncı [hPa]

$g_m$ ; atmosferin bir düşey kolonunun kütle merkezindeki gravite [ $ms^{-2}$ ]

olur. Ortalama gravite değeri;

$$g_m = 9,784 / f(\varphi, H) \text{ [ms}^{-2}\text{]} \quad (2.7)$$

$$f(\varphi, H) = 1 - 0,00266 \cos 2\varphi - 0,00028H \quad (2.8)$$

olarak verilmektedir (Saastamoinen 1973).

Burada,

$\varphi$ ; enlem [ $^\circ$ ]

$H$ ; geoid yüzeyinden olan yükseklik [km]

olmaktadır.

Yukarıdaki bağıntıları kullanarak Eşitlik 2.2'den;

$$\Delta L = 10^{-6} \left[ \frac{k_1 R}{g_m m_d} p_s + \int_H^\infty \left[ \left( k_2 - k_1 \frac{m_w}{m_d} \right) \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right] dz \right] \quad (2.9)$$

elde edilir. Eşitliğin ilk terimi "hidrostatik gecikme" olarak adlandırılır ve yeterli doğrulukla;

$$(ZHD) \Delta L_h = 0.0022768 p_s / f(\varphi, H) \quad (2.10)$$

olur (Davis et al. 1985). Burada;

$\Delta L_h$ ; [m] biriminde

$p_s$ ; [hPa] biriminde

alınır.

Hidrostatik gecikme çıktıktan sonra geri kalan terimler;



$$(ZWD) \Delta L_w = 10^{-6} \int_H^{\infty} \left( k_2' \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right) dz \quad (2.11)$$

olur. Burada;  $k_2' = k_2 - k_1 \frac{m_w}{m_d}$  olarak tanımlanır ve  $k_2' = 22,1 \text{ K/hPa}$ 'dır. Eşitlik 2.10'un küçük bir parçası ıslak bileşeni içermektedir. Bu nedenle, tam olarak olmasa da kullanım kolaylığı nedeniyle "ıslak bileşen" olarak adlandırılır. Eşitlik 2.9'dan hidrostatik bileşen çıkarıldıktan sonra "hidrostatik olmayan bileşen" ile ıslak bileşen arasındaki fark çok küçük olduğundan birçok çalışmada farklılık dikkate alınmaz (Mendes and Langley 1994; Mendes and Langley 1998; Mendes et al. 2002; Mendes and Pavlis 2002; Troller 2004).

### 2.1.1 Toplam Zenit Gecikmesi İle Yoğuşabilir Su Buharının Hesabı

"Ağırlıklı ortalama sıcaklığı";

$$T_m = \frac{\int \frac{e}{T} ds}{\int \frac{e}{T^2} ds} \quad (2.12)$$

olarak tanımlanarak, Eşitlik 2.11'den ıslak bileşen;

$$\Delta L_w = 10^{-6} \left( k_2' + k_3 / T_m \right) \int_H^{\infty} \frac{e}{T} dz \quad (2.13)$$

bulunur.

Meteorolojik olarak, toplam yoğuşabilir su buharı (PWV);

$$PWV = \frac{l}{\rho_l} \int_H^{\infty} \rho_w dz = \frac{l}{\rho_l R_w} \int_H^{\infty} \frac{e}{T} dz \quad (2.14)$$

olarak verilmektedir. Burada;

$R_w$ ;  $\frac{R}{m_w}$  su buharı için özgün gaz sabiti,

$\rho_l$ ; sıvı suyun yoğunluğu  $1000 \text{ [kgm}^{-3}\text{]}$

olarak alınabilir. Su buharı basıncı [hPa] biriminde alınır;

$$PWV = \frac{0,1}{R_w} \int_H^{\infty} \frac{e}{T} dz \quad (2.15)$$

bulunur. Eşitlik 2.13'te yerine konursa, yoğuşabilir su buharı ile ıslak bileşen arasında,

$$(ZWD) \Delta L_w = 10^{-6} \left( k_2' + k_3 / T_m \right) R_w PWV \quad (2.16)$$

temel bağıntısı bulunur (Askne and Nodius 1987)

$$K' = 10^{-6} \left( k_2' + k_3 / T_m \right) R_w \quad (2.17)$$

alınarak,

$$(ZWD) \Delta L_w = K'.PWV \quad (2.18)$$

bağıntısı elde edilir (Mendes and Langley 1994; Mendes and Langley 2002; Troller et al. 2005; Tregoning et al. 1998; Emardson and Derks 2000; Bevis et al. 1992; Askne and Nodius 1987; Hogg et al. 1981).

Hidrostatik olmayan bileşen için;

$$(ZWD) \Delta L_h = K.PWV \quad (2.19)$$

alınır. Burada;

$$K = 10^{-6} \left( k_2 + k_3 / T_m \right) R_w \quad (2.20)$$

olur (Troller 2004).

Islak bileşen veya hidrostatik olmayan bileşen arasındaki fark çok küçük olduğundan genellikle göz ardı edilmektedir.

Emardson and Derks (2000) Eşitlik 2.19'u;

$$Q = \frac{ZWD}{PWV} = 10^{-6} \left( k_2' + k_3 / T_m \right) R_w \quad (2.21)$$

olarak düzenlemiştir. Burada Q, “dönüşüm faktörü” olarak adlandırılır. Ağırlıklı ortalama sıcaklık ( $T_m$ ) ile dönüşüm faktörü (Q) arasında;

$$Q = 4,61524 \times 10^{-3} \left( \frac{3,739 \times 10^5}{T_m} + 22,1 \right) \quad (2.22)$$

bağıntısı vardır.

## 2.2 GNSS İLE TOPLAM ZENİT GECİKMESİNİN KESTİRİMİ

Troposferik etkiyi hesaplamak için, en eski modellerden biri Saastamoinen olup, ideal gazlarla ilgili kanunlara göre oluşturulmuştur. Saastamoinen (1973) modeline göre yol farkı eşitliği;

$$\Delta\rho = \rho - \rho_0 = \frac{0,002277}{\cos z} \left[ p + \left( \frac{1255}{T} + 0,05 \right) e - \tan^2 z \right] \quad (2.23)$$

olarak verilmektedir. Burada;

$P$  ; [mbar] basınç,

$e$  ; [mbar] kısmi su buharı basıncı,

$T$  ; [K] sıcaklık,

tır ve  $\Delta\rho$  [m] birimindedir. Bu eşitlik,  $B$  ve  $\delta R$  özel düzeltme terimleri ile;

$$\Delta\rho = \frac{0,002277}{\cos z} \left[ p + \left( \frac{1255}{T} + 0,05 \right) e - B \tan^2 z \right] + \delta R \quad (2.24)$$

olarak da genişletilebilir (Lutz 2008).

Burada; düzeltme terimi  $B$ ; gözlem istasyonunun yüksekliğinin fonksiyonu  $\delta R$ ; uydunun yükseklik açısı ve yüksekliğine bağlıdır.

Sıcaklık  $T$ , basınç  $p$  ve kısmi buhar basıncı  $e$  için öncül modeller, bir standart atmosfer modelden elde edilir. Bu durumda; sıcaklık, basınç ve nemlilik için yüksekliğe bağlı değerler

$$p = p_r(1 - 0,0000226(h - h_r))^{5,225} \quad (2.25a)$$

$$T = T_r - 0,0065(h - h_r) \quad (2.25b)$$

$$H = H_r e^{-0,0006396(h-h_r)} \quad (2.25c)$$

eşitlikleriyle elde edilirler (Berg 1948; Beutler et al. 2007). Burada; basınç  $p$ ; [mbar], sıcaklık  $T$ ; [°C], nemlilik  $H$ ; [%],  $h$ ; istasyon yüksekliğindeki değerler,  $p_r$ ,  $T_r$ ,  $H_r$ ;  $h_r$  referans yüksekliğindeki değerlere uygundur. Genel olarak, referans yüksekliği  $h_r$  ve referans meteorolojik değerler  $p_r$ ,  $T_r$ ,  $H_r$ ;

$$h_r = 0 \text{ m}$$

$$p_r = 1013,25 \text{ milibar}$$

$$T_r = 18 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$H_r = 50 \%$$

olarak alınmaktadır (Beutler et al. 2007).

Öncül modeller olarak;

- Saastamoinen modeli (Saastamoinen 1973) Eşitlik 2.23,
- Kuru ve ıslak Niell modeli (Niell et al. 1996) yani Niell izdüşüm fonksiyonu ile birlikte Saastamoinen zenit yolu gecikmesiyle birlikte (düşük yüksekliklerde GNSS veri analizi için tavsiye edilir.),
- Düzenlenmiş Hopfield modeli (Goad and Goodman 1974),
- Essen ve Froome formülü üzerine tesis edilen modeli (Rothacher et al. 1986),
- Marini-Murray modeli (Marini and Murray 1973),
- Vienna izdüşüm fonksiyonu (Böhm and Schuh 2004),
- Global izdüşüm fonksiyonu (Böhm et al. 2006)

sayılabilir.

Çizelge 2.1’de, geliştirilen güncel izdüşüm fonksiyonlarının temel özellikleri özet olarak görülmektedir.

**Çizelge 2.1** İzdüşüm fonksiyonlarının temel özellikleri (Gürbüz vd. 2014; Mendes 1999).

İzdüşüm Fonksiyonları	$P_s$	$T_s$	$e_s$	$\alpha$	$T_h$	$H$	$\varphi$	Diğer	Açı	$\varepsilon_{min}$	Tip	$d_g$
Baby	x	x	x			x			$\theta$	10 °	t	
Black & Eisner									E	7 °	t	
Black		x							E	5 °	d, w	
CfA	x	x	x	x	x				E	5 °	h, nh <sup>3</sup>	x
Chao									E	1 °	d, w	
Goad, Goodman	x	x	x			x			E	n/a	d, w	
Hartmann	x <sup>1</sup>	x <sup>1</sup>	x <sup>1</sup>				x	H <sub>g</sub>	E	5 °	t	x
Moffett									E	2 °	d, w	
Hopfield		x <sup>2</sup>				x			E	n/a	d, w	
Ifadis	x	x	x						E	2 °	h, nh	x
Lanyi	x	x		x	x			H <sub>i</sub>	E	6 °	t	x
Marini	x	x	x			x	x		E	10 °	d, w	
MTT		x				x	x		E	3 °	h, nh	x
Niell						x <sup>2</sup>	x	doy <sup>2</sup>	E	3 °	h, nh	x
Rahnemoon	x	x	x			x	x		$\theta$	n/a	d, w	x
Saastamoinen	x	x	x			x			$\varepsilon^4$	10 °	t	x
Santerre	x	x	x			x			E	n/a	d, w	x
UNSW931	x	x	x	x	x				E	2,5 °	h,nh <sup>3</sup>	x
Global						x		doy, a, b, c	E	3,3 °	h, nh	x
Vienna						x		a, b, c	E	3,3 °	h, nh	x

Çizelge 2.1’de kullanılan parametreler;

<sup>1</sup>; yalnızca geometrik gecikmesini (sinyal bükülmesi),

<sup>2</sup>; yalnızca hidrostatik bileşenini,

<sup>3</sup>; hidrostatik bileşen için geliştirilmiş fonksiyonun genişletilmiş kullanımını,

<sup>4</sup>; izdüşüm fonksiyonunun hesaplanmasından önce gerçek yükseklik (eğim) açısının görünen yükseklik (eğim) açısına dönüştürülmesi durumu,

$P_s$ ; yüzeydeki toplam basıncını,

$T_s$ ; yüzey sıcaklığını,

$e_s$ ; yüzey su buharı basıncını,

$\alpha$ ; sıcaklık gradyentini,

$T_h$ ; tropopoz yüksekliğini,

$H$ ; istasyonun ortometrik yüksekliğini,

$\varphi$ ; istasyonun enlemini,

$H_g$ ; gravite merkezinin yüksekliğini,

$H_i$ ; inversiyon yüksekliğini,

$doy$ ; yılın gününü,

Açı; yükseklik açısı tipini ( $\theta =$  görünen;  $\varepsilon =$  gerçek),

$\varepsilon_{min}$ ; izdüşüm fonksiyonunun tasarlandığı minimum yükseklik (eğim) açısını ( $n/a=$  belirtilmemiş ya da herhangi bir yükseklik açısı için geçerli),

Tip; yöntemin öne çıkan özelliğini ( $d=$  kuru;  $w=$  ıslak;  $h=$  hidrostatik;  $nh=$  hidrostatik olmayan;  $t=$  toplam),

$d_g$ ; geometrik gecikmesini

simgelemektedir.

GNSS parametrelerinin kestirimi sırasında, troposferik gecikmeler genel olarak aşağıdaki yaklaşımla modellendirilmektedir.

Troposferik etki terimi  $\Delta\rho_k^i(t, A, z)$  daha detaylı olarak yazılabilir:

$$\Delta\rho_k^i(t, A, z) = \underbrace{\Delta\rho_{apr,k}(z_k^i)}_{\text{öncül model}} + \underbrace{\Delta^h\rho_k(t)f(z_k^i)}_{ZTD} + \underbrace{\Delta^n\rho_k(t)\frac{\partial f}{\partial z}\cos A_k^i + \Delta^e\rho_k(t)\frac{\partial f}{\partial z}\sin A_k^i}_{\text{yatay gradiyent}} \quad (2.26)$$

Burada;

$\Delta\rho_k^i$ ;  $k$  istasyonu ve  $i$  uydusu arasındaki troposferik yol gecikmesi,

$t$ ; gözlem zamanı,

$z_k^i, A_k^i$ ; k istasyonundan gözlenen i uydusunun zenit uzaklığı ve azimutu,

$\Delta\rho_{apr,k}(z_k^i)$ ; bir öncül modele uygun eğik gecikme,

$\Delta^h\rho_k(t), f(z_k^i)$ ; zenit yolu gecikme parametresi (zaman bağımlı) ve onun izdüşüm fonksiyonu,

$\Delta^n\rho_k(t), \Delta^e\rho_k(t)$ ; yatay kuzey ve doğu troposfer ile gradyent parametreleri (zamandan bağımsız)

olur.

Bir öncül zenit gecikmesi  $\Delta\rho_{apr}$ , eğer ölçülen meteorolojik değerler onun hesabında kullanılıyorsa zaman bağımlı da (sabit z için) olabilir. Yukarıda bahsedildiği gibi, troposfer yol gecikmesi ve izdüşüm fonksiyonu istasyon konumuna ve yılın gününe bağlı olabilir.

Değerlendirme sürecinde, istasyona özgü ZPD ve gradyent parametreleri de kestirilir (Beutler et al. 2007).

### 2.3 ZAMAN SERİLERİNİN SPEKTRAL ANALİZİ

Fiziksel olayların spektral özelliklerinin araştırılmasında Fourier serileri yaygın biçimde kullanılan bir matematiksel tekniktir. Fourier analizinin esası; verilen bir fonksiyonun veya veri setinin spektral özelliklerinin kestirim ve analizi için, sinüsoidal fonksiyonlarla gösterilmesidir. Birçok örnek uygulamada, periyotlar toplamının mevcut fonksiyonu gösterdiği varsayılır.

Bir periyodik fonksiyon  $f(t)$ , bilinen periyodu T ile,

$$\begin{aligned} f(t) = & 1/2a_0 + a_1 \cos \omega_0 t + a_2 \cos 2\omega_0 t + \dots \\ & b_1 \sin \omega_0 t + b_2 \sin 2\omega_0 t + \dots \end{aligned} \quad (2.27)$$

ve genel olarak;

$$f(t) = 1/2a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \quad (2.28)$$

trigonometrik seriler ile gösterilebilir. Burada;  $\omega_0 = 2\pi/T$  temel açısal frekans,  $a_0, a_1, a_2...b_1, b_2...$  katsayılar ve  $t$  zamandır. Böyle bir seri Trigonometrik Fourier Serisi olarak adlandırılır ve;

$$f(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos(n\omega_0 t - \theta_n) \quad (2.29)$$

olarak yazılır. Burada;

$$c_0 = a_0/2, c_n = (a_n^2 + b_n^2)^{1/2}, \theta_n = \arctan(b_n/a_n), n=1,2,\dots \quad (2.30)$$

alınır. Buradan; bir periyodik fonksiyonun, farklı frekanslara sahip olan sinüsoidal bileşenlere ayrılabilceği görülmektedir.

Değişik fiziksel olaylarda, çoğunlukla periyodik olmayan fonksiyonlar oluşur. Bu nedenle, periyodik olmayan fonksiyonların Fourier analizi geliştirilmiştir. Periyot  $T$ 'ye sonsuzda yaklaşan periyodik olmayan bir  $f(t)$  fonksiyonu, sonsuz periyotlu bir periyodik fonksiyon olarak düşünülebilir. Bu fonksiyon, Fourier serilerinin kompleks üstel biçimi ile;

$$f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} c_n e^{-in\omega t} \quad (2.31)$$

yazılır. Burada;

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(s) e^{-in\omega s} .ds \quad (2.32)$$

olur.

Eşitlik 2.31, genel frekans değişkeni  $\omega$  kullanılarak yapılan dönüşümler ile

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) .e^{i\omega t} .d\omega \quad (2.33)$$

olarak yazılır. Burada;



$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t).e^{-i\omega t} .dt \quad (2.34)$$

Fourier Entegrali olarak adlandırılır. Eşitlik 2.33 ve Eşitlik 2.34 periyodik olmayan bir fonksiyonun gösterimidir. Fourier Transformasyonu;

$$F(\omega) = F[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t).e^{-i\omega t} .dt \quad (2.35)$$

ve invers işlem;

$$f(t) = F^{-1}[F(\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega).e^{i\omega t} .d\omega \quad (2.36)$$

olarak gösterilir. Fourier entegralinin alınması büyük hesap yükü gerektirmektedir. Ancak, bilgisayarlarla değerlendirme ve hızlı Fourier dönüşümü (FFT) tekniği Fourier Transformasyonunun uygulanmasını kolaylaştırmıştır.

Ayrık gözlem verileri;

$$x(k), t_k = k.\Delta t; k = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2.37)$$

için, hızlı Fourier transformasyonu FFT ile doğrudan periodogram  $h_N(\omega)$  hesaplanabilir.

Kümenin ortalaması;

$$\bar{x}_N = N^{-1} \sum_{k=1}^N x(t_k) \quad (2.38)$$

alınarak,

$$x'(t_k) = x(t_k) - \bar{x}_N \quad (2.39)$$

ile,  $h_N(\omega); \omega_0 = 0, 2\pi/N, 4\pi/N, \dots$  periodogram koordinatları,

$$\hat{h}_N(\omega) = \left| F[x'(t_k)] \right|^2 \quad (2.40)$$

olur. Burada;

$$F[x'(t_k)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi N}} \sum_{k=1}^N x'(t_k) \cdot e^{-i\omega k \Delta t} \quad (2.41)$$

alınır. Eşitlik 2.41, Eşitlik 2.39'un ayrık Fourier Transformasyonu olur.

Yeteri derecede uzun periyoda sahip olan meteorolojik gözlemlerin ve parametrelerin zaman serileri Fourier Transformasyonu ile dönüştürülerek, içlerindeki periyodik bileşenlerin frekansları ve genlikleri belirlenebilir (Blais 1988).

## 2.4 KÜRESEL HARMONİK FONKSİYONLARLA NÜMERİK MODELLEMENİN MATEMATİKSEL ESASLARI

Matematikte ve mühendislikte, küresel harmonikler, bir küresel koordinat sisteminde Laplace eşitliğinin ortogonal çözüm setlerinin açısal bileşenleridir. Küresel harmonikler, birçok teorik ve pratik uygulamada, özellikle yeryuvarının potansiyel alanı, geoit, sıcaklık, basınç vb. skalar alanların modellenmesinde önemlidir. Genel olarak, küresel yüzey üzerinde skalar alanların modellenmesinde kullanılmaktadır.

Atmosferik prediksyon eşitliklerinin sayısal çözümü için iki temel yaklaşım vardır. Bunlardan birincisi, fiziksel uzay ve zamanda ayrık noktalardaki değerlerle herhangi bir bağımsız değişkeni göstermektir. Diğer yaklaşım ise, sonlu düzgün serilerle, tercihen ortogonal fonksiyonlarla herhangi bir değişkenin modellenmesidir (Kasara 1977).

Sayısal atmosferik prediksyon eşitliklerinin çözümünde (Kasara 1977), Sayısal Hava prediksyonunda, Global Basınç ve Sıcaklık modellerinin (GPT) oluşturulması (Böhm et al. 2007), Global İzdüşüm Fonksiyonunun (GMF) oluşturulması (Böhm et al. 2006) çalışmalarında küresel harmonik fonksiyonlarla modeller geliştirilmiştir.

Meteorolojik parametrelerin enterpolasyonu uygulamalarda sıklıkla gerekmektedir. Örneğin, CORS istasyonlarının meteorolojik parametreleri, bu istasyonların çevresindeki meteoroloji istasyonlarının verilerinden hesaplanması, uygun bir enterpolasyon yöntemiyle gerçekleştirilebilir. Enterpolasyon uygulamalarına örnekler Bosy et al. (2012), Jade and Vijayan (2008), Lo and El-Mowafy'de (2011) verilmektedir. Küresel harmonik modeller ile de enterpolasyon yapılabilir.

Bu çalışmada, seçilen bir test alanında; meteorolojik istasyonlarda ölçülen sıcaklık, basınç, nemlilik parametrelerinin küresel harmonik fonksiyonlar ile modellenmesi ve modellerden yararlanarak enterpolasyon araştırılmaktadır. Bu amaçla iki test ağı seçilmiştir. Test 1 ağı, modelleme ve enterpolasyon araştırılmaktadır. Test 2 ağı ise, modellerden yararlanarak TUSAGA-Aktif istasyonlarının sıcaklık, basınç ve nemlilik değerleri hesaplanmakta ve bu istasyonlardaki GNSS verileri ile birlikte, geliştirilen  $T_m-T_s$  bağıntısından yararlanarak, yoğunlaşabilir su buharı değerleri hesaplanmakta ve sonuçlar irdelenmektedir.

Genel olarak küresel harmonik fonksiyon;

$$f(r, \varphi, \lambda) = \frac{1}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n P_{nm}(\sin \varphi) [A_{nm} \cdot \cos(m\lambda) + B_{nm} \cdot \sin(m\lambda)] \quad (2.42)$$

olur. Burada, n; derece, m; mertebesi, r; yarıçap vektörü,  $\varphi$ ; küresel enlem ve  $\lambda$  küresel boylamdır. Eğer,  $r=1$  alınırsa;

$$f(\varphi, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n P_{nm} \sin(\varphi) [A_{nm} \cdot \cos(m\lambda) + B_{nm} \cdot \sin(m\lambda)] \quad (2.43)$$

olur. Çoğunlukla; Eşitlik 2.42 fiziksel jeodezide ve Eşitlik 2.43 meteorolojide kullanılan küresel harmonik fonksiyonlardır. Burada;  $P_{nm} \sin(\varphi)$  Legendre fonksiyonudur. Bu fonksiyonun açılımı ( $n=m=8$ ) Bonn Üniversitesi yayınlarından (2006) alınmıştır (URL-2 2006). Bu fonksiyonun değişik derece ve mertebeden açılımı vardır.

En küçük kareler yöntemiyle sıcaklık, basınç, nemlilik vb. meteorolojik parametrelerin modellenmesi için;

$$a_{nm} = P_{nm}(\sin \varphi) \cdot \cos(m\lambda) \quad (2.44)$$

$$b_{nm} = P_{nm}(\sin \varphi) \cdot \sin(m\lambda) \quad (2.45)$$

alınarak;  $a_{00}, a_{10}, a_{11}, b_{11}, a_{20}, a_{21}, b_{21} \dots$  n ve m için açılır. Bu çalışmada;  $n=m=5$ 'e kadar açılım yapılmıştır.  $m=0$  için,  $\sin(m\lambda)=0$  ve buradan,  $b_{n0}=0$  durumları da dikkate alındığında 36 katsayı vardır. Ancak, bilinmeyen sayısının belirlenmesinde istasyon sayısı dikkate alınmalıdır.

Enlemi ve boylamı bilinen her istasyon için  $a_{nm}$  ve  $b_{nm}$  katsayıları belirlenen derece ve mertebe için hesaplanabilir. Bir istasyonlar ağı için dizayn matrisi A;

$$A=[a_{00} \ a_{10} \ a_{11} \ b_{11} \ a_{20} \ a_{21} \ b_{21} \ a_{22} \ b_{22} \ a_{30} \ a_{31} \ b_{31} \ \dots] \quad (2.46)$$

olur. Buradan, en küçük kareler yöntemine göre;

$$X = (A^T A)^{-1} A^T l \quad (2.47)$$

bilinmeyenler bulunur. Burada;

$$X=[A_{00} \ A_{10} \ A_{11} \ B_{11} \ A_{20} \ A_{21} \ B_{21} \ A_{22} \ \dots] \quad (2.48)$$

$$l=[l_1 \ l_2 \ l_3 \ l_4 \ \dots] \text{ (ölçüler matrisi)} \quad (2.49)$$

alınır.

Ölçülerin düzeltmeleri;

$$v = AX - l \quad (2.50)$$

ve birim ağırlıklı ölçünün karesel ortalama hatası;

$$m_0 = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{n-u}} \quad (2.51)$$

ile bulunur. Burada, n ölçü sayısı olmak üzere istasyon sayısına eşittir ve u ise bilinmeyen sayısıdır.

Enterpolasyon noktalarındaki (meteorolojik gözlem yapılmayan GPS istasyonları) enterpole edilmiş parametreler  $l_E$ ;

$$l_E = A_E \cdot X \quad (2.52)$$

ile bulunur. Burada,  $A_E$ ; Eşitlik 2.46'daki matristir ve katsayıları enterpolasyon noktalarının koordinatları ile hesaplanır.

Global meteorolojik parametrelerin modellenmesinde güçlü bir araç olan küresel harmonik fonksiyonlar ile büyük alanlarda çalışmak matris hesaplarında bir problem çıkarmaz. Ancak,

birkaç derecelik küçük alanlarda,  $a$  ve  $b$  katsayıları birbirlerine yakın değerler alırlar. Bu nedenle;  $N=A^T A$  normal denklemler matrisinin kondüsyonu zayıftır (ill conditioned, ill posed). Bu matrisin tersinin (inversinin) alınmasında problemler oluşur ve buna göre hesaplanan bilinmeyenler sistematik bileşenler içerirler. Zayıf kondüsyonlu matrisler ile en küçük kareler çözümleri için çok sayıda araştırma ve uygulama vardır (URL-3 2015; URL-4 2015; Gkioulekas 1996; Mosznski 1995).

Zayıf kondüsyonlu en küçük kareler probleminde en önemli çözümlerden biri Tikhonov regülarizasyonudur. Bu çalışmada da bu yöntem ile çözüm araştırılmıştır. Doğrusal En Küçük Kareler probleminde, Tikhonov yöntemi;

$$\min \left\{ \|Ax - l\|_2^2 + \lambda \|Lx\|_2^2 \right\} \quad (2.53)$$

koşulunu sağlayacak biçimde çözülür.  $\|Ax - l\|_2$  ile  $\lambda$  arasında monotonik (tekdüze) bir bağlantının olduğu kanıtlanmıştır. Buna göre;  $\lambda$  büyürse,  $\|Lx\|_2$ 'den elde edilen çözüm vektörü büyür ve  $\|Ax - l\|_2$  ile hesaplanan düzeltmeler de büyür. Standart formda problemin çözümü;

$$(A^T A + \lambda L^T L)x = A^T l \quad (2.54)$$

olur. Bilinmeyenler matrisi;

$$x = (A^T A + \lambda L^T L)^{-1} A^T l \quad (2.55)$$

ile bulunur. Burada, genel olarak  $L=I$  birim matris alınmaktadır. Bu durumda, farklı  $\lambda$  değerleri için  $x_\lambda$  çözümleri bulunacaktır. Her bir  $x_\lambda$  çözüm vektöründen Eşitlik 2.51'e göre bulunan birim ölçünün karesel ortalama hataları hesaplanır. Karesel ortalama hatayı minimum yapan  $x_\lambda$  vektörü, çözüm vektörü olur (Golub et al. 1999; Nguyen 2006). Bir koordinat sisteminde, eksenler  $\lambda$ ,  $m_0$  alınarak oluşturulacak L-Eğrisi ile de en uygun çözüm vektörü belirlenebilir (Tan and Fox 2015). Her istasyonlar ağı için çözümü sağlayan bir  $\lambda$  değeri vardır. Bu değer bir kez belirlendikten sonra Eşitlik 2.54 bu değer kullanılarak çözülür.



## BÖLÜM 3

### GEREÇLER VE YÖNTEMLER

#### 3.1 GNSS’İN GÜNCEL DURUMU

Global Navigasyon Uydu Sistemleri (Global Navigation Satellite Systems GNSS), yüksek duyarlıklılı, geniş global kapsama alanına sahip, sürekli ve her türlü hava koşulunda gözlem yapabilen uydu tabanlı sistemleridir. Bu sistemler, yerli, ticari, askeri ve araştırma amacı ile mikrodalga sinyalleri kullanılarak bir noktanın konum ve zaman verilerini üretirler. Küresel konumlama sistemlerine örnek olarak Amerika Birleşik Devletleri’nin Global Positioning System (GPS), Avrupa Birliği’nin Galileo, Rusya’nın GLObal'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS), Çin’in BeiDou Navigation Satellite System (BDS) ve bölgesel konumlama sistemleri Japonya’nın Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) ve Hindistan’ın Indian Regional Navigational Satellite System (IRNSS) sistemleri gösterilebilir. Bu sistemlerden çalışır durumda olan GPS ve GLONASS’tır. Diğerleri ya geliştirilmekte ya da kısmen çalışır durumdadır. Çizelge 3.1’de mevcut GNSS sistemlerinin özellikleri verilmektedir.

Çizelge 3.1 Global Navigasyon Uydu Sistemleri.

Parametre/Sistem	GPS	GLONASS	GALILEO	BEIDOU
Ülke	ABD	Rusya	AB	Çin
Uydu sayısı	24	24	30	35
Yörünge sayısı	6	3	3	3
Yörünge eğimi	55	64,8	56	55
Uyduların yüksekliği (km)	20.200	19.140	23.222	21.150
İlk uzaya fırlatılış	1978	1982	2011	2007
Koordinat sistemleri	WGS84	PZ-90.11	GTRF	Beijing 1954
Zaman sistemleri	GPS zamanı, UTC (USNO)	Glonass zamanı, UTC (SU)	Galileo sistem zamanı	Çin UTC
Frekanslar	L1:1575,42 L2:1227,60 L5:1176,45	G1:1602 G2:1246 G3:1204,704	E1:1575,42 E5a:1176,45 E5b:1207,14 E6:1278,75	B1-2:1589,74(E1) B-1:1561,1(E2’) B2:1207,14(E5b) B3:1268,52(E6)
Tam olarak faaliyete geçme durumu	1995	2010	2020	2020

GNSS veri yükleme ASCII formatında yapılırsa da alıcıya bağımlıdır. Bu verinin bir alıcıdan bağımsız formatta tutulması, veri entegrasyonu için zorunludur. Bu nedenle; alıcıdan bağımsız format Receiver Independent Exchange Format (RINEX), 1989 yılında geliştirilmiş ve 1990 yılında GLONASS için genişletilmiştir. Bu formatın v2.10, v2.11 versiyonları ve 2006 yılından sonra RINEX3.0 versiyonu kullanılmaya başlanmıştır.

Jeodinamik amaçlar için, Uluslararası Jeodezi Birliği (IAG), 1990 yılında Uluslararası GPS Servisi IGS'nin kurulmasını kararlaştırmıştır. Bu servisin amacı, en yüksek doğrulukların gerektiği jeodinamik uygulamalar için yörünge belirlemektir. 1994 yılında, GPS yerine GNSS kullanılmaya başlanmıştır.

İşlenen verilerin sonuçlarının değişimini sağlamak için IGS tarafından 1999 yılında Solution (Software/technique) INdependent EXchange (SINEX) ve daha sonra SINEX v2.0, v2.10 versiyonları da geliştirilmiştir.

GNSS'de temel gözlemler; kod ölçüleri (kaba, ince), faz ölçüleri (L1, L2,... taşıyıcı dalgaları) ve doppler ölçüleridir. Bu temel gözlemler; konum belirlemek için tek tek veya kombine biçimde kullanılır.

GNSS'yle konum belirlemede; mutlak konum belirleme (single point positioning) ve rölatif konum belirleme (differential positioning) olmak üzere iki temel uygulama vardır. Ayrıca; konum belirlemede, statik ve kinematik uygulamalar da söz konusudur.

Kodlarla mutlak konum belirleme, taşıyıcı fazlar ile mutlak konum belirleme, presizyonlu mutlak konum belirleme (PPP), kod farklarıyla rölatif konum belirleme, faz farklarıyla (tekli farklar, ikili farklar=DD, üçlü farklar) rölatif konum belirleme, lokal alan rölatif konum belirleme vb. yöntemler geliştirilmiştir. Statik rölatif konum belirleme ve kinematik rölatif konum belirleme, özellikle CORS ağlarında, RTK ve NRT uygulamaları önemli uygulamalardır (Jin et al. 2014).

GNSS verileri kullanılarak konum belirlemenin değerlendirme sürecinin önemli adımları; verinin tamiri (cycle-slip'lerin belirlenmesi) ve belirsizlik (ambiguity) çözümüdür. Statik uygulamalarda; LSAST (1999), FARA (1990, 1992), LAMBDA (1993, 1995), FAST (1994), OMEGA (1999) ve kinematik uygulamalarda QIF belirsizlik çözüm teknikleri geliştirilmiştir.



GNSS’de temel hatalar olarak; uydu-saat, uydu-yörünge, iyonosferik ve troposferik modelleme, alıcı-saat, alıcı faz merkezi değişmesi ve yansıma hataları sayılabilir. Uyduların dağılımları da presizyonları etkileyen faktörlerden biridir.

GNSS verilerinin değerlendirilmesi amaçlarıyla geliştirilen bilimsel ve ticari yazılımlar Çizelge 3.2’de verilmiştir.

**Çizelge 3.2 Bilimsel ve ticari yazılımlar.**

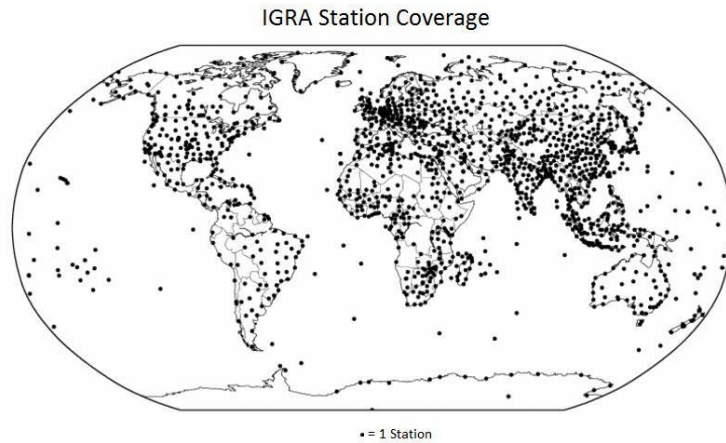
<b>Yazılım Adı</b>	<b>Türü</b>	<b>Geliştiren</b>
Bernese GPS Software	Bilimsel	Astronomical Institute, the University of Bern (AIUB), İsviçre
GAMIT/GLOBK	Bilimsel	Massachusetts Institute of Technology (MIT), ABD.
GIPSY-OASIS	Bilimsel	Jet Propulsion Laboratuvarı (JPL), ABD.
RTKLIB	Bilimsel (açık kaynaklı) ücretsiz	Tomoji Takasu ve Akio Yasuda, Japonya
GpsTools	Bilimsel (açık kaynaklı - MATLAB) ücretsiz	Tomoji Takasu ve Shoji Kasai, Japonya
goGPS	Bilimsel (açık kaynaklı - MATLAB ve Java) ücretsiz	Geomatics Laboratuvarı, Politecnico di Milano, İtalya
gLAB	Bilimsel ücretsiz	European Space Agency (ESA) Contract ve Universitat Politecnica de Catalunya (UPC),
GPSTk	Bilimsel ücretsiz	Space and Geophysics Laboratuvarı, University of Texas at Austin (ARL:UT).
Ntrip	Bilimsel (Açık kaynaklı) ücretsiz	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, (BKG - Federal Agency for Cartography and Geodesy ve TU Dortmund)
Trimble Geomatics Office ve Trimble Total Control	Ticari	Trimble
Leica Geo Office	Ticari	Leica
Topcon Tools ve Topcon Turbo Survey	Ticari	Topcon
Thales GNSS	Ticari	Thales
GeoGenius	Ticari	Trimble Terrasat GmbH
Justin	Ticari	Javad
RTNet	Ticari	GPS Solutions
magicGNSS	Ticari	GMV Aerospace and Defense S.A.
GEONAP	Ticari	Geo++

### 3.2 RAVINSONDE GÖZLEMLERİ VE RADYOSONDA İSTASYONLARI

En temel ifadeyle, ravinsonde rasatları, radyosonda cihazı denilen ve balonla birlikte serbest atmosfere gönderilen gözlem aletleri yardımıyla yapılır. Radyosonda cihazı, balonun yardımıyla serbest atmosferde yukarı çıkarken meteorolojik bilgileri eş zamanlı olarak ölçen ve istasyona gönderen alettir. Radyosonda cihazı, basınç, sıcaklık, nem değerlerini ölçen sensörlerden meydana gelmektedir. Bu sensörler yardımıyla elde edilen bilgiler, önceden belirlenmiş olan bir sıralama dâhilinde ve belirlenmiş kısa zaman aralığında alıcı yer istasyonuna gönderilir. Rüzgar bilgileri ise radyosonda cihazının serbest atmosferdeki konumuna bağlı olarak elde edilen açı değerlerinden bulunur. Ravinsonde gözlemleri basıncın, sıcaklığın, nemin, rüzgar yön ve şiddetinin, yerden uçuşun son bulunduğu yüksekliğe kadar yüksekliğin bir fonksiyonu olarak elde edildiği gözlemlerdir. Ravinsonde sistemi, bir balonun taşıdığı radyosonda cihazı, GPS cihazı, cihazdan gelen sinyalleri alan ve cihazı izleyen yer telemetri donanımı ve bilgileri işlemek için bir bilgisayar ünitesinden ibarettir.

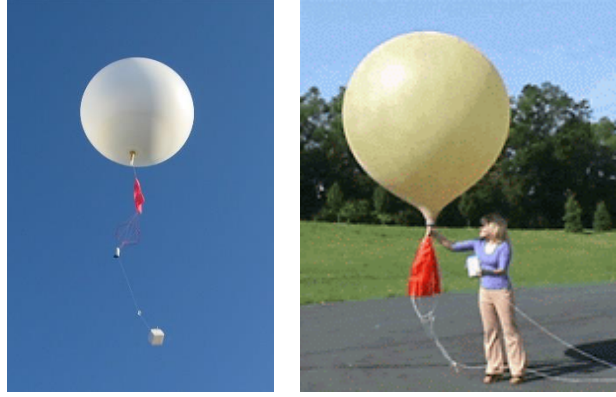
Ülkemiz ve diğer Dünya Meteoroloji Birliği (WMO) üyesi ülkeler, Dünya Hava Gözetleme Ağının küresel bir parçasıdır ve ravinsonde gözlemleri, hava analiz ve tahmini amacıyla değişik ihtiyaçları karşılamak için kurulmuşlardır. Bu istasyonlar belirli zamanlarda, aynı anda gözlem yaparlar ve Global Telekomünikasyon Sistemi (GTS) aracılığıyla gözlemlerini küresel yayına iletirler. Elde edilen gözlemler, çeşitli matematiksel modellerde, öncelikle hava tahmin ve analizi amacıyla kullanılır.

Bütünleşik Küresel Radyosonda Arşivi (IGRA), küresel dağılmış 1.500'ün üzerinde istasyonlardaki radyosonda ve pilot balon gözlemlerinden oluşmaktadır (Şekil 3.1).



**Şekil 3.1** Dünya genelinde 1500 IGRA istasyonu (URL-5 2015).

Balon atmosferde yükselirken basınç azalır ve balon genişler. Balon 3.048m'ye ulaştığında, balonun büyüklüğü iki katlı bina yüksekliğine ulaşır. Balon elastik limitinin ötesine genişlediğinde patlar, küçük bir paraşüt radyosondanın inişini yavaşlatır ve can ve mal için tehlike en aza indirilir (Şekil 3.2).



**Şekil 3.2** Radyosonda balonu (URL-6 2016; URL-7 2016).

Ülkemizde 8 adet radyosonda istasyonu bulunmaktadır. Bunlar, Adana, Ankara, Diyarbakır, Erzurum, Isparta, İstanbul, İzmir ve Samsun'dadır (Şekil 3.3). Bu istasyonlar, yukarıda açıklandığı üzere, Türkiye'yi etkileyen hava kütleleri ve ulusal ihtiyaçlar göz önüne alınarak tesis edilmiştir. WMO, geniş kara bölgeleri üzerinde radyosonda istasyonlarının 250 km, sık nüfuslu olmayan yerlerde ve okyanuslarda ise 1.000 km aralıklı olarak kurulmasını tavsiye eder. Bu kriterlere dikkate alındığında, Türk radyosonda istasyonları aşağı yukarı bu kıstaslara uymaktadır. Aradaki mesafe ortalama olarak 500 km civarındadır. WMO bu istasyonların günde 4 defa gözlem yapmasını tavsiye eder. Fakat istasyonlarımız bütün dünya genelinde uygulandığı gibi, 00 UTC ve 12 UTC olmak üzere günde iki defa gözlem yapmaktadır.



Şekil 3.3 Türkiye radyosonda istasyonlarının dağılımı (URL-8 2014).

Radyosonda sensörleri ve ölçme doğrulukları Çizelge 3.3'te verilmektedir.

Çizelge 3.3 Radyosondanın veri kayıt türü ve ölçüm doğrulukları (Yağan 2007).

Meteorolojik Değişkenler	Ölçüm Kabiliyeti	Ölçümlerin Doğruluğu	Ölçümlerin Kesinliği	Ölçümlerin Hatası
Hava Sıcaklığı	+50 – (-) 90°C	0,5°C	1050-20 hPa için 0,40°C < 20 hPa için 1°C	0,1°C
Nispi (Bağıl) Nem	% 1 - %100	%5	%100 - %30 için %2,5 %29,9 - %1 için %3,5	% 1
Rüzgar Hızı	0-225 knot	3 knot	6 knot	1 knot
Rüzgar Yönü	360 derece	5 derece	Rüzgar hızı ile değişir	1
Atmosferik Basınç	1.070 – 2 hPa	P > 300 hPa için 2,0 hPa 300 < P < 50 için 5 hPa	1.050 – 100 hPa için 1,5 hPa 99,9-50hPa için 1,5 hPa	P > 50 hPa için 0,1 hPa P < 50 hPa için 0,01 hPa
Basınç Seviyelerinin Jeopotansiyel Yükseklikleri	1.070 – 500 hPa 500 – 300 hPa 300 – 100 hPa	< 10m < 15m < 20m	< 10m < 15m < 20m	1m

### 3.2.1 Veri Kayıtları ve Veri Formatı

Bilgisayar sistemi tarafından elde edilen meteorolojik bilgiler, tarih, zaman ve bilginin özelliğine göre belirli ve uygun formatta kaydedilmektedir (Çizelge 3.4). Kaydedilen ayrıntılı bilgiler Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün ravinsonde rasatları ile ilgili bilgi arşivinde saklanmaktadır. Radyosondalardan gelen sinyaller meteorolojik verilere dönüştürüldükten sonra WMO bilgi bankası olan Wyoming Üniversitesi'ne de ayrıca gönderilir ve orada da depolanır. Bu kurumdaki gerekli kişilerle temasa geçilerek verilere ulaşılabilir.

Çizelge 3.4 İnternet kaynaklarında bulunabilecek bir radyosonda çıktısı (URL-9 2013).

```
17062 Istanbul Observations at 122 10 Jan 2011
-----
  PRES  HGHT  TEMP  DWPT  RELH  MIXR  DRCT  SKNT  THTA  THTE  THTV
   hPa   m    C    C     %   g/kg  deg  knot   K    K    K
-----
1023.0   39  11.8  0.8   47  3.98  160   2  283.1  294.5  283.8
1000.0  209   9.8  0.8   53  4.07  255   1  282.9  294.6  283.6
 941.0  711   5.4  1.0   73  4.39  349   3  283.4  296.0  284.2
 925.0  851   5.4  1.2   74  4.53  15    3  284.8  297.8  285.6
 911.0  976   5.8  2.5   79  5.05  12    4  286.5  301.0  287.4
.        .    .    .    .    .    .    .    .    .    .
.        .    .    .    .    .    .    .    .    .    .
.        .    .    .    .    .    .    .    .    .    .
 11.1  30041 -45.3
 11.0  30101 -45.5
 10.8  30224 -45.9
 10.0  30740 -42.5
  9.5  31087 -41.5
Station information and sounding indices
      Station number: 17062
      Observation time: 110110/1200
      Station latitude: 40.96
      Station longitude: 29.08
      Station elevation: 39.0
.
.
.
Precipitable water [mm] for entire sounding: 14.34
```

Sıcaklık, oransal nem, basınç değerleri, radyosonda cihazından ölçülen meteorolojik verilerdir. Çiy noktası, yoğuşabilir su buharı ve aktüel karışım oranı değerleri ise radyosonda verileri kullanılarak hesaplanan meteorolojik parametrelerdir (URL-10 2015).

### 3.3 RADYOSONDA VERİLERİNİN ANALİZİ

Radyosonda verileri;

- Basınç, p [hPa]
- yükseklik, h [m]

- mutlak sıcaklık,  $t$  [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $T$  [K]
- doyma noktası sıcaklığı,  $t_d$  [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $T_d$  [K]
- rölatif nem,  $H$  [%]

olarak yayınlanmaktadır (Çizelge 3.4).

Bu verilerden, su buharı basıncı ( $e$ ), ağırlıklı ortalama sıcaklık ( $T_m$ ) ve su buharı (PWV) değerlerinin hesaplanması için bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritmanın matematiksel ve stokastik esasları aşağıdaki gibidir.

Sıcaklığın yükseklikle değişimi;

$$t = x_0 + x_1 h + x_2 h^2 + \dots \quad (3.1)$$

polinomu ile modellendirilmiştir. En küçük kareler çözümüyle;

$$x = (A^T A)^{-1} A^T t \quad (3.2)$$

olur. Burada;

$$A = \begin{bmatrix} 1 & h_1 & h_1^2 & \dots \\ 1 & h_2 & h_2^2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

alınır. Burada;  $h$  yükseklik,  $x$  bilinmeyenler vektörü ve  $t$  sıcaklığı göstermektedir. Dengeleme sonucu, bilinmeyen parametrelerin istatistik olarak anlamlı olup olmadığı  $H_0: x_i=0$  sıfır hipotezi alınarak  $t$  testi ile test edilmektedir. Çok sayıda farklı profil değerlendirmelerinde,  $h=8$  km'ye kadarki sıcaklık profillerinin 6 bilinmeyen anlamlı parametre ve daha yüksek profillerin maksimum 9 bilinmeyen anlamlı parametre ile modellenebileceği görülmüştür. Sıcaklık profil modellemelerinde bir sıcaklık değerinin modellenmesinin karesel ortalama hatası  $m_t$  ve dengelenmiş yüzey sıcaklığı değeri  $T_s$  de hesaplanmaktadır.

Su buharının elde edilmesinde en önemli parametre olan su buharı basıncının hesaplanması gerekir.

Bu çalışmada su buharı basıncı, Danimarka Meteoroloji Enstitüsü, Bilimsel Rapor 03-16'ya göre hesaplanmaktadır (Nielsen and Petersen 2003). Bu raporda, Teten'in eşitliği önerilmektedir ve bu eşitlikte ıslak termometre okunması  $T_w$  gerekmektedir. Islak termometre okuması değerleri raporda verilen algoritmalara göre iterasyon ile aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

İlk yaklaşık değer (MATLAB kodlamasıyla);

$$w = \min(\max(\frac{210}{T}, 0,5), 0,98) \quad (3.4)$$

$$T_w = w.T - (1-w).T_d \quad (3.5)$$

olarak bulunur. Teten formülü;

$$e^*(T_w) = a_1 \exp\left(\frac{T_w - T_o}{T_w - a_3} \cdot a_2\right) \quad (3.6)$$

olarak verilmektedir. Burada;

$T > T_o$  (sıvı su üzerinde)

$$a_1 = 6,1078 [hPa]$$

$$a_2 = 21,875$$

$$a_3 = 7,66$$

$$T_o = 273,16$$

$T < T_o$  (buz üzerinde)

$$a_1 = 6,1078 [hPa]$$

$$a_2 = 17,269$$

$$a_3 = 35,86$$

alınır.

$T_w$  yaklaşık değeri ile iterasyona başlanarak;

$$r^*(T_w) = 0,622 \cdot \frac{e^*(T_w)}{p - e^*(T_w)} \quad (3.7)$$

$$F(T_w) = (T - T_w) \cdot (c_{pd} + r^*(T_w) \cdot c_l) - L_v (r^*(T_w) - r(T)) \quad (3.8)$$

$$f_1 = \left[ a_2 (T_o - a_2) \cdot (T_w - a_3)^{-2} \cdot r^*(T_w) (1-x)^{-1} \cdot c_l \left( \frac{L_v}{c_l} + T_w - T \right) \right] \quad (3.9)$$

$$f_2 = c_{pd} + r^* \cdot (T_w) \cdot c_l \quad (3.10)$$

$$\delta T_w = F(T_w)(f_1 + f_2)^{-1} \quad (3.11)$$

$$T_w = T_w + \delta T_w \quad (3.12)$$

olarak bulunur. Burada;

$c_{pd} = 1000 [J/kgK]$  sabit basınçta kuru havanın ısı kapasitesi

$c_l = 4186 [J/kgK]$  sabit basınçta sıvı suyun ısı kapasitesi

$L_v = 2,5 \times 10^6 [kJ/kg]$  buharlaşmanın ısınma ısısı

alınmıştır.

Eşitlik 3.6'dan Eşitlik 3.12'ye iterasyon ile  $T_w$  değerine yaklaşılr. 3 iterasyonun yeterli olduğu gözlenmiştir. Son  $T_w$  değeriyle Teten eşitliğinden  $e^*(T_w)$  hesaplanır. Buradan;

$$e = H \cdot e^*(T_w) / 100 \quad (3.13)$$

ile her bir profil noktası için su buharı basıncı,  $(e/T)$  ve  $(e/T^2)$  değerleri hesaplanır. Profildeki her bir nokta için hesaplanan  $(e/T)$  ve  $(e/T^2)$  değerleri, Eşitlik 3.1'de verilen polinom ile ayrı ayrı, yüksekliğin fonksiyonu olarak modellendirilir. Buradan;

$$I = \int_{H_s}^H (e/T) \cdot dh \quad \text{ve} \quad II = \int_{H_s}^H (e/T^2) \cdot dh \quad (3.14)$$

belirli entegralleri alınır. Burada;

$H_s$ ; radyosonda profilinin ilk yüksekliği

$H$ ; radyosonda profilinin son yüksekliği

olarak alınır. Hesaplanan belirli entegral değerleri kullanılarak, ağırlıklı ortalama sıcaklık;



$$T_m = \frac{I}{II} \quad (3.15)$$

yoğuşabilir su buharı değeri;

$$PWV = \frac{1}{R_w} \int_{H_s}^H \frac{e}{T} \cdot dh = \frac{I}{R_w} \quad (3.16)$$

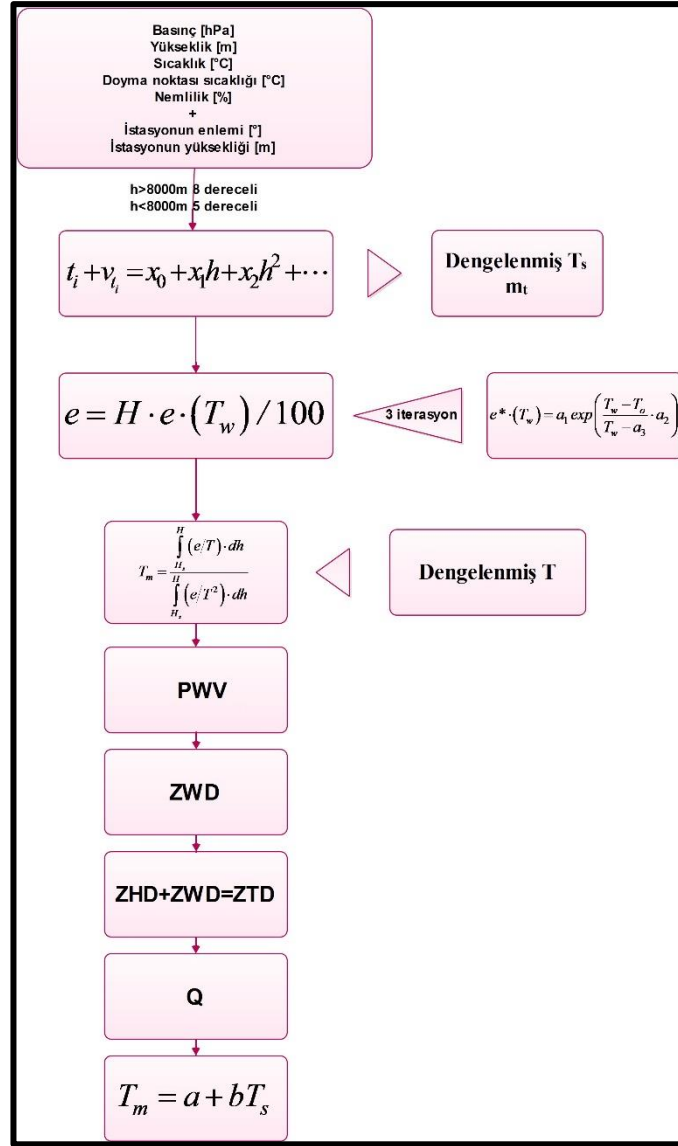
ve ıslak zenit gecikmesi değeri;

$$\Delta_{islak}^z = k_2' I + k_3 II \quad (3.17)$$

olarak bulunur. Burada,  $R_w = 461,524 \text{ JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$  alınır.

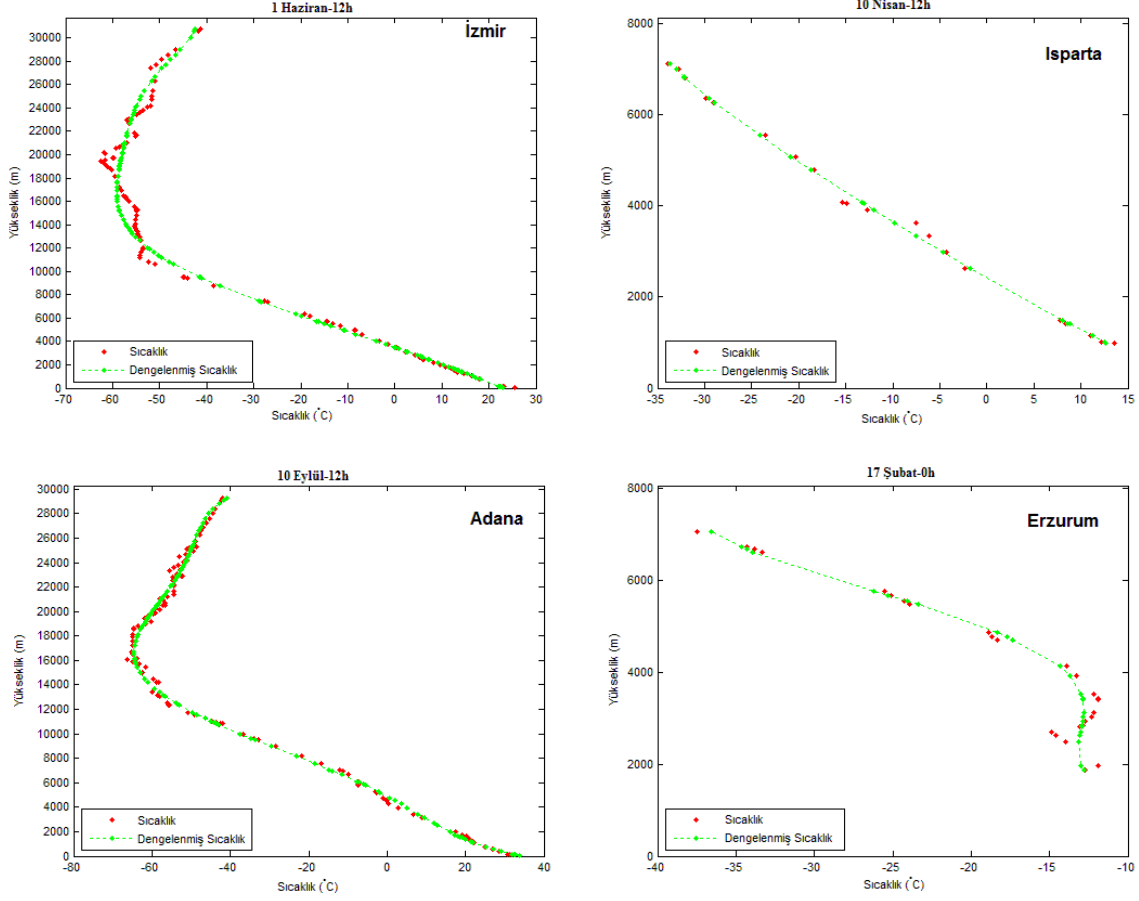
Profil analizi için yukarıdaki temel hesaplamaları yapan bir MATLAB yazılımının kodları EK A'da verilmektedir.

Geliştirilen radyosonda sıcaklık profili analizi algoritmasının akış diyagramı Şekil 3.4'te verilmiştir.



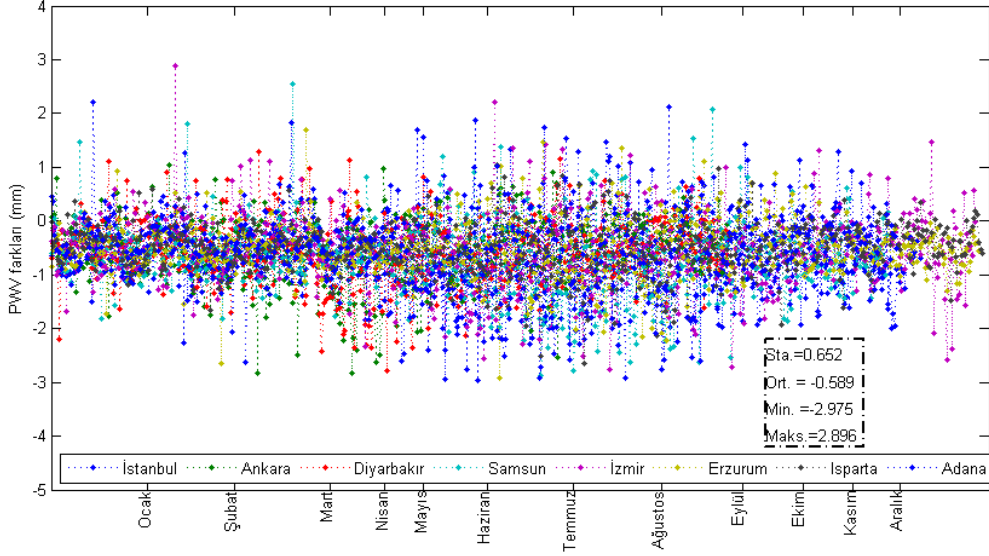
Şekil 3.4 Radyosonda sıcaklık profili analizi algoritmasının akış diyagramı.

Algoritmaya göre değerlendirilen profillere örnekler Şekil 3.5'te görülmektedir.



Şekil 3.5 Adana, Erzurum, Isparta ve İzmir radyosonda sıcaklık profil örnekleri.

Eşitlik 3.16'daki su buharı, algoritmanın temel entegrali olan  $I$ 'nın  $R_w$  katsayısında bölünmesiyle bulunmaktadır. Bu nedenle, bu eşitliğe göre hesaplanan PWV, algoritmanın doğruluğunun testi için kullanılabilir. Bu amaçla, algoritmadan hesaplanan  $PWV_{alg}$  ile radyosondadan verilen  $PWV_{RS}$  karşılaştırılmıştır. Tüm radyosonda istasyonları için  $PWV_{RS} - PWV_{alg}$  farkları Şekil 3.6'da görselleştirilmiştir. Farkların test istatistiğinden ortalamasının 0,6 mm ve standart sapmasının  $\pm 0,7$  mm olduğu görülmektedir.



**Şekil 3.6** Tüm radyosonda istasyonları için  $PWV_{RS} - PWV_{alg}$  farkları.

Şekil 3.6 ve test istatistiğinden; geliştirilen algoritmanın Haan (2006)'da verilen 1-3 mm ( $1-3 \text{ kg/m}^2$ ) doğruluk sınırlarında olduğu görülmüştür. Farklı algoritmaların doğrulukları incelendiğinde (Liou et al. 2000; Liou et al. 2001; Li et al. 2010; Park et al. 2010; Tregoning et al. 1998; Bocolari et al. 2006; Bevis et al. 1992; Bai and Feng 2003) geliştirilen algoritmanın yeterli doğrulukta sonuçlar verdiği söylenebilir.

Algoritmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki çizelgedeki gibi düzenlenmiştir.

**Çizelge 3.5** İstanbul istasyonu için radyosonda analiz sonuçları.

DOY-z	Ts (K)	mot	Tm (K)	ZWD (mm)	ZHD (mm)	ZTD (mm)	PWV (mm)	Q	h (m)
1	276,2457	0,6497	270,5466	41,5	2324,4	2365,9	6,3436	6,5431	7120
1,5	279,3947	0,9929	270,2263	47,7	2322,1	2369,8	7,2785	6,5507	7140
2	280,5681	0,8741	272,6976	41,1	2317,5	2358,6	6,3236	6,4923	7600
2,5	283,5697	0,6534	273,5838	41,7	2310,7	2352,4	6,4390	6,4716	7120
3	282,3553	0,8160	271,3079	85,8	2308,4	2394,2	13,1552	6,5250	7110
3,5	282,2294	0,2631	271,8166	114,7	2299,3	2414,0	17,6122	6,5130	7080
4	279,6537	0,4543	269,1397	103,1	2308,4	2411,5	15,6792	6,5768	7060

Çizelge 3.5'te;

DOY-z; yılın günü ve radyosonda gözlem saati

Ts; yüzey sıcaklık değeri

mot; sıcaklık profiline dengeleme sonrası karesel ortalama hatası

Tm; profilin ağırlıklı ortalama sıcaklık değeri

ZWD; ıslak troposferik gecikme değeri

ZHD; hidrostatik troposferik gecikme değeri

ZTD; toplam troposferik gecikme değeri

PWV; yoğuşabilir su buharı miktarı

Q; dönüşüm faktörü değeri

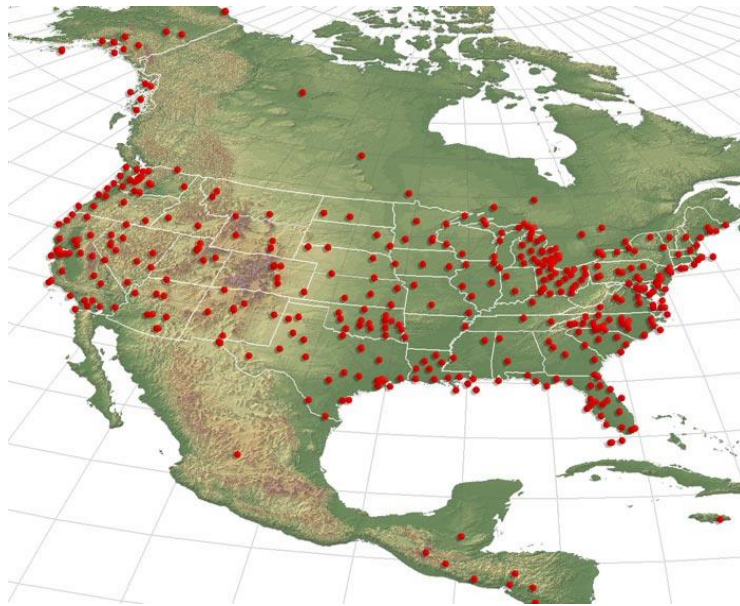
h; profilin maksimum yüksekliği

olarak alınmıştır.

### 3.4 GNSS İLE SU BUHARI KESTİRİMİ

GNSS ile su buharı kestiriminin gerçekleştirildiği GNSS ağlarından örnekler aşağıda özetlenmiştir.

NOAA Ağının (National Oceanic and Atmospheric Administration, United States Department of Commerce) verilerini 24 saat gecikme ile yüksek doğruluklu PWV verisinin güvenilir veri kaynağı ile ilgilenen hava ve iklim araştırmacıları, operasyonel tahminciler, modelleyiciler, iyonosfer çalışan bilim adamları ve başkaları kullanabilir (Şekil 3.7).

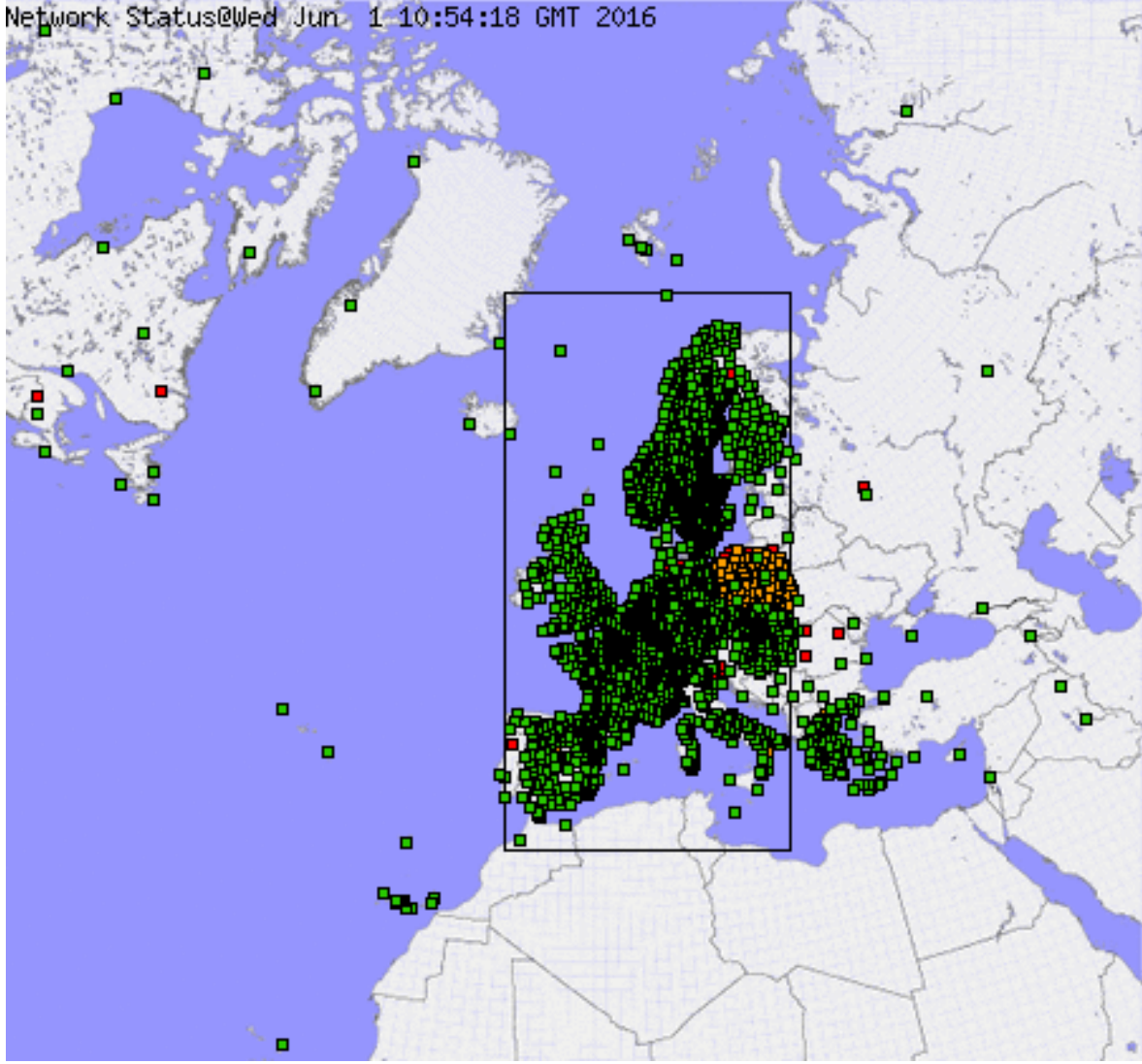


Şekil 3.7 NOAA ağı (URL-11 2016).

Avrupa'da bu tür projelere örnek olarak;

716 nolu Bilim ve Teknolojide Avrupa İşbirliği (European Cooperation in Science and Technology – COST) Aksiyonu - Exploitation of ground-based GPS for climate and numerical weather prediction applications (1999-2004),

ES1206 nolu COST aksiyonu - Advanced Global Navigation Satellite Systems tropospheric products for monitoring severe weather events and climate (GNSS4SWEC) (2013-2017), TOUGH (Targeting Optimal Use of GPS Humidity Data in Meteorology, 2003–2006), ve E-GVAP (The EUMETNET GPS Water Vapour Programme, 2004), EUMETNET üyelerine gerçek zamana yakın (NRT-Near real time) GNSS troposferik gecikmesi ve yoğuşabilir su buharı kestirimi sağlamak için 2005'te kurulan ağ verilebilir. Sözü edilen ağ çoğunlukla Avrupa'da olmak üzere 1.500'den fazla GNSS istasyonunu içermektedir. Günümüzde E-GVAP üyelerinin çoğunluğu sayısal hava tahmini çalıştırdığından dolayı global GNSS verilerinin değerlendirme ve dağılımı çalışmaları başlamıştır (Şekil 3.8).



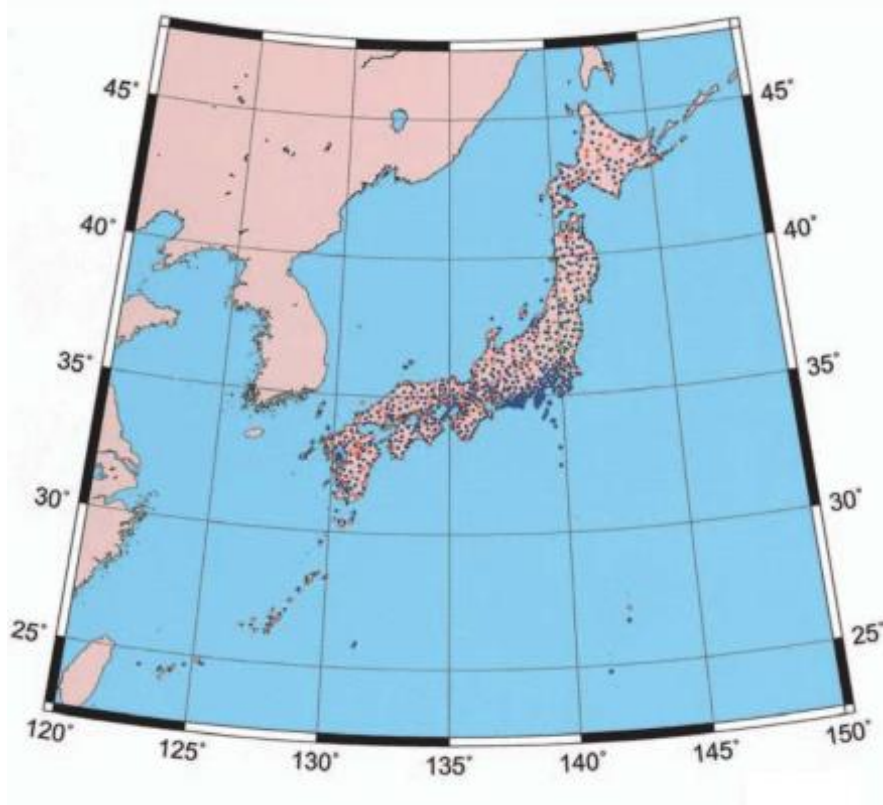
Şekil 3.8 E-GVAP GNSS ağı (URL-12 2016).

Afrika’da bu tür projenin örnekleri; AMMA (African Monsoon Multidisciplinary Analysis Project, 1999–2005) Projesi, Afrika muson bölgesinde yoğunlaşabilir su buharı kestirimi ve analizi çalışmaları yapmaktadır.

Kuzey Amerika’da bu tür projenin örnekleri; SuomiNet ağı, çoğunlukla Amerika Birleşik Devletleri’nde bulunan alıcıları, zenit su buharı ölçümleri ile bir global ağ için gerçek zamanlı su buharı kestirimleri sağlamaktadır (Şekil 3.9).







Şekil 3.10 GEONET ağı (Hatanaka 2003).

Bundan başka, iki Avrupa enstitüsü, Me'te'o France ve UK Met Office, bugün sayısal hava tahminlerinde NRT ZTD'leri kullanmaktadırlar ve yer tabanlı GNSS gecikme verisinin kullanımının olumlu bir etki yarattığını bildirmektedirler. Su buharı tahmini kapasitesini kullanarak, GNSS, gök gürültülü fırtına gibi havadaki aşırı değişiklikleri algılamak ve izlemek için bir potansiyele sahiptir. Buna ek olarak, Almanya ve Avusturya'da sayısal hava tahminleri için NRT GNSS kullanılarak su buharının izlenmesi yapılmaktadır (Isioye et al. 2015).



## BÖLÜM 4

### ANALİZ VE MODELLEME ÇALIŞMALARI

#### 4.1 PROFİL ANALİZLERİ

##### 4.1.1 Radyosonda Profillerinin Ağırlıklı Ortalama Sıcaklıklarının ( $T_m$ ) Hesabı

GNSS Meteorolojisinde ZWD ve PWV arasındaki son derece önemli olan dönüşüm parametreleri  $T_m$  ya da  $Q$ 'dur. Bu parametreler radyosonda istasyonlarındaki profil gözlemlerinin analizi sonucu elde edilirler. Bu nedenle, bu parametreler; istasyonun konumunun, istasyonun meteorolojik verisinin ve zamanın fonksiyonudur. GNSS MET ağında kullanılacak bu dönüşüm parametreleri en azından ağı kapsayan alan için geliştirilmelidir. Bundan dolayı,  $T_m$  ve  $Q$  parametreleri; radyosonda istasyonlarındaki uzun süreli gözlemlerden istasyonun konumunun (istasyonun enlemi ve yüksekliği), istasyonun meteorolojik verisinin ve zamanın fonksiyonu olarak modellendirilerek kestirilir. GNSS MET ağlarında, bu modeller kullanılarak PWV hesaplanır.

Radyosonda profil gözlemlerinden, ağırlıklı ortalama sıcaklık; Bölüm 3.3'te verilen Eşitlik 3.15'e uygun olarak hesaplanır (Askne and Nordius 1987; Bevis et al. 1992).

Profilin sıcaklık gözlemlerinin kalitesini de değerlendirmek amacıyla Bölüm 3.3'te açıklandığı gibi, profil sıcaklık gözlemleri yüksekliğin fonksiyonu polinom olarak modellendirilmiştir. En küçük kareler yöntemiyle istatistiksel olarak kestirilen polinom katsayılarının anlamlı olup olmadıkları test edilmiştir. Bu değerlendirmelerin sonucu; 8 km'ye kadarki profil yükseklikleri için 6 katsayı ve 30 km'ye kadarki profil yükseklikleri için 9 katsayının yeterli olduğu gözlenmiştir.

Modellemeden hesaplanan sıcaklığın karesel ortalama hatası  $m_T$  ve sıcaklık profili incelenerek, profil sıcaklıklarında kaba gözlem hatalarının olup olmadığı incelenmiştir. Kaba

hatalı olabilecek profiller belirlenmiş ve bunlar değerlendirmelerde dikkate alınmamıştır. Tüm radyosonda istasyonlarının profil sıcaklıklarının modellenmesinden; ortalama dengeleme sonrası karesel ortalama hata  $\pm 1,33$  K bulunmuştur.

Sıcaklığın polinomlarla modellenmesine paralel olarak,  $(e/T)$  ve  $(e/T^2)$  değerleri de yüksekliğin fonksiyonu olarak polinomlarla modellendirilmiş ve Eşitlik 3.14'teki sayısal integraller bu polinomlardan hesaplanmıştır.

Profil gözlemlerinin analizinden;  $T_m$ ,  $T_s$  ve  $Q$  parametreleri hesaplanmıştır.

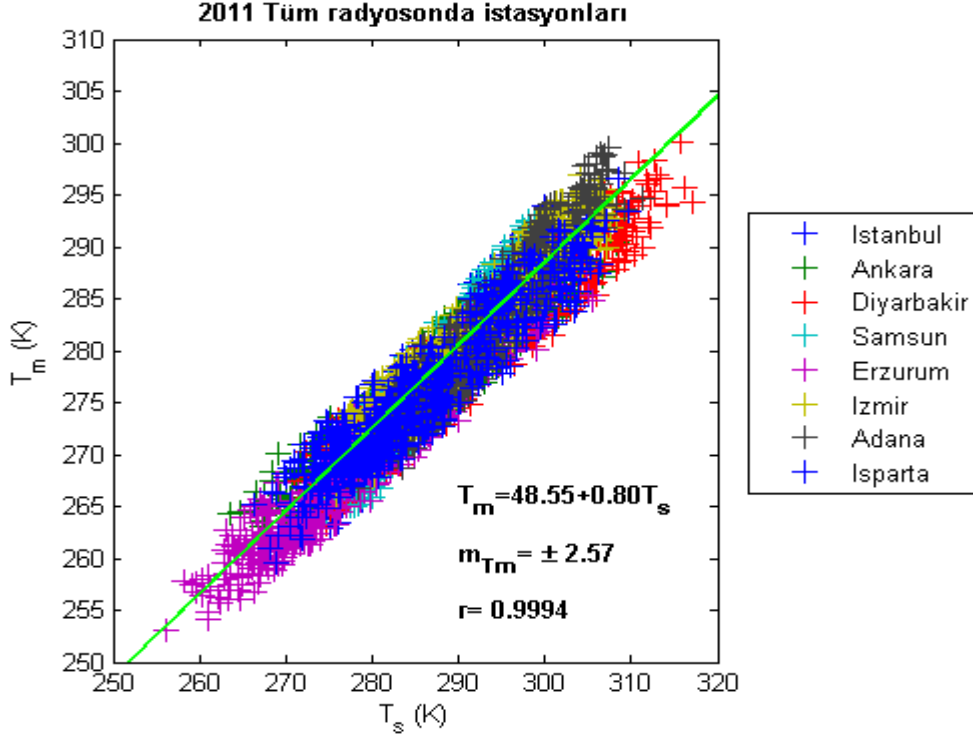
Türkiye'deki 8 radyosonda istasyonunun (Şekil 3.3) 2011 yılına ait radyosonda profil verileri, radyosonda ölçüm zamanları UTC=0<sup>h</sup> ve UTC=12<sup>h</sup> için değerlendirilmiştir.

Kaba hatalı olanlar elimine edildikten sonra toplam 4.103 adet profil değerlendirilmiştir.

#### **4.1.2 $T_m$ - $T_s$ Lineer Bağıntısının Çıkarılması**

Radyosondada su buharı basıncı  $e$  doğrudan gözlemlenmediğinden, bu değer, doyma noktası sıcaklığı ( $T_d$ ) ve basınç ( $p$ ) değerlerinden ıslak termometre sıcaklığına ( $T_w$ ) ve buradan doymuş su buharı basıncı ( $e^*$ ) ile iterasyon yoluyla elde edilir (Bölüm 3.3).

Her istasyonun  $T_m$ - $T_s$  grafikleri, yüzey sıcaklığı ile ağırlıklı ortalama sıcaklık arasındaki bağıntının doğrusala yakın olduğunu göstermektedir. Tüm Türkiye için  $T_m$ - $T_s$  grafiği Şekil 4.1'deki gibidir.



**Şekil 4.1** Tüm Türkiye için  $T_m$ - $T_s$  grafiği.

Her profil gözlemleri için;

$$T_m = a + bT_s \quad (4.1)$$

lineer bağıntısı yazılabilir. Burada; a ve b lineer regresyon katsayılarıdır. Bu katsayılar en küçük kareler yöntemiyle belirlenmiştir. Bu değerlendirmelerde de uyumsuz ölçü testi uygulanmıştır. Güvenirlilik %99,7 alınarak düzeltmeleri  $\pm 3m_{T_m}$  olan ölçüler ( $T_m$  değerleri) değerlendirmeye alınmamıştır. Radyosonda istasyonlarının her biri ve tümü için hesaplanan lineer regresyon katsayıları (a ve b) ve ortalama sıcaklığın a posteriori karesel ortalama hataları ( $m_{T_m}$ ) Çizelge 4.1’de görülmektedir. Ayrıca; katsayıların karesel ortalama hataları  $m_a$  ve  $m_b$  değerleri de Çizelge 4.1’de verilmektedir.

**Çizelge 4.1** Her bir istasyon için ve tüm istasyonlar için  $T_m-T_s$  lineer modeli katsayıları.

Radyosonda İstasyonları	Ort. $m_T$ (K)	$T_m=a+bT_s$				$m_{T_m}$ (K)
		a	$m_a$	b	$m_b$	
Istanbul	±1,28	24,41	±3,47	0,88	±0,01	±2,21
Ankara	±1,57	81,63	±3,23	0,68	±0,01	±2,36
Diyarbakır	±1,58	70,63	±2,70	0,72	±0,01	±2,26
Samsun	±1,32	2,36	±4,14	0,96	±0,01	±2,32
Erzurum	±1,21	57,81	±2,41	0,76	±0,01	±2,25
Izmir	±1,28	40,49	±3,44	0,83	±0,01	±2,33
Adana	±1,26	2,99	±4,36	0,95	±0,01	±2,44
Isparta	±1,23	73,52	±3,09	0,71	±0,01	±2,44
Tüm İstasyonlar	±1,33	48,55	±1,15	0,80	±0,00	±2,57

Tüm istasyonlar için,  $T_m-T_s$  arasındaki korelasyon 0,99 olarak bulunmuştur.

Profil verilerinin; istasyon grupları veya farklı veri grupları için, en küçük kareler yöntemiyle değerlendirilmelerinde; Çizelge 4.1'den,  $m_T$  değerleri dikkate alınarak, gözlemlerin ağırlıkları eşit alınmıştır.

Mevsimsel değişimlerin  $T_m$ 'deki etkisini incelemek amacıyla; bütün radyosonda profil gözlemleri mevsimlere ayrılarak, İlkbahar (Mart, Nisan, Mayıs), Yaz (Haziran, Temmuz, Ağustos), Sonbahar (Eylül, Ekim, Kasım) ve Kış (Aralık, Ocak, Şubat) olarak değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonuçları Çizelge 4.2'de görülmektedir.

**Çizelge 4.2**  $T_m$  modelindeki mevsimsel değişimleri.

Mevsimler	Ort. $m_T$ (K)	$T_m=a+bT_s$				$m_{T_m}$ (K)
		a	$m_a$	b	$m_b$	
Sonbahar	±1,53	64,96	±2,40	0,74	±0,01	±2,53
Kış	±1,06	78,10	±2,95	0,69	±0,01	±2,17
İlkbahar	±1,11	59,50	±3,25	0,76	±0,01	±2,28
Yaz	±1,57	80,27	±4,51	0,69	±0,02	±2,75

Farklı iklim bölgelerinin  $T_m$ 'ye etkisini incelemek amacıyla; ılıman iklim bölgelerinde bulunan (kıyılarda) İstanbul, Samsun İzmir ve Adana radyosonda istasyonları ve karasal iklim

bölgelerinde bulunan Ankara, Diyarbakır, Erzurum ve Isparta radyosonda istasyonları gözlemleri iki ayrı grup olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.3'te verilmiştir.

**Çizelge 4.3**  $T_m$  modelindeki konumsal değişimleri (İlman ve Karasal).

Konum	Ort. $m_T$ (K)	$T_m=a+bT_s$				$m_{T_m}$ (K)
		a	$m_a$	b	$m_b$	
Karasal	$\pm 1,29$	22,13	$\pm 1,88$	0,89	$\pm 0,01$	$\pm 2,38$
İlman	$\pm 1,37$	66,52	$\pm 1,37$	0,73	$\pm 0,00$	$\pm 2,43$

Ayrıca, gündüz ve gece gözlemlerinin  $T_m$  üzerindeki etkisini incelemek için; bütün radyosonda profil gözlemleri gözlem saatine göre,  $0^h$  ve  $12^h$  olarak ayrılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.4'te verilmektedir.

**Çizelge 4.4**  $T_m$  modelindeki gündüz-gece değişimleri.

Gözlem saati	Ort. $m_T$ (K)	$T_m=a+bT_s$				$m_{T_m}$ (K)
		a	$m_a$	b	$m_b$	
Gündüz ( $12^h$ )	$\pm 1,30$	44,72	$\pm 1,58$	0,81	$\pm 0,01$	$\pm 2,51$
Gece ( $0^h$ )	$\pm 1,35$	37,63	$\pm 1,60$	0,84	$\pm 0,01$	$\pm 2,31$

Profil gözlemlerindeki belirsizliklerden ya da lineer modellerdeki yetersizliklerden dolayı,  $T_m$  kestirimleri arasında anlamlı farkların olup olmadığını test etmek için tek yönlü F testi kullanılabilir (Aksoy 1974). Bu nedenle,  $T_m$ 'nin karesel ortalama hatalarına bu istatistiksel test uygulanmıştır.  $m_{tüm}$  (tüm istasyonlar için elde edilen  $T_m$ 'nin karesel ortalama hatası) ile mevsimsel değişimlerin karesel ortalama hataları ( $m_{sonbahar}$ ,  $m_{kış}$ ,  $m_{ilkbahar}$ ,  $m_{yaz}$ ) arasındaki farkların, gündüz ( $m_{gündüz}$ ) ve gece ( $m_{gece}$ ) karesel ortalama hatalarının arasındaki farkların ve ayrıca ılıman ( $m_{ılıman}$ ) ve karasal ( $m_{karasal}$ ) karesel ortalama hatalarının arasındaki farkların test istatistiği Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

**Çizelge 4.5**  $T_m$  modellerinin test istatistiği.

$m_i = T_{mi}$ KOH	$m_j = T_{mj}$ KOH	$F = \frac{m_i^2}{m_j^2}$ $m_i > m_j$ alınarak	$F_{1,f2,s}$ $s = \%95$	Eğer $F_s > F$ ; $m_i - m_j$ arasındaki fark anlamlı değildir
$m_{yaz}$	$m_{tüm}$	1,145	1,09	anlamlı
$m_{tüm}$	$m_{kış}$	1,403	1,09	anlamlı
$m_{tüm}$	$m_{ilkbahar}$	1,271	1,09	anlamlı
$m_{tüm}$	$m_{sonbahar}$	1,032	1,09	anlamlı değil
$m_{yaz}$	$m_{kış}$	1,606	1,11	anlamlı
$m_{ılıman}$	$m_{karasal}$	1,042	1,08	anlamlı değil
$m_{gündüz}$	$m_{gece}$	1,181	1,08	anlamlı

Çizelge 4.5'ten, tüm-sonbahar ve ılıman-karasal veri gruplarının karesel ortalama hatalarının eşit, diğer grupların karesel ortalama hatalarının gruplara özgü olduğu ve eşit alınamayacağı görülüyor.

Mevsimsel, gece-gündüz, ılıman-karasal iklim bölgeleri nedeniyle,  $T_m$  üzerinde anlamlı sistematik etkilerin olup olmadığını irdelemek için, Çizelge 4.2, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'teki modeller; tüm istasyonlar için geliştirilen model ve diğer modeller kullanılarak,  $T_s=293,2$  K ( $t=20$  °C, normal) ve  $T_s=313,2$  K ( $t=40$  °C, ekstrem) sıcaklıklarındaki  $T_m$  değerleri hesaplanmıştır. Modeller arasındaki farklar;  $\Delta T_m=T_{mi}-T_{mj}$ , ve bu farkların karesel ortalama hataları;  $m_{\Delta T_m}=(m_{T_{mi}}^2+m_{T_{mj}}^2)^{1/2}$  olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar, Çizelge 4.6'da verilmiştir. Bu çizelgede ayrıca, karşılaştırma amacıyla, Bevis et al. (1992)'de verilen ve Kuzey Amerika için geliştirilen,  $T_m=70,2+0,72T_s$  modelinden hesaplanan değerler de verilmektedir.

**Çizelge 4.6**  $T_m-T_s$  modelleri arasındaki farklar.

Farklar	$\Delta T_m$ (K)		$\pm m_{\Delta T_m}$ (K)	Farklar	$\Delta T_m$ (K)		$\pm m_{\Delta T_m}$ (K)
	$T_s=293,2$ K	$T_s=313,2$ K			$T_s=293,2$ K	$T_s=313,2$ K	
Tüm-Yaz	0,51	2,71	3,76	Bevis-Yaz	-1,28	-0,68	5,27
Tüm-Sonb.	1,17	-2,37	3,61	Bevis-Sonb.	-0,82	-1,02	5,17
Tüm-Kış	2,68	4,88	3,36	Bevis-Kış	0,87	1,43	5,00
Tüm-İlkb.	0,77	1,57	3,44	Bevis-İlkb.	-1,01	-1,82	5,04
Yaz-Kış	2,17	2,17	3,50	Bevis-Gündüz	-0,89	-2,63	5,15
İlkb.-Sonb.	0,40	0,80	3,41	Bevis-Gece	-2,59	-4,99	5,06
Gece-Gündüz	1,70	1,60	3,41	Bevis-Karasal	1,78	-5,18	5,09
Karasal-İlman	2,52	5,71	3,40	Bevis-İlman	0,75	0,54	5,11

Tüm verilerden elde edilen modelin, ortalamalar nedeniyle daha az sistematik bileşene sahip olduğu söylenebilir. Çizelge 4.6'da, normal sıcaklıklarda, modellerden elde edilen  $T_m$  değerleri arasında anlamlı farkların olmadığı, ekstrem sıcaklıklarda ise, tüm-kış, karasal – ılıman için anlamlı farkların olduğu görülüyor. Bevis et al. 1992 modelinin, sadece ekstrem sıcaklıkta, karasal model ile anlamlı farklı sonuçlar verdiği gözleniyor.

$T_m-T_s$  modellerinin sistematik etkileri içerip içermediği ve presizyonları; Bölüm 5.4'te de irdelenmektedir.



## 4.2 Q DÖNÜŞÜM FAKTÖRÜNÜN MODELLENMESİ

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

- fiziksel model,

$$Q_{fiziksel} = a_0 + \frac{a_1}{a_2 + T_{\Delta}} \quad (4.2)$$

- polinom modeli,

$$Q_{polinom} = a_0 + a_1 T_{\Delta} + a_2 T_{\Delta}^2 \quad (4.3)$$

- yıllık model,

$$Q_{yillik} = a_0 + a_1 \theta + a_2 \sin\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) + a_3 \cos\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) \quad (4.4)$$

- hibrit model,

$$Q_{hibrit} = a_0 + a_1 T_{\Delta} + a_2 T_{\Delta}^2 + a_3 \theta + a_4 \sin\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) + a_5 \cos\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) \quad (4.5)$$

olarak modellendirilmiştir. Burada;  $\theta$ ; istasyon enlemi ( $^{\circ}$ ),  $t_D$ ; yılın günü,  $T_{\Delta} = T_s - T_{ort}$ ,  $T_s$ ; yüzey sıcaklığı,  $T_{ort}$ ; ortalama yüzey sıcaklığıdır ve 283,49 K değerindedir.

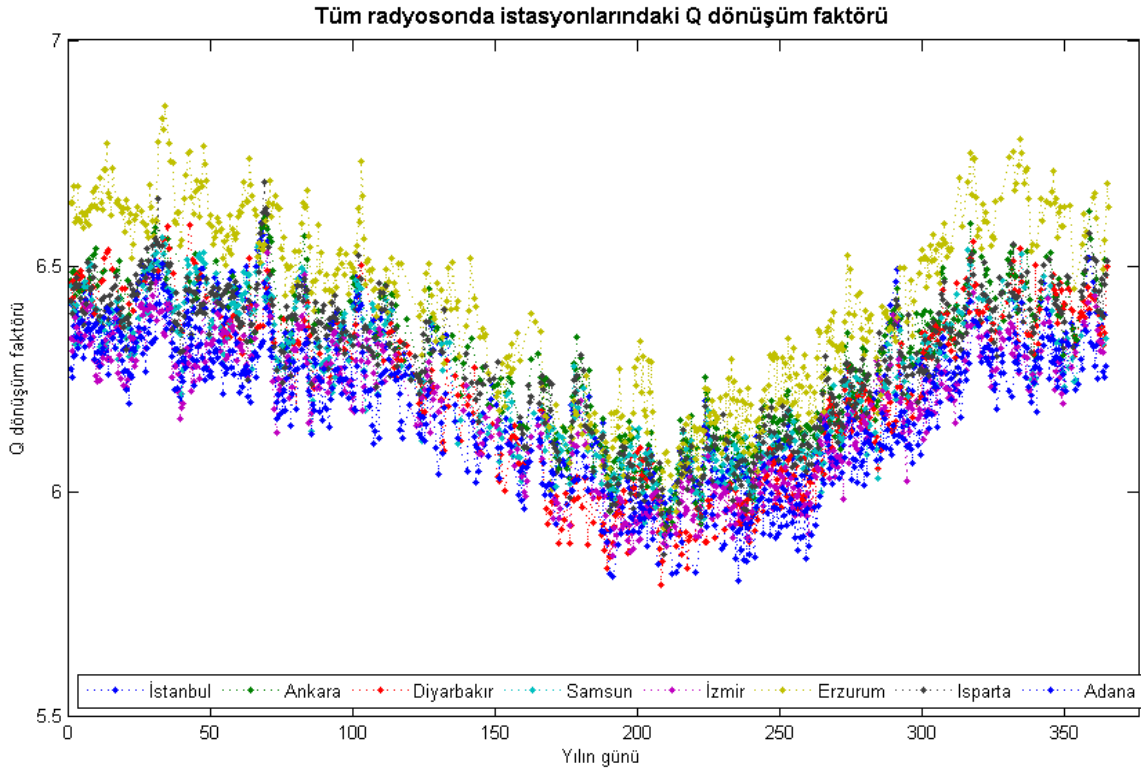
Bulunan katsayılar Çizelge 4.7'de görülmektedir.

**Çizelge 4.7** Q Modelleri katsayıları (Emardson and Derks 2000).

Katsayı	Model							
	Fiziksel		Polinom		Yıllık		Hibrit	
	Değer	$\sigma$	Değer	$\sigma$	Değer	$\sigma$	Değer	$\sigma$
<b>a<sub>0</sub></b>	2,1404x10 <sup>1</sup>	1x10 <sup>0</sup>	6,458	2x10 <sup>-4</sup>	5,882	1x10 <sup>-3</sup>	6,457	2x10 <sup>-4</sup>
<b>a<sub>1</sub></b>	1,2559x10 <sup>4</sup>	2x10 <sup>3</sup>	-1,78 x10 <sup>-2</sup>	2x10 <sup>-5</sup>	0,01113	3x10 <sup>-5</sup>	-1,78x10 <sup>-2</sup>	3x10 <sup>-5</sup>
<b>a<sub>2</sub></b>	-8,4026x10 <sup>1</sup>	7x10 <sup>1</sup>	-2,2 x10 <sup>-5</sup>	2x10 <sup>-6</sup>	0,064	4x10 <sup>-4</sup>	-1,9x10 <sup>-5</sup>	2x10 <sup>-6</sup>
<b>a<sub>3</sub></b>	-	-	-	-	0,127	4x10 <sup>-4</sup>	1,3x10 <sup>-2</sup>	3x10 <sup>-4</sup>
<b>a<sub>4</sub></b>	-	-	-	-	-	-	0,4x10 <sup>-2</sup>	4x10 <sup>-4</sup>
<b>KOH (%)</b>	1,15		1,15		1,43		1,14	

Çizelge 4.7'den, hibrit modelle  $Q$  değerinin % 1,14 presizyonla hesaplanabildiği görülmektedir.

Tüm radyosonda istasyonlarında elde edilen Q dönüşüm faktörleri grafiği Şekil 4.2’de görülmektedir.



**Şekil 4.2** Tüm radyosonda istasyonlarında elde edilen Q dönüşüm faktörleri grafiği.

Tüm istasyonlar için, Q dönüşüm faktörlerinin zaman serisinin (1 yıllık) periyodik bir görünüm sergilediği Şekil 4.2’den görülmektedir. Q’nun parametrelendirilmesinde kullanılmak amacıyla, anlamlı periyotların belirlenmesi uygun olacaktır.

Bölüm 2.3’de açıklandığı gibi, yeteri derecede uzun periyoda sahip olan ve zamana homojen dağılmış meteorolojik gözlemlerin ve parametrelerin zaman serileri Fourier Transformasyonu ile dönüştürülerek, içlerindeki periyodik bileşenlerin frekansları ve genlikleri belirlenebilir.

Ayrık gözlem serilerinin FFT (Fast Fourier Transform) ile periodogramlarının elde edilebilmesi için eşit zaman aralıklarında düzenlenmiş zaman serileri gerekmektedir. Ancak, gözlem dizilerinde, kaba hatalar, gözlem aletlerinin ve gözlem ortamının uygun olmaması gibi nedenlerle düzgün zaman serilerinin üretilmesi oldukça zordur. Çoğunlukla boşluklardan oluşan zaman serileri söz konusudur. Bu nedenle, boşluklu zaman serilerinin FFT’si için iki yol izlenebilir.

İzlenecek yollardan biri, uygun algoritmalar kullanılarak boşlukların doldurulmasıdır. Örneğin, düzensiz modellenmiş ve noksan verili diziler için MATLAB plomb (Lomb-Scargle periodogram) kullanılabilir.

İkinci yolda ise, önce yeterli uzunluktaki gözlemler; Eşitlik 2.27-Eşitlik 2.29 kullanılarak en küçük kareler yöntemiyle değerlendirilerek, periyodik fonksiyonu elde edilir. Daha sonra, bu periyodik fonksiyon ile eşit aralıklı ayırık zaman serisi verileri hesaplanır ve bu zaman dizisinin FFT'si ile periodogramı elde edilir.

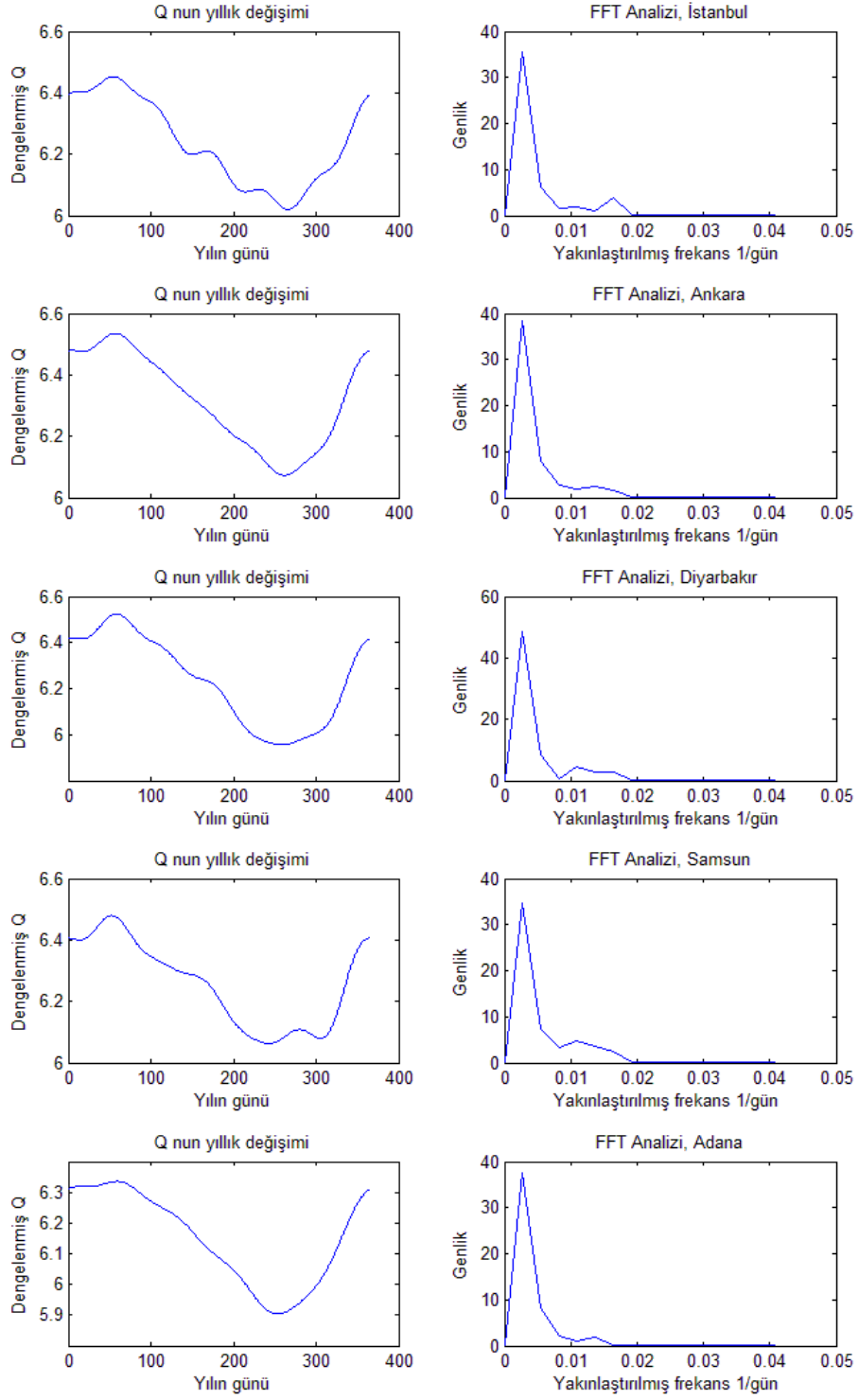
Yeteri uzunluktaki veriler için her iki yol da benzer sonuçlar vermektedir (URL-14 2015). Zaman serilerinin FFT'si için, lineer trendin gözlemlerden çıkarılması önerilmektedir (Lüdecke et al. 2013).

MATLAB'da geliştirilen yazılım ile her bir radyosonda istasyonunun Q zaman serilerinin ve tüm istasyonların zaman serilerinin spektral analizi yapılmıştır. Trigonometrik Fourier serisi katsayıları (Eşitlik 2.29) Çizelge 4.8'de görülmektedir. Elde edilen periodogramlar Şekil 4.3'te görülmektedir.

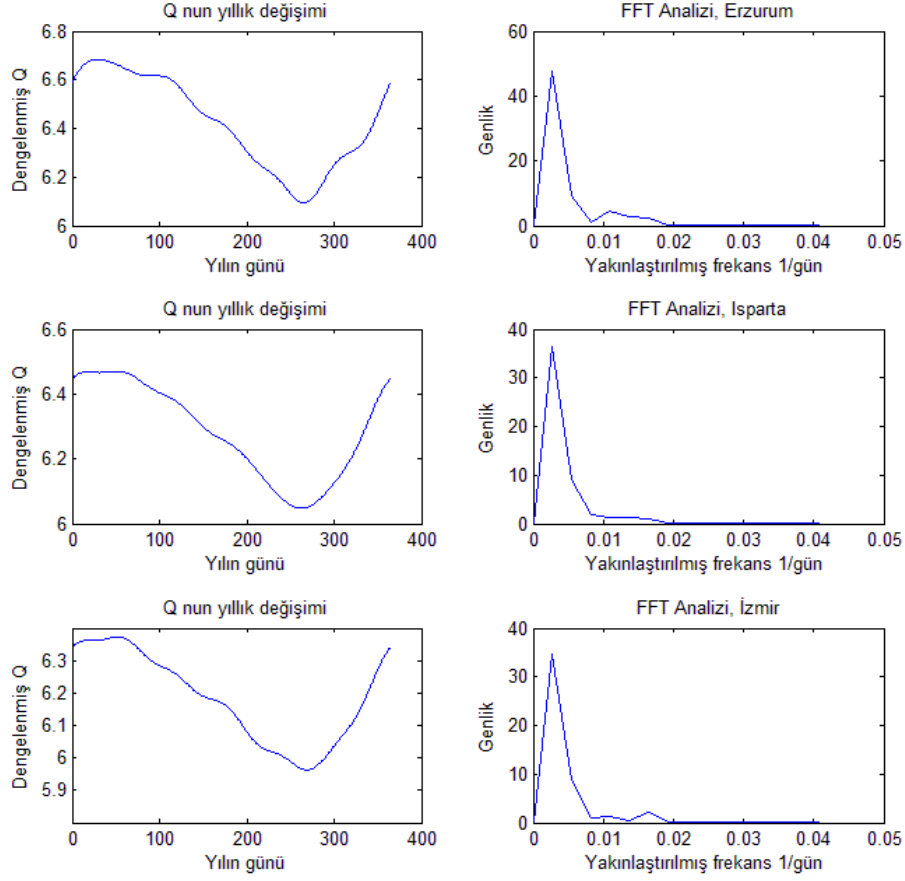
**Çizelge 4.8** Q faktörünün trigonometrik Fourier serisi katsayıları.

İstasyonlar	$c_0$	$c_1$ $\theta_1$ (°)	$c_2$ $\theta_2$ (°)	$c_3$ $\theta_3$ (°)	$c_4$ $\theta_4$ (°)	$c_5$ $\theta_5$ (°)	$c_6$ $\theta_6$ (°)	$m_0$
İstanbul	6,2373	0,1947 57,171	0,0342 42,612	0,0075 -86,726	0,0105 -21,541	0,0064* 83,023	0,0213 -42,311	0,0681
Ankara	6,3147	0,2098 61,458	0,0434 21,203	0,0141 -63,963	0,0099 -67,846	0,0126 -43,357	0,0094 -65,783	0,0650
Diyarbakır	6,2337	0,2662 66,472	0,0466 23,896	0,0021 -70,282	0,0237 -40,399	0,0161 -82,215	0,0154 -39,253	0,0605
Samsun	6,2554	0,1886 61,968	0,0399 28,652	0,0191 76,614	0,0255 -53,441	0,0194 -72,759	0,0138 -83,469	0,0669
Erzurum	6,4247	0,2613 68,623	0,0520 16,128	0,0057* 44,416	0,0244 88,956	0,0152 80,5043	0,0140 -21,072	0,0689
İzmir	6,1826	0,1889 61,018	0,0476 18,443	0,0054* -0,160	0,0067* -37,529	0,0020* 45,462	0,0114 -15,488	0,0623
Isparta	6,2851	0,1989 62,862	0,0503 11,347	0,0107 -46,438	0,0065* 28,196	0,0063* -45,115	0,0053* -9,240	0,0646
Adana	6,1480	0,2056 60,940	0,0446 -3,281	0,0108 -64,079	0,0056* -21,198	0,0109 -52,323	0,0010* 19,776	0,0571
Tüm istasyonlar	6,2604	0,2076 62,908	0,0449 18,351	0,0066 88,775	0,0129 -64,543	0,0053 -64,426	0,0048 -85,843	0,1069

\* anlamlı olmayan parametreler

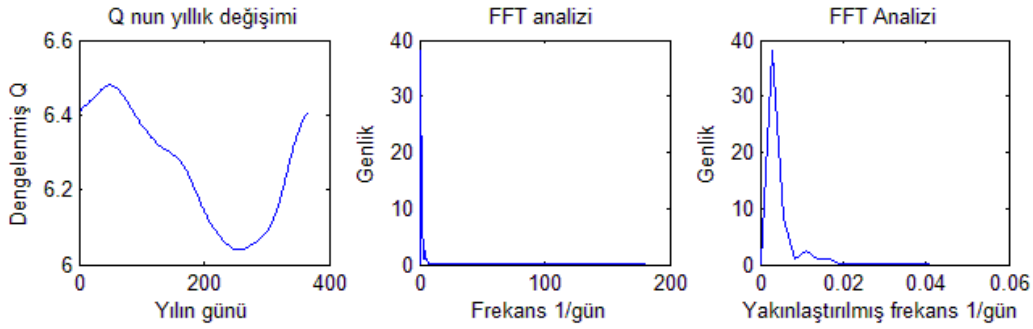


Şekil 4.3 (devam ediyor).



**Şekil 4.3** Radyosonda istasyonlarının Q periodogramları.

Tüm Türkiye için Q periodogramı Şekil 4.4’te görülmektedir.



**Şekil 4.4** Tüm Türkiye için Q periodogramı.

Periodogramlar, tüm istasyonlarda birbirlerine benzemektedir. Bir büyük temel bileşen ve bir veya iki küçük bileşen görülmektedir. Tüm istasyonlar için elde edilen periodogramın, diğer istasyonların tüm özelliklerini içerdiği gözlenmektedir. Bu nedenle, Şekil 4.4’teki periodogram değerlendirilmiştir.

Tüm istasyonlar için Q periodogramların incelenmesinden, Q zaman serilerinde, yaklaşık 365 günlük, genliği 0,139 (% 2,3) olan bir anlamlı periyot ve yaklaşık 91 günlük genliği 0,009 (% 0,15) olan anlamlı olmayan periyotun olduğu görülmektedir. Bu nedenle, Emardson and Derks'in modellerinde alınan ve periyodu 365 gün olan temel bileşenin modellemede dikkate alınmasının yeterli olduğu değerlendirilmiştir.

Emardson and Derks'de (2000) verilen modeller esas alınarak gerçekleştirilen Q dönüşüm faktörünün Tüm Türkiye için modellendirilmesi çalışmaları aşağıda verilmektedir.

Sekiz radyosonda istasyon için hesaplanan Q değerleri ölçü olarak alınmış ve istasyonların enlemi, yüksekliği, yılın günü ve yüzey sıcaklığı kullanılarak en küçük kareler yöntemiyle dengeleme yapılmış ve aşağıdaki modellerin katsayıları hesaplanmıştır:

- Eşitlik 4.3'teki modele göre;

$$Q_{polinom} = a_0 + a_1T_{\Delta} + a_2T_{\Delta}^2 \quad (4.6)$$

- Eşitlik 4.4'teki modele göre;

$$Q_{yillik} = a_0 + a_1\theta + a_2 \sin\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) + a_3 \cos\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) \quad (4.7)$$

- Eşitlik 4.5'teki modele göre;

$$Q_{hibrit} = a_0 + a_1T_{\Delta} + a_2T_{\Delta}^2 + a_3\theta + a_4 \sin\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) + a_5 \cos\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) \quad (4.8)$$

- Eşitlik 4.4'teki model, istasyon yüksekliği (H) parametresi eklenerek genişletilmiştir.

$$Q_{yillik} = a_0 + a_1\theta + a_2H + a_3 \sin\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) + a_4 \cos\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) \quad (4.9)$$

- Eşitlik 4.5'teki modelden istasyon yüksekliği (H) parametresi eklenerek geliştirilen model;

$$Q_{hibrit} = a_0 + a_1 T_{\Delta} + a_2 T_{\Delta}^2 + a_3 \theta + a_4 H + a_5 \sin\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) + a_6 \cos\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) \quad (4.10)$$

Hesaplanan katsayılar Çizelge 4.9’da verilmektedir. Değerlendirmelerde tüm istasyonlardaki yüzey sıcaklıklarının ortalaması olarak  $T_{ort.}=287,7620$  K alınmıştır.

**Çizelge 4.9** Hesaplanan Q dönüşüm faktörleri modellerinin katsayıları.

Katsayılar	Model									
	Eşitlik 4.6’ya göre		Eşitlik 4.7’ye göre		Eşitlik 4.8’e göre		Eşitlik 4.9’a göre		Eşitlik 4.10’a göre	
	Değer	KOH	Değer	KOH	Değer	KOH	Değer	KOH	Değer	KOH
<b>a<sub>0</sub></b>	5,3867	0,0425	6,2587	0,0019	6,0309	0,0352	5,2731	0,0306	5,7053	0,0306
<b>a<sub>1</sub></b>	0,0222	0,0011	-0,0162	0,0001	-0,0113	0,0002	0,0235	0,0008	-0,0067	0,0002
<b>a<sub>2</sub></b>	0,0907	0,0023	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1145	0,0018	0,0000	0,0000
<b>a<sub>3</sub></b>	0,1901	0,0024			0,0057	0,0009	0,0931	0,0017	0,0130	0,0008
<b>a<sub>4</sub></b>					0,0565	0,0019	0,1920	0,0017	0,0833	0,0020
<b>a<sub>5</sub></b>					0,0699	0,0030			0,0709	0,0016
<b>a<sub>6</sub></b>									0,1195	0,0028
	$m_Q = \pm 0,1064$		$m_Q = \pm 0,0924$		$m_Q = \pm 0,0815$		$m_Q = \pm 0,0764$		$m_Q = \pm 0,0684$	
<b>KOH (%)</b>	1,98		1,48		1,35		1,45		1,12	

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

Ortalama  $Q=6,26$  için, Eşitlik 4.10’a göre hesaplanan Q değerlerinin oransal presizyonu  $m_Q/Q \approx \% 1,1$  olmaktadır.





## BÖLÜM 5

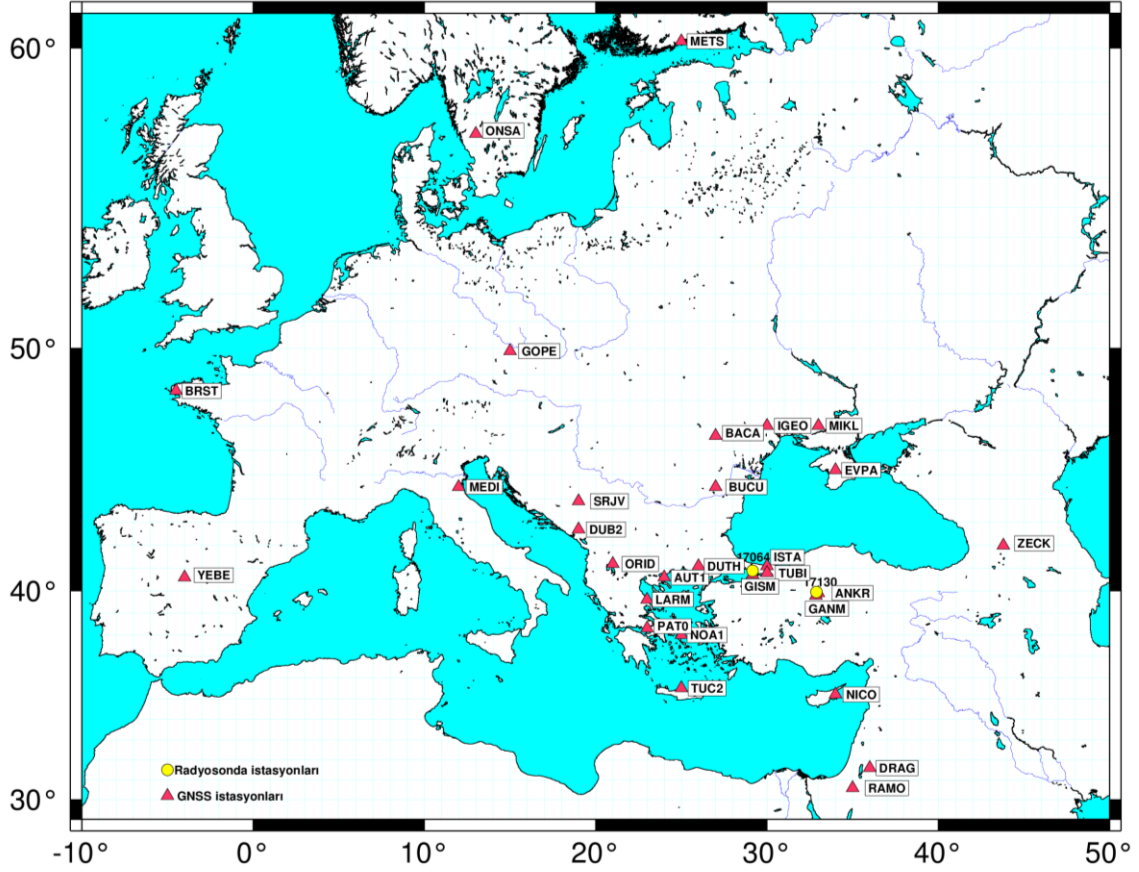
### GELİŞTİRİLEN $T_m$ VE Q MODELLERİNİN GNSS VERİLERİ İLE DOĞRULANMASI ÇALIŞMALARI

#### 5.1 GNSS GÖZLEMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ, $PWV_{GNSS}$ AĞININ SEÇİMİ

Ilıman iklim bölgelerini temsilen İstanbul ve karasal iklim bölgelerini temsilen Ankara radyosonda istasyonlarında sürekli GNSS istasyonları (GISM ve GANM) kurulmuştur ve Ekim 2013'ten beri çalıştırılmaktadır (Şekil 5.1). Bu istasyonların kurulumu sırasında sinyal yansıması hatasından en az etkilenecek yerlerin seçilmesine dikkat edilmiştir (Mekik and Can 2010). Bu iki istasyondaki veriler kaydedilip Zonguldak'taki kontrol merkezine transfer edilmektedir. Bu veriler <http://gnssmet.beun.edu.tr/> sitesinden indirilebilir. Verilerin değerlendirilmesi için oluşturulan jeodezik ağ, Dousa (2004), Dousa and Bennitt'e (2013) ve Rozsa et al. 'a (2014) göre deneysel optimizasyon yoluyla tasarlanmıştır. Ağın son durumu Şekil 5.2'de görülmektedir. Bu ağ, Bernese GNSS Software v5.0 ve GAMIT/GLOBK yazılımları ile değerlendirilmiştir. Öncelikle istasyonların koordinatları yüksek doğruluklu olarak üretilmiş ve sonrasında ZTD kestirimleri hesaplanmıştır.



Şekil 5.1 GANM ve GISM GNSS istasyonları



Şekil 5.2 PWV kestiriminde kullanılan jeodezik ağ.

## 5.2 GNSS GÖZLEMLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ STRATEJİLERİ

Profil analiziyle geliştirilen ağırlıklı ortalama sıcaklık  $T_m$  ve  $Q$  dönüşüm faktörlerinin kullanılması yoluyla, GPS verilerinden hesaplanan yoğuşabilir su buharı değerlerinin radyosonda istasyonundan elde edilen yoğuşabilir su buharı değerleri ile karşılaştırılması ve kontrolü amaçlanmaktadır. Bu nedenle, Ankara ve İstanbul'daki sürekli GPS istasyon verilerinden doğru ve güvenilir toplam zenit gecikmesi değerlerinin kestirimi çalışmaları yapılmıştır.

Toplam zenit gecikmesi değerleri, Bernese ve GAMIT/GLOBK bilimsel yazılımları ile kestirilmektedir (Beutler et al. 2007). Her iki yazılımla hesaplanan verilerin karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Yapılan değerlendirmelerde toplamda 28 GNSS istasyonundan yararlanılmıştır. Bunlardan 2 tanesi İstanbul ve Ankara radyosonda istasyonlarında kurulan sürekli GNSS istasyonları (GISM ve GANM) olup kalan 26 tanesi IGS ağına dahil istasyonlardır (ZECK, ONSA, BRST, RAMO, METS, ANKR, ISTA, BUCU, NICO, PAT0, TUC2, AUT1, DUTH, ORID, BACA, IGEO, MIKL, SRJV, DRAG, DUB2, GOPE, YEBE, NOA1, LARM, MEDI, TUBI). Troposferik parametre kestiriminin doğruluğu, nokta konum doğruluğu ile ilişkili olduğundan, öncelikle oluşturulan ağdaki tüm noktaların koordinatları yüksek doğrulukla hesaplanmıştır. Bu işlemlerde, koordinat hesabı sonrasında referans kabul edilen istasyonların koordinatları sabit kabul edilerek troposferik parametre kestirimine geçilmiştir. Böylelikle, bilinmeyen olarak kabul edilen koordinatlar bilinen parametreler olarak denkleme dahil olup, konum ve troposfer bileşeni arasındaki korelasyon giderilmiştir (Gürbüz vd. 2014). Bernese GNSS Software v5.0 ve GAMIT/GLOBK yazılımları ile değerlendirmede kullanılan parametreler Çizelge 5.1'deki gibidir.

**Çizelge 5.1** Bernese GNSS Software v5.0 ve GAMIT/GLOBK yazılımlarında kullanılan değerlendirme stratejileri.

Değerlendirme parametreleri	Değerlendirme stratejileri	
	Bernese GNSS Software v5.0	GAMIT/GLOBK
Giriş verileri (Gözlem, iyonosfer, efemeris dosyaları)	Günlük	Günlük
Ağ dizaynı	Maksimum ortak gözleme göre (OBS-MAX)	Tüm istasyon koordinatları ve yörünge parametreleri ile çözüme göre (RELAX)
Uydu yükseklik açısı	10°	10°
Veri toplama sıklığı	30 saniye	30 saniye
Yörünge	IGS hassas yörünge	IGS hassas yörünge
İstasyon koordinatları	ITRF 2008 referans ağı (Ölçüm epoğu)	ITRF 2008 referans ağı (Ölçüm epoğu)
Anten faz merkezi kayıklıkları	PHAS_COD.I08	RCVANT.DAT
İyonosfer	İyonosferden bağımsız lineer kombinasyonu (L3)	AUTCLN
Sinyal belirsizlikleri	Kuazi-iyonosferden bağımsız free (QIF) stratejisi ve SIGMA stratejisi	AUTCLN
Öncül model	Saastamoinen modeli ile kuru Niell izdüşüm fonksiyonu	Saastamoinen modeli ile kuru Niell izdüşüm fonksiyonu
İzdüşüm fonksiyonu	Islak Niell izdüşüm fonksiyonu	Islak Niell izdüşüm fonksiyonu
ZTD kestirimleri	1'er saat aralıklar	1'er saat aralıklar

Troposferik bileşen hesabında, öncelikle bir haftalık gözlem verilerinden yararlanılarak presizyonlu koordinatlar belirlenmiş ve sonra bu koordinatlar sabit alınarak ZTD değerleri hesaplanmıştır.

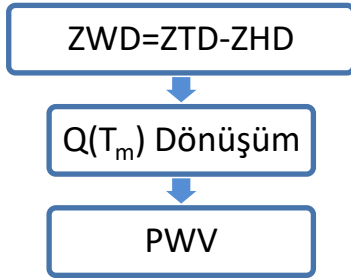
Bernese GNSS Software yazılımı ile ağdaki bazlar OBS-MAX stratejisi ile oluşturulmuştur. Anten faz merkezi kayıklıkları PHAS\_COD.I08 dosyasında alınmıştır. GAMIT/GLOBK yazılımında ise bazlar RELAX stratejisi ile oluşturulmuş olup anten faz merkezi bilgileri RCVANT.DAT dosyasından alınmıştır. Her iki yazılımda da öncül model olarak Saastamoinen modeli ve izdüşüm fonksiyonu olarak Niell izdüşüm fonksiyonu kullanılmıştır.

GNSS verilerinden üretilmiş ZTD değerlerinin ortalama karesel ortalama hataları Ankara için  $\pm 1$  mm ve İstanbul için  $\pm 1,2$  mm civarındadır.

### 5.3 GNSS İLE SU BUHARI KESTİRİMİNİN HATA ANALİZİ

#### 5.3.1 Hata Yayılma Yasasına Göre Analiz, Presizyon Araştırması

GNSS ile su buharı kestiriminin temel süreci;



alınırsa, hata yayılma yasasına göre;

$$m_{PWV} = \sqrt{\frac{m_{ZTD}}{Q} + \frac{m_{ZHD}}{Q} + (PWV \frac{m_Q}{Q})} \quad (5.1)$$

olarak bulunur (Ning 2012; Pacione et al. 2014). Bu genel eşitliğin terimleri ayrı ayrı belirlenmelidir.

#### 5.3.1.1 Toplam Zenit Gecikmesinin Karesel Ortalama Hatasının ( $m_{ZTD}$ ) Belirlenmesi

ZTD'nin presizyonu; uydu yörünge hatası, uydu-alıcı saat hataları, iyonosferik etkiler, izdüşüm fonksiyonu hatası, troposferik modelleme, sinyal yansıma vb. hatalarının ve GNSS ağının noktalarının konum presizyonları, noktaların yoğunluğu ve dağılımları ile kullanılan değerlendirme stratejilerine bağlı olarak hesaplanabilir.

Yüksek presizyonlu konum belirleme çalışmaları sonucu; yüksek doğruluklu yörünge ve saat bilgileri, geliştirilmiş iyonosferik ve troposferik modeller ve izdüşüm fonksiyonları, optimize edilen ağlar ve standardize edilmiş değerlendirme stratejileri yoluyla toplam zenit gecikmesi hataları minimize edilmiştir. IGS istasyonlarındaki değerlendirmelerden;

$$m_{ZTD} = \pm 2-4 \text{ mm } (1\sigma) \quad (5.2)$$

olarak verilmektedir (Wang et al. 2005; Ning 2012; Pacione et al. 2014).

### 5.3.1.2 Kuru veya Hidrostatik Bileşenin Oransal Hatalarının Toplamı

Kuru veya hidrostatik bileşenin oransal hatalarının toplamı;

$$ZHD = 10^{-6} k_1 \frac{R_d}{g_m} p \quad (5.3)$$

bağıntısından;

$$\left( \frac{dZHD}{ZHD} \right)^2 = \left( \frac{dk_1}{k_1} \right)^2 + \left( \frac{dR_d}{R_d} \right)^2 + \left( \frac{dg_m}{g_m} \right)^2 + \left( \frac{dp}{p} \right)^2 \quad (5.4)$$

yazılabilir (Ning 2012; Pacione et al. 2014). Burada;

$$k_1 = 77,60 \pm 0,05 \text{ [k/hPa]}$$

$$R_d = 287,058 \pm 0,006 \text{ [Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}\text{]}$$

$$g_m = 9.784 \pm 0,01 \text{ [ms}^{-2}\text{]}$$

değerlerinin karesel ortalama hatalarının ve oransal hatalarının çok küçük olduğu ve ZHD'yi önemli derecede etkilemeyeceği görülür. Temel bağıntı,

$$ZHD = 0,002277(p_s - 0,155471e_s) \quad (5.5)$$

bağıntısından;

$$m_{ZHD}^2 = (0,002277m_{p_s})^2 + (3,54 \cdot 10^{-4} m_{e_s})^2 \text{ [m]} \quad (5.6)$$

yazılabilir. Burada, istasyon noktasının su buharı basıncının hatasının kuru bileşene etkisi çok küçük olduğundan (maks.  $m_{e_s} = \pm 10$  hPa için  $m_{ZHD} = \pm 0,1$  mm) bu hata ihmal edilebilir.

Sonuç olarak;

$$m_{ZHD} = \pm 0,002277 m_{p_s} \quad (5.7)$$

olur.

ZHD'nin yüksekliğe bağımlı olduğu ancak PWV'nin yüksekliğe bağımlılığının ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu gösterilmiştir (Brenot et al. 2014).

### 5.3.1.3 Dönüşüm Faktörü Hatasının PWV'ye Etkisi

Eşitlik 2.21'den, hata yayılma yasasına göre;

$$m_Q = 10^{-6} \rho_w R_w \sqrt{\frac{m_{k_3}}{T_m} + m_{k_2} + \left(k_3 \frac{m_{T_m}}{T_m^2}\right)} \quad (5.8)$$

olarak verilmektedir (Ning 2012; Ning et al. 2015). Eşitlikteki katsayıların karesel ortalama hataları dikkate alınarak (Bölüm 2.1'de veriliyor); dönüşüm faktörünün hatası Ning'de (2012) araştırılmıştır. Bu çalışmaya göre;

$$m_Q = \pm 0,063 - 0,068 \quad (m_{T_m} = \pm 2,54 \text{ K için})$$

olarak veriliyor. Bu çalışma verileri ile  $Q_{ort.} = 6.26$  ve Bölüm 2.1'deki katsayılar ile,

$$m_Q = \pm 0,057 \quad (\% 1,03, m_{T_m} = 2,54 \text{ K için})$$

elde edilmiştir. Eşitlik 2.21'den;

$$\frac{dPWV}{PWV} = \frac{1}{1 + \frac{k_2}{k_3}} \cdot \frac{dT_m}{T_m} \quad (5.9)$$

olur. Burada;

$$\frac{k_2'}{k_3} \cong 5,9 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

gibi çok küçük bir değer olduğundan;

$$\frac{dPWV}{PWV} \cong \frac{dT_m}{T_m} \quad (5.10)$$

olarak alınabilir. Bu eşitlikten;

$$m_{PWV} \cong \pm \frac{PWV}{T_m} m_{T_m} \quad (5.11)$$

yazılabilir (Bevis et al. 1994; Wang et al. 2005). Buradan; örneğin, PWV'nin % 1 ve % 2 presizyonla dönüştürülebilmesi için sırasıyla  $m_{T_m} = \pm 2,4 K$ ,  $m_{T_m} = \pm 4,8 K$  olmalıdır.

### 5.3.1.4 GNSS İle PWV'nin Elde Edilme Sürecinin Hata Analizi

Yukarıdaki bağıntılar; normal meteorolojik koşullar için yani  $p=1013,25$  hPa,  $t=18$  °C,  $e=15$  hPa,  $H=\% 50$  ve tüm Türkiye için çıkarılan  $T_m=48,55+0,8T_s \pm 2,54$  K ile ortalama  $Q=6,26 \pm 0,0684$ ,  $T_{mort.}=287,7620$  K için hata analizi sonuçları Çizelge 5.2'de verilmektedir. Burada, ZTD, ZHD ve  $T_m$  parametrelerinin karesel ortalama hataları ve bunların PWV'ye etkisi gösterilmektedir.

Çizelge 5.2 Hata analizi sonuçları.

Parametre	Standart sapma	$\frac{\sigma_{ZTD}}{Q}$	$\frac{\sigma_{ZHD}}{Q}$	$\sigma_Q/Q \cdot PWV$	
				PWV=10 mm	PWV=50 mm
ZTD [mm]	$\pm 4-6$				
Yer basıncı $p_s$ [hPa]	$\pm 1,7$				
Sabit 2,2767	$\pm 0,0015$				
$T_m$ [K] 287,76*	$\pm 2,54^*$				
$k'_2$ [K/hPa] 22,1	$\pm 2,2$				
$k_3$ [K <sup>2</sup> /hPa] $3,739 \cdot 10^5$	$\pm 0,012$				
$F(\lambda, H) \cong 0,999 \cong 1,0$ ( $\lambda=35,5$ , $H=1000m$ )	$\pm 0,001$				
Q 6,25*	$\pm 0,0684^*$ $\pm 0,063$	$\pm 0,64-0,96$	$\pm 0,97$	$\pm 0,14$	$\pm 0,56$
$\sigma_{PWV}$ [mm]				$\pm 1,18$	$\pm 1,30$

\* Bu çalışmada elde edilen veriler

Buna göre, bu çalışmadan bulunan verilerle, hata yayılma yasasına uygun olarak, PWV'nin karesel ortalama hatası  $m_{PWV} \pm 0,72-1,23$  kg/m<sup>2</sup> (mm) elde edilir.

### 5.3.2 Uzun Süreli $PWV_{RS}$ ile $PWV_{GNSS}$ Farklarının Analizlerinde, Radyosondaya Göre, $PWV$ 'nin Karesel Ortalama Hatasının Belirlenmesi ve Doğruluk Araştırması

Farklı yoğuşabilir su buharı belirleme sistemleri arasındaki karşılaştırmalar; Çizelge 5.3'te ve Çizelge 5.4'te veriliyor.

**Çizelge 5.3** Su buharı radyometresi (WVR), güneş spektrometresi (SSM) ve radyosonda (RS) sistemleri ile GNSS arasındaki farklar (Bock et al. 2004).

	GNSS-WVR	GNSS-SSM	GNSS-RS
Ortalama ( $kg/m^2$ )	1,8	0,6	-0,2
Standart sapma	1,3	2,3	1,3

**Çizelge 5.4** RS, GNSS ve WVR arasındaki ZWD ve PWV farkları (Wang et al. 2005; Park et al. 2012).

	WVR-GNSS ZTD, PWV	WVR-RS ZTD, PWV	GNSS-RS ZTD, PWV
Ortalama ( $kg/m^2$ )	6 mm (0,96 $kg/m^2$ )	18 mm (2,88 $kg/m^2$ )	12 mm (1,92 $kg/m^2$ )
Standart sapma ( $kg/m^2$ )	9 mm (1,44 $kg/m^2$ )	13 mm (2,08 $kg/m^2$ )	18 mm (2,88 $kg/m^2$ )

Farklı sondalar kullanılarak (RS80-15L Vaisala, DFM-06 Graw, RS92-SGP Vaisala modelleri) 4 farklı istasyondaki radyosonda-GNSS tüm gün için karşılaştırmaları;

RS80-15L için 0,17-3,10 mm  $\pm$ 0,78-3,2 mm

RS92- SGP için -0,70-0,12 mm  $\pm$ 1,19-3,21 mm

DFM-06 için -0,98-2,46 mm  $\pm$ 1,33-4,07 mm

ve gece-gündüz arasında anlamlı farkların olduğu ifade edilmiştir (Wang et al. 2005; Park et al. 2012). Yine farklı radyosondalar UIZ ve Vaisala RS-80 arasındaki PWV farkların ortalaması ve standart sapması;  $5,7 \pm 5$  mm bulunmuştur (Niell et al. 1996; Mendes and Langley 1998).

Farklı radyosonda sensörlerinden elde PWV değerleri arasındaki farkların, gece-gündüz zamanına da bağlı olduğu gözlenmiştir (Park et al. 2012).



2000 yılına kadar farklı çalışmalarda yapılan karşılaştırma sonuçları (15 farklı çalışma) Liou et al.'da (2000) özetlenmektedir. Buna göre;

$PWV_{GNSS}-PWV_{RS}$  farkları ortalaması 1,0-4,38 mm,

$PWV_{WVR}-PWV_{RS}$  farkları ortalaması 0,66-2,70 mm,

olarak verilmektedir.

Güney ve Orta Avrupa'da 11 adet IGS istasyonunun 16 aylık verilerinin değerlendirilmesinden;

$PWV_{RS}-PWV_{GNSS}$  farkları ortalaması  $-0,22\pm 1,9$  mm,

$PWV_{RS}-PWV_{WVR}$  farkları ortalaması  $-0,50\pm 1,4$  mm

olarak bulunmuştur (Pacione and Vespe 2003).

Orta Avrupa IGS istasyonlarının yaklaşık % 50'sinin 4 yıllık verilerinin değerlendirilmesinden;

$PWV_{RS}-PWV_{GNSS}$  farkları ortalaması  $-0,50\pm 1,4$  mm

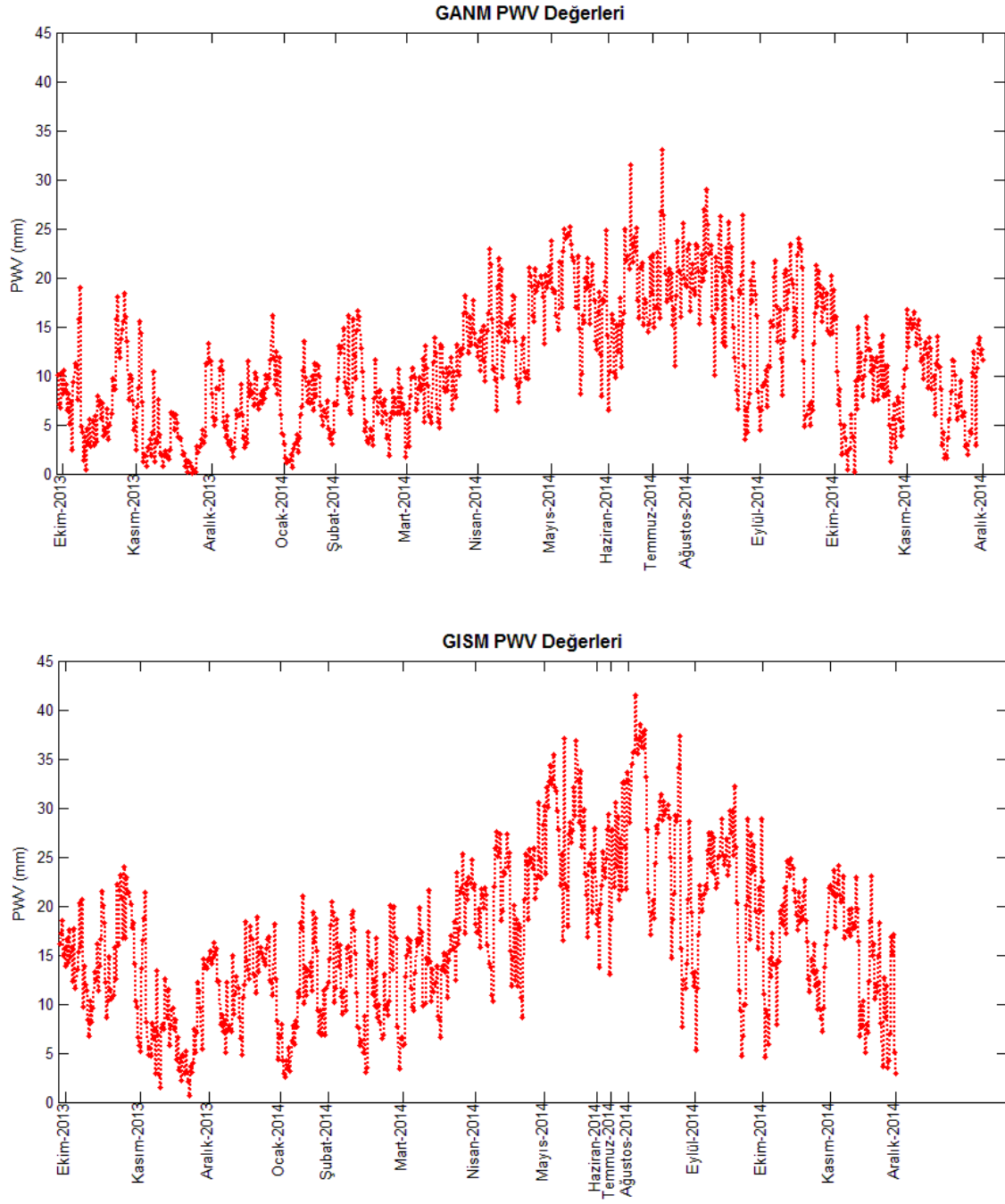
olarak bulunmuştur (Igondova 2009).

#### **5.4 T<sub>m</sub> MODELLERİYLE HESAPLANAN PWV<sub>GNSS</sub> VE PWV<sub>RS</sub>'LERİN KARŞILAŞTIRILMASI**

Yaklaşık bir yıllık, 2013 ve 2014 yıllarına ait İstanbul ve Ankara GNSS gözlem verileri Bernese GNSS Software v5.0 ve GAMIT/GLOBK yazılımı ile değerlendirilmiştir ve tüm Türkiye geliştirilen T<sub>m</sub> modeli kullanılarak PWV<sub>GNSS</sub> değerleri elde edilmiştir.

Öncelikle, Bernese GNSS Software v5.0 yazılımı ile elde edilen değerlendirme sonuçları aşağıda verilmektedir.

GISM ve GANM istasyonlarının  $PWV_{GNSS}$  zaman serileri Şekil 5.3'te gösterilmektedir.



Şekil 5.3 GANM ve GISM istasyonlarının  $PWV_{GNSS}$  değerleri.

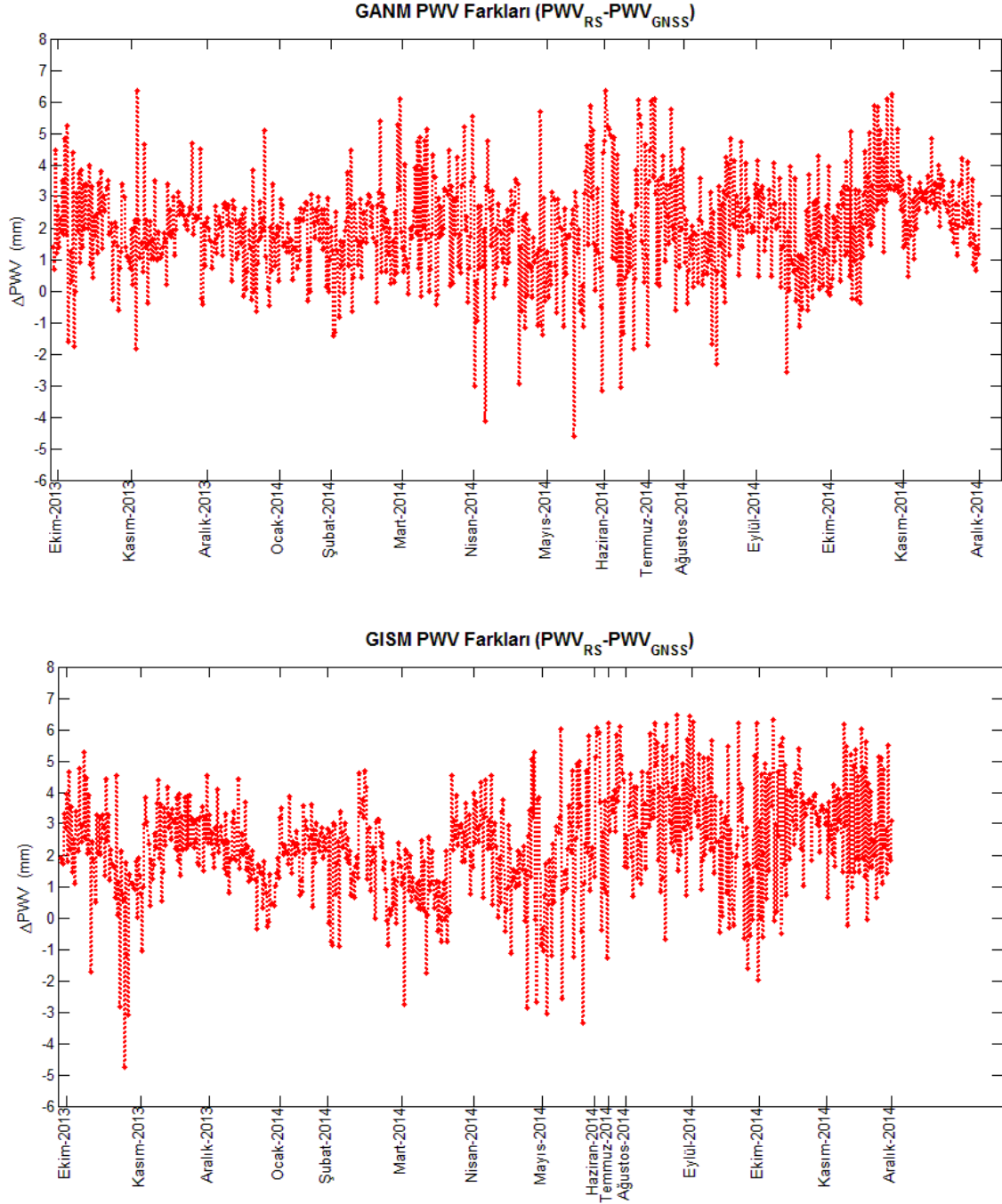
Değerlendirmelerde, hem GNSS gözlemlerinden hem de meteorolojik gözlemlerden uyumsuz ölçüleri çıkarmak için uyumsuz ölçü testi uygulanmıştır. Ayrıca,  $PWV_{GNSS}$  ve  $PWV_{RS}$  ( $\Delta PWV = PWV_{RS} - PWV_{GNSS}$ ) arasındaki farkların ortalaması ve ortalamalarının

karenel ortalama hataları hesaplanmıştır. Ortalamadan  $\pm 3 \cdot \text{KOH}$ 'tan daha büyük olan farklar uyumsuz ölçü olarak kabul edilmiş ve değerlendirilmeden çıkarılmıştır.

Bölüm 4.1.2'de geliştirilen  $T_m$ - $T_s$  lineer modelleri kullanılarak  $\text{PWV}_{\text{GNSS}}$  değerleri hesaplanmıştır.  $\text{PWV}_{\text{GNSS}}$  ve  $\text{PWV}_{\text{RS}}$  arasındaki farkların istatistiği Çizelge 5.5'te ve görseli Şekil 5.4'te görülmektedir.  $\text{PWV}_{\text{GNSS}}$  ve  $\text{PWV}_{\text{RS}}$  arasındaki korelasyon Ankara için 0,87, İstanbul için 0,90 bulunmuştur.

**Çizelge 5.5** GISM ve GANM istasyonlarının tüm istasyonlar için geliştirilen  $T_m$  modelinin Bernese GNSS Software v5.0 ile elde edilen sonuçlarının istatistiği ( $\text{PWV}_{\text{RS}} - \text{PWV}_{\text{GNSS}}$ ).

GNSS İstasyonu	$T_m$ modeli	min. (mm)	maks. (mm)	Ort. (mm) Ort.'nin KOH'sı	$\Delta \text{PWV}$ 'nin KOH'sı (mm)	$\alpha = \% 95$ $t = \text{ort.} / \text{Ort.'nin KOH'sı}$ Eğer $t > t_{f,\alpha}$ ; ort. anlamlıdır.
GANM Ankara 743 profil	$T_m$ (tüm RS istasyonlar)	-4,60	6,35	2,02 $\pm$ 0,06	$\pm 1,60$	33,7 > 1,65 - anlamlı
	$T_m$ (tüm mevsimler)	-4,52	6,41	2,05 $\pm$ 0,06	$\pm 1,60$	34,2 > 1,65 - anlamlı
	$T_m$ (gündüz-gece)	-4,54	6,37	2,02 $\pm$ 0,06	$\pm 1,60$	33,7 > 1,65 - anlamlı
GISM İstanbul 671 profil	$T_m$ (tüm RS istasyonlar)	-4,74	6,45	2,33 $\pm$ 0,07	$\pm 1,72$	33,3 > 1,65 - anlamlı
	$T_m$ (tüm mevsimler)	-4,68	6,61	2,39 $\pm$ 0,07	$\pm 1,73$	34,1 > 1,65 - anlamlı
	$T_m$ (gündüz-gece)	-4,79	6,56	2,33 $\pm$ 0,07	$\pm 1,73$	33,3 > 1,65 - anlamlı



Şekil 5.4 GANM ve GISM istasyonlarında  $PWV_{GNSS}$  ile  $PWV_{RS}$  arasındaki farklar.

GAMIT/GLOBK yazılımı ile elde edilen değerlendirme sonuçları aşağıda verilmektedir.

$PWV_{GNSS}$  ve  $PWV_{RS}$  arasındaki farkların istatistiği Çizelge 5.6'da görülmektedir.  $PWV_{GNSS}$  ve  $PWV_{RS}$  arasındaki korelasyon Ankara için 0,87, İstanbul için 0,90 bulunmuştur.

**Çizelge 5.6** GISM ve GANM istasyonlarının tüm istasyonlar için geliştirilen  $T_m$  modelinin GAMIT/GLOBK ile elde edilen sonuçlarının istatistiği ( $PWV_{RS}-PWV_{GNSS}$ ).

	Min. (mm)	Maks. (mm)	Ort. (mm)	Sta (mm)
<b>GANM Ankara 484 profil</b>	-4,67	9,37	1,37	$\pm 1,17$
<b>GISM İstanbul 460 profil</b>	-4,90	6,13	1,48	$\pm 1,31$

## 5.5 Q MODELLEYLE HESAPLANAN $PWV_{GNSS}$ VE $PWV_{RS}$ 'LERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Çizelge 4.9'da katsayıları verilen Q modellerinin testi amacıyla, Ankara ve İstanbul GNSS-RS istasyonlarında Bernese v5.0 ve GAMIT/GLOBK ile bulunan ZTD'ler ve bu modeller kullanılarak elde edilen  $PWV_{GNSS}$  değerleri hesaplanmıştır.

Çizelge 5.7'de Ankara istasyonunda geliştirilen Q modelleri ve Bernese v5.0 ile hesaplanan  $PWV_{GNSS}$  değerleri ile  $PWV_{RS}$  arasındaki farkların ( $PWV_{RS}-PWV_{GNSS}$ ) istatistiği verilmektedir.

**Çizelge 5.7** Ankara istasyonunda geliştirilen Q modelleri test istatistiği.

Ankara (743)	Min. (mm)	Maks. (mm)	Ort. (mm) Ort.'nın KOH'sı	Sta. (mm)
PWV_Eş.4.6*	-5,78	6,09	1,40 $\pm$ 0,06	$\pm 1,73$
PWV_Eş.4.7	-5,42	6,07	1,49 $\pm$ 0,06	$\pm 1,73$
PWV_Eş.4.8	-5,69	6,08	1,41 $\pm$ 0,06	$\pm 1,73$
PWV_Eş.4.9	-5,25	6,12	1,58 $\pm$ 0,06	$\pm 1,70$
PWV_Eş.4.10	-5,44	6,09	1,52 $\pm$ 0,06	$\pm 1,71$

\* Eş.4.6: Eşitlik 4.6

Çizelge 5.8'de Ankara istasyonunda Emardson and Derks'in Q modelleri ve Bernese v5.0 ile hesaplanan  $PWV_{GNSS}$  değerleri ile  $PWV_{RS}$  arasındaki farkların ( $PWV_{RS}-PWV_{GNSS}$ ) istatistiği verilmektedir.

**Çizelge 5.8** Ankara istasyonunda Emardson and Derks'in Q modelleri test istatistiği.

<b>Ankara (743)</b> <b>(Emardson and Derks)</b>	<b>Min. (mm)</b>	<b>Maks. (mm)</b>	<b>Ort. (mm)</b> <b>Ort.'nin KOH'sı</b>	<b>Sta. (mm)</b>
PWV_ Eş.4.3	-5,13	6,18	1,76±0,06	±1,65
PWV_ Eş.4.4	-5,09	6,24	1,61±0,06	±1,69
PWV_ Eş.4.5	-3,38	7,22	2,63±0,06	±1,54

Çizelge 5.9'da İstanbul istasyonunda geliştirilen Q modelleri ve Bernese v5.0 ile hesaplanan  $PWV_{GNSS}$  değerleri ile  $PWV_{RS}$  arasındaki farkların ( $PWV_{RS} - PWV_{GNSS}$ ) istatistiği verilmektedir.

**Çizelge 5.9** İstanbul istasyonunda geliştirilen Q modelleri test istatistiği.

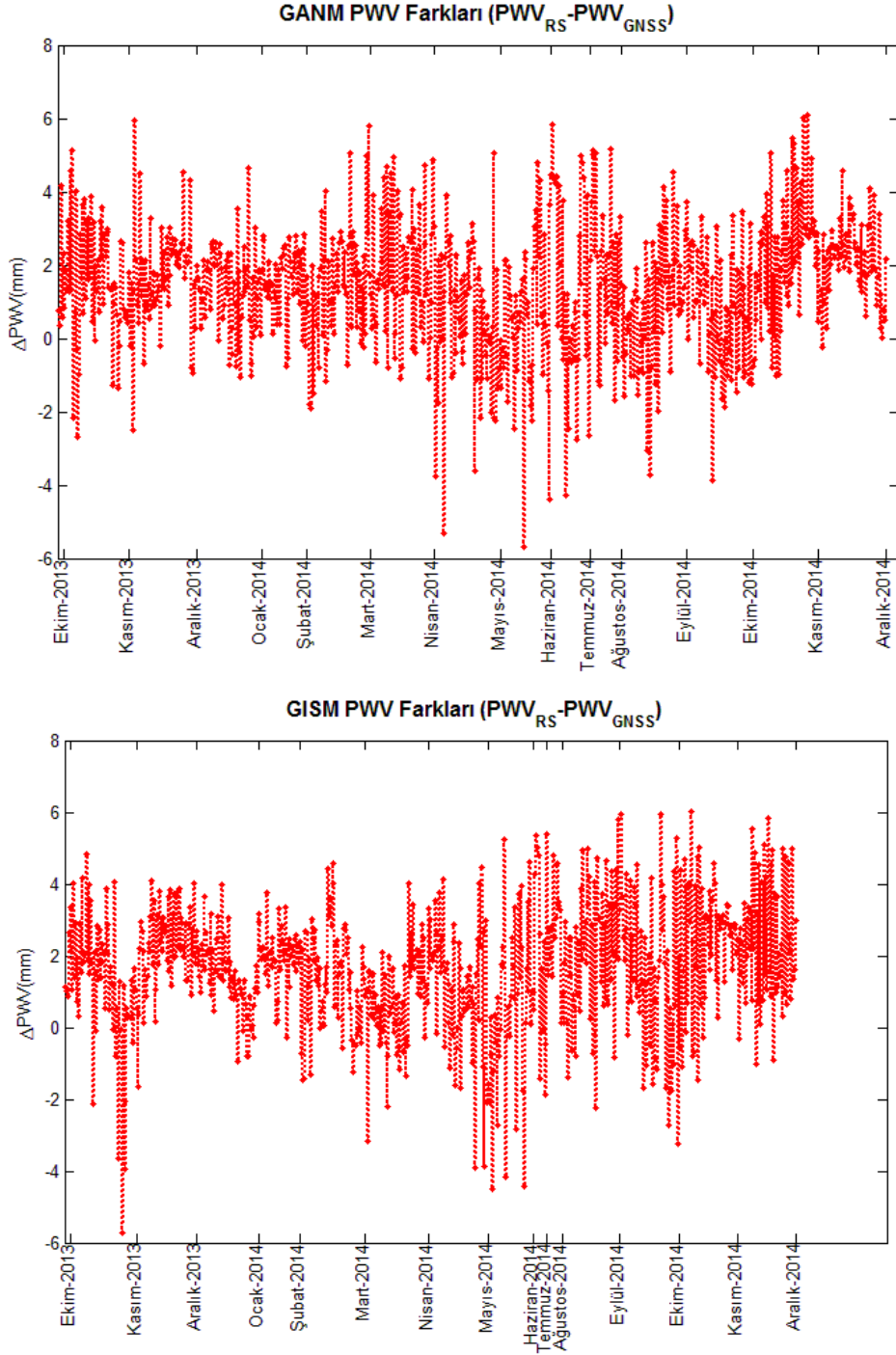
<b>İstanbul (671)</b>	<b>Min. (mm)</b>	<b>Maks. (mm)</b>	<b>Ort. (mm)</b> <b>Ort.'nin KOH'sı</b>	<b>Sta. (mm)</b>
PWV_ Eş.4.6	-5,81	6,02	1,58±0,07	±1,78
PWV_ Eş.4.7	-5,38	6,24	1,78±0,07	±1,78
PWV_ Eş.4.8	-5,73	6,03	1,62±0,07	±1,77
PWV_ Eş.4.9	-5,58	6,17	1,63±0,07	±1,80
PWV_ Eş.4.10	-5,72	6,07	1,59±0,07	±1,78

Çizelge 5.10'da İstanbul istasyonunda Emardson and Derks'in Q modelleri ve Bernese v5.0 ile hesaplanan  $PWV_{GNSS}$  değerleri ile  $PWV_{RS}$  arasındaki farkların ( $PWV_{RS} - PWV_{GNSS}$ ) istatistiği verilmektedir.

**Çizelge 5.10** İstanbul istasyonunda Emardson and Derks'in Q modelleri test istatistiği.

<b>İstanbul (671)</b> <b>(Emardson and Derks)</b>	<b>Min. (mm)</b>	<b>Maks. (mm)</b>	<b>Ort. (mm)</b> <b>Ort.'nin KOH'sı</b>	<b>Sta. (mm)</b>
PWV_ Eş.4.3	-5,03	6,25	2,11±0,07	±1,73
PWV_ Eş.4.4	-5,35	6,27	1,89±0,07	±1,76
PWV_ Eş.4.5	-3,19	8,89	3,41±0,07	±1,76

Şekil 5.5'te İstanbul ve Ankara istasyonlarında, yükseklik parametresi eklenerek geliştirilen hibrit modelinin Bernese GNSS Software v5.0 ile hesaplanan  $PWV_{GNSS}$  değerleri ile  $PWV_{RS}$  arasındaki farkların grafikleri görülmektedir.

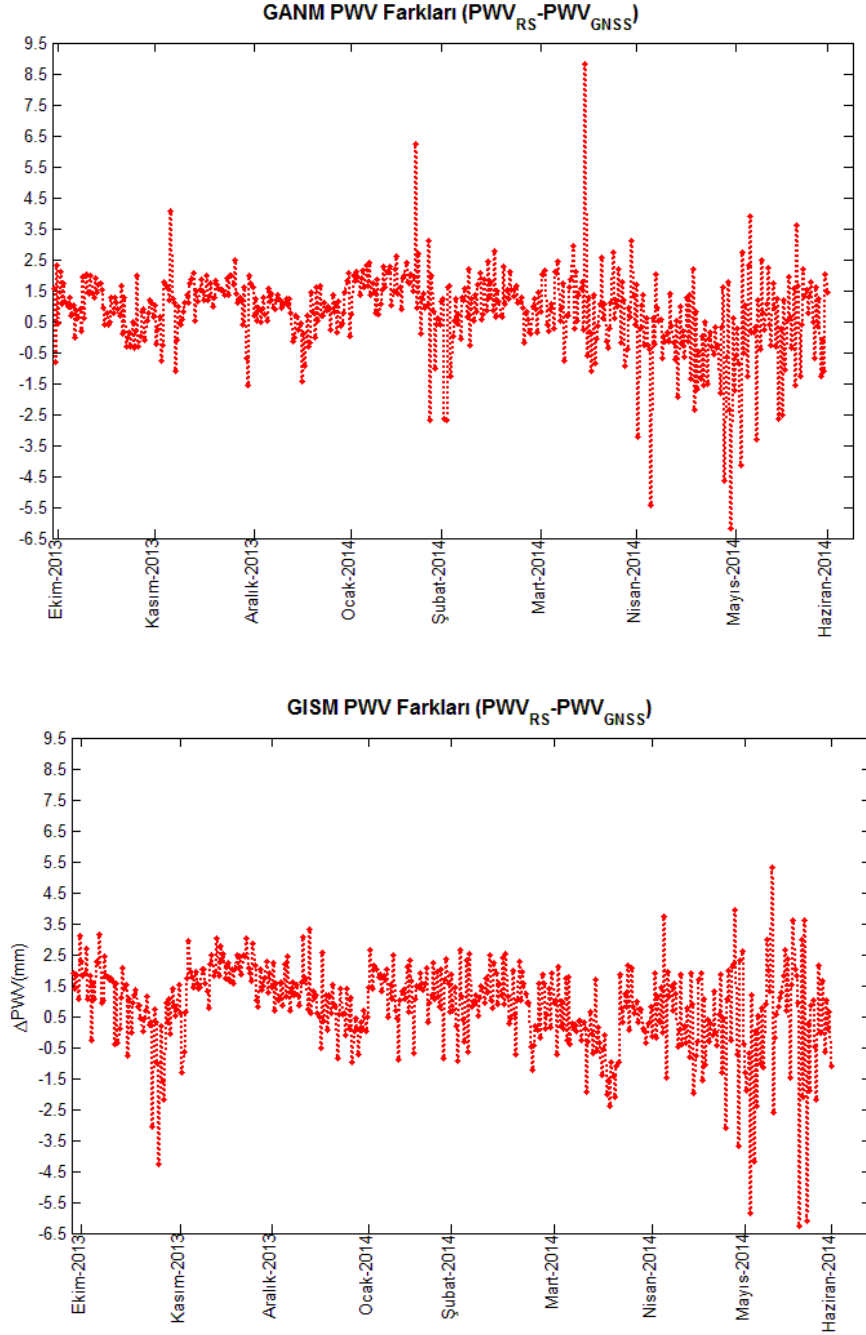


**Şekil 5.5** Ankara ve İstanbul istasyonlarında Bernese GNSS Software v5.0 ile hesaplanan  $PWV_{RS} - PWV_{GNSS}$  farklarının grafikleri.

Çizelge 4.9’da katsayıları verilen yükseklik parametresi eklenerek geliştirilen hibrit modelini karşılaştırma amacıyla Ankara ve İstanbul GNSS istasyonlarındaki GAMIT/GLOBK ile elde edilen verilerle birlikte kullanılarak  $PWV_{GNSS}$  değerleri hesaplanmıştır.  $PWV_{GNSS}$  ve  $PWV_{RS}$  arasındaki farkların istatistiği Çizelge 5.11’de ve görseli Şekil 5.6’da görülmektedir.

**Çizelge 5.11** İstanbul ve Ankara istasyonlarında yükseklik parametresi eklenecek geliştirilen hibrit modelinin GAMIT/GLOBK ile elde edilen sonuçlarının istatistiği ( $PWV_{RS}-PWV_{GNSS}$ ).

	Min. (mm)	Maks. (mm)	Ort. (mm)	Sta (mm)
<b>GANM Ankara 484 profil</b>	-6,05	8,92	0,92	±1,24
<b>GISM İstanbul 460 profil</b>	-6,21	5,20	0,82	±1,38



**Şekil 5.6** Ankara ve İstanbul istasyonlarında GAMIT/GLOBK ile hesaplanan  $PWV_{RS}-PWV_{GNSS}$  farklarının grafikleri.



## BÖLÜM 6

### TEST AĞI ÇALIŞMALARI

Meteoroloji istasyonlarında ölçülen sıcaklık, basınç, nemlilik vb. meteorolojik parametrelerin coğrafi konuma bağlı olarak harmonik fonksiyonlarla modellenmesi ve daha sonra bu model kullanılarak TUSAGA-Aktif istasyonlarının sıcaklık, basınç ve nemliliklerinin enterpolasyonla belirlenmesi güncel bir çalışmadır. TUSAGA-Aktif istasyonlarının çoğunluğunda meteorolojik gözlem yapılmamaktadır. Bu istasyonlarda su buharı kestirimi için yüzey sıcaklık, basınç ve nemlilik verilerine ihtiyaç vardır.

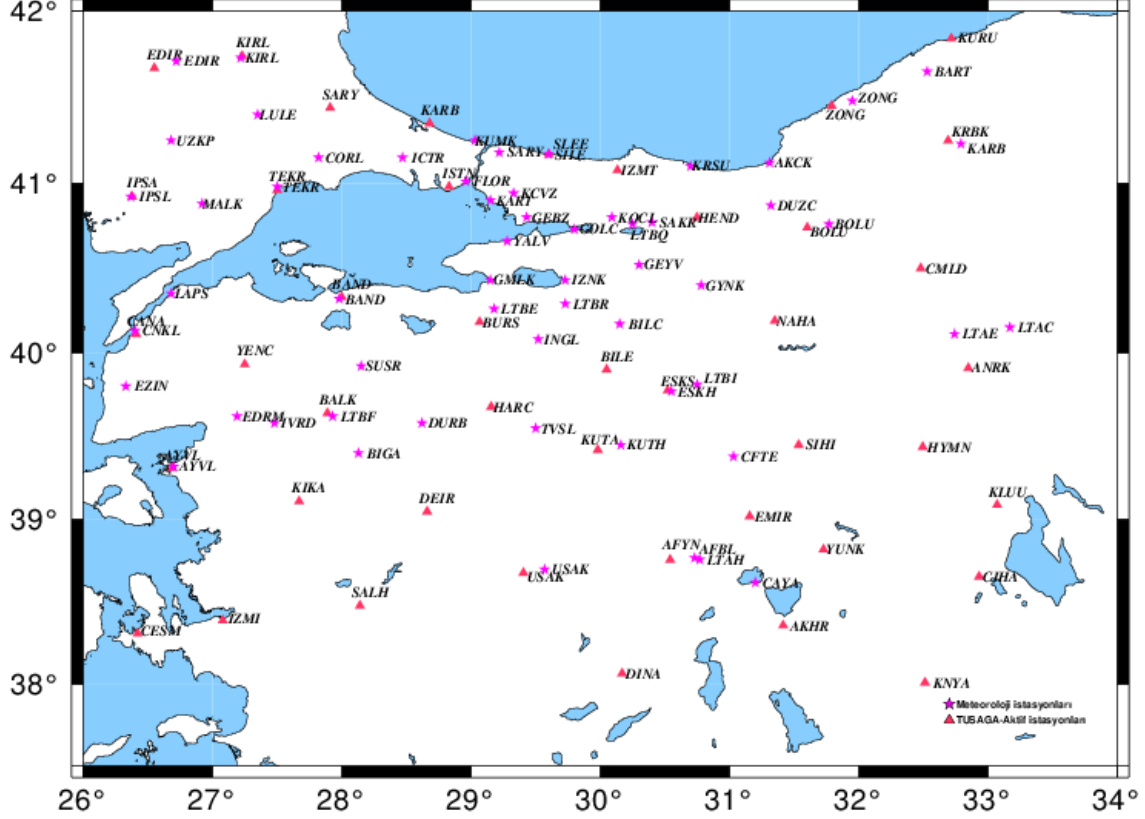
Modelleme çalışmaları için önce Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden Marmara Bölgesi ve çevresinde belirlenen istasyonların 1-15 Ağustos 2010 tarihli meteorolojik verileri temin edilmiştir. Bu nedenle, elde edilen verilere göre, 1-15 Ağustos 2010 tarihleri arasında sürekli sıcaklık, basınç ve nemlilik değerleri olan istasyonlar Test 1 ağı olarak seçilmiş ve harmonik fonksiyonlarla modelleme ve enterpolasyon çalışmaları bu ağda gerçekleştirilmiştir.

Test ağlarının seçiminde; sürekli meteorolojik verilerin elde edilebildiği olurunca homojen dağılmış istasyonlar ağının oluşturulmasına özen gösterilmiştir. Çünkü sürekli çalışan meteoroloji istasyonlarında, arızalar vb. nedenlerle verilerde kesiklikler oluşmaktadır. Meteoroloji Genel Müdürlüğünden belirli istasyonlar ve belirli zaman aralığı için meteorolojik gözlemler istenmiştir. Bu gözlemlerden, en az veri kesikliği olan istasyonlardan test ağı oluşturulmuştur.

Test 1 ağında, geliştirilen harmonik fonksiyonlarla modelleme ve enterpolasyon yazılımı kullanılarak TUSAGA-Aktif noktalarındaki yersel meteorolojik verilerin elde edilmesi, bu istasyonlardaki toplam zenit gecikme değerlerinin hesaplanması, tüm Türkiye için geliştirilen  $T_m$  modeli kullanılarak istasyonlardaki su buharının elde edilmesi çalışmaları için Test 2 ağı tasarlanmıştır.

## 6.1 TEST 1 AĞININ SEÇİMİ

Test 1 ağı olarak, Marmara Bölgesi meteoroloji istasyonları ağı seçilmiştir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1 Test 1 ağı.

Test ağında; istasyonlar arasındaki minimum uzaklık 25 km, maksimum uzaklık 100 km ve ortalama uzaklık 50 km'dir. 29 istasyondan oluşan test ağında, enterpolasyon doğruluğunu kontrol etmek için, ağın yapısını en az bozacak biçimde iki kontrol noktası seçilmiştir. Bu noktaların diğer istasyonlara minimum uzaklığı 45 km'dir.

## 6.2 METEOROLOJİK PARAMETRELERİN KÜRESEL HARMONİK FONKSİYONLARLA MODELLENMESİ VE ENTERPOLASYONU YAZILIMI

Bölüm 2.4'te matematiksel esasları açıklanan, küresel harmonik fonksiyonlarla belirli bir alandaki meteorolojik parametrelerin modellenmesini ve enterpolasyonunu sağlayan bir yazılım geliştirilmiştir.

Değerlendirilecek veri seti; istasyon numarası, istasyon enlemi, istasyon boylamı, istasyon ortometrik yüksekliği, sıcaklık, basınç ve nemlilik parametreleri içermektedir.

Ölçülerin modellenmesi ve enterpolasyonu yükseklik etkilerinden arındırılmalıdır. Bu nedenle, yüzey ölçüleri referans yüzeyine;

$$P_r = P_s / (1 - 2,26 \cdot 10^{-5} \cdot H)^{5,225} \quad (6.1)$$

$$T_r = T_s + 0,0065 \cdot H \quad (6.2)$$

$$RH_r = RH_s / e^{-6,396 \cdot 10^{-4} \cdot H} \quad (6.3)$$

eşitlikleri ile indirgenmiştir (Beutler et al. 2007; Bai and Feng 2003). Burada, r referans yüzeyini (geoit) ve s topografik yüzeyi (istasyon yüksekliği), H istasyonun ortometrik yüksekliğini göstermektedir. İstasyonların ortometrik yükseklikleri  $H=h-N$  ile hesaplanmıştır. Burada; h, elipsoidal yükseklik ve N, geoit yüksekliğidir. h, GNSS değerlendirmesinden, N ise EGM96'dan hesaplanmıştır (URL-15 2014).

Modellenen ve enterpole edilen veriler, istasyon yüksekliklerine;

$$P_s = P_r (1 - 2,26 \cdot 10^{-5} \cdot H) \quad (6.4)$$

$$T_s = T_r - 0,0065 \cdot H \quad (6.5)$$

$$RH_s = RH_r \cdot e^{-6,396 \cdot 10^{-4} \cdot H} \quad (6.6)$$

eşitlikleri ile yükseltilir.

Küresel harmonik fonksiyonlarla modelleme ve Tikhonov algoritmasının güvenilirliği açısından, verilerin önce iki değişkenli polinomlarla modellenmesi ve uyuşumsuz ölçülerin çıkarılması planlanmıştır. İki değişkenli polinom olarak;

$$F(\varphi, \lambda) = A_0 + A_1 \varphi + A_2 \lambda + A_3 \varphi^2 + A_4 \varphi \cdot \lambda + A_5 \lambda^2 + \dots \quad (6.7)$$

alınmıştır. Geliştirilen yazılımla, 4. derece açılım ile 17 bilinmeyene kadar modelleme yapılabilmektedir. Uyuşumsuz ölçülerin belirlenmesinde, meteorolojik gözlemler için kullanılabilir,

$$|v| \leq 3.m_0 \quad (6.8)$$

kriteri alınmıştır. Burada,  $v$  hesaplanan ölçü düzeltmeleridir.

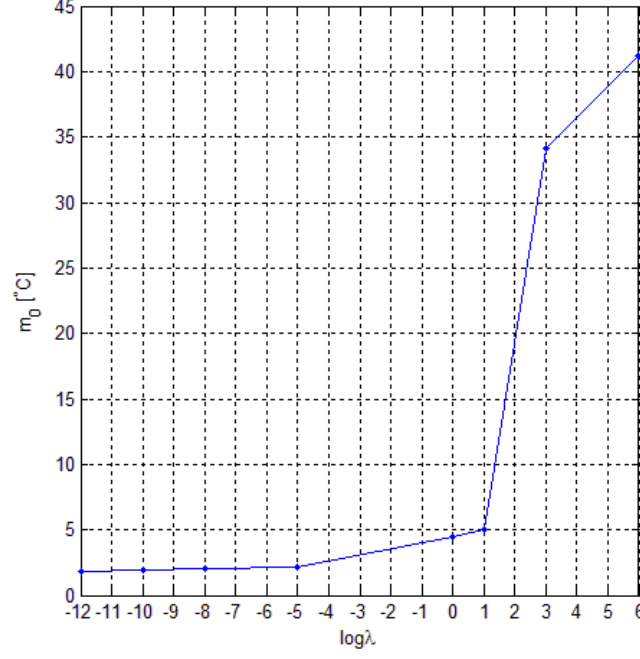
Bilinmeyenlerin ( $A_0, A_1, A_2 \dots$ ) anlamlı olup olmadıkları istatistik analiz ile belirlenmektedir. Bu iki bilinmeyenli polinomlarla modelleme sonuçları, karşılaştırma amaçlarıyla kullanılmış olup bu çalışmada verilmemiştir.

Küresel harmonik fonksiyonlar ile en küçük kareler yöntemiyle modelleme için  $n=m=5$  derece ve mertebede açılım alınmıştır. Böylece, 36 bilinmeyene kadar  $a_{nm}, b_{nm}$  katsayıları hesaplanabilmekte ve dengelemede kullanılabilir. Dizayn matrisi  $A$ , manuel oluşturulabilmektedir.

Test 1 ayında, Tikhonov regülarizasyonu ile en uygun çözüm vektörü araştırılmıştır. Eşitlik 55'e göre, her bir  $\lambda$  değeri için  $x_\lambda$  ve  $m_0$  hesaplanmakta ve en küçük  $m_0$  değerini veren çözüm vektörü belirlenmektedir. Örneğin, sıcaklık modellemesi için, seçilen  $\lambda$  ve buna uygun sıcaklığın karesel ortalama hatası  $m_0$  Çizelge 6.1'deki gibi elde edilmiştir. L-Şekli, Şekil 6.2'deki gibi bulunmuştur. Sonuç olarak, Eşitlik 2.55'in çözümü için  $x_\lambda=1e-12$  alınmıştır.

**Çizelge 6.1**  $\lambda$  ve  $m_0$  değerleri.

$\lambda$	1,00E+06	1,00E+03	10	1	1,00E-03	1,00E-08	1,00E-10	1,00E-12
$m_0$ [K]	41,2	34,1	5	4,5	2,2	2	1,9	1,85

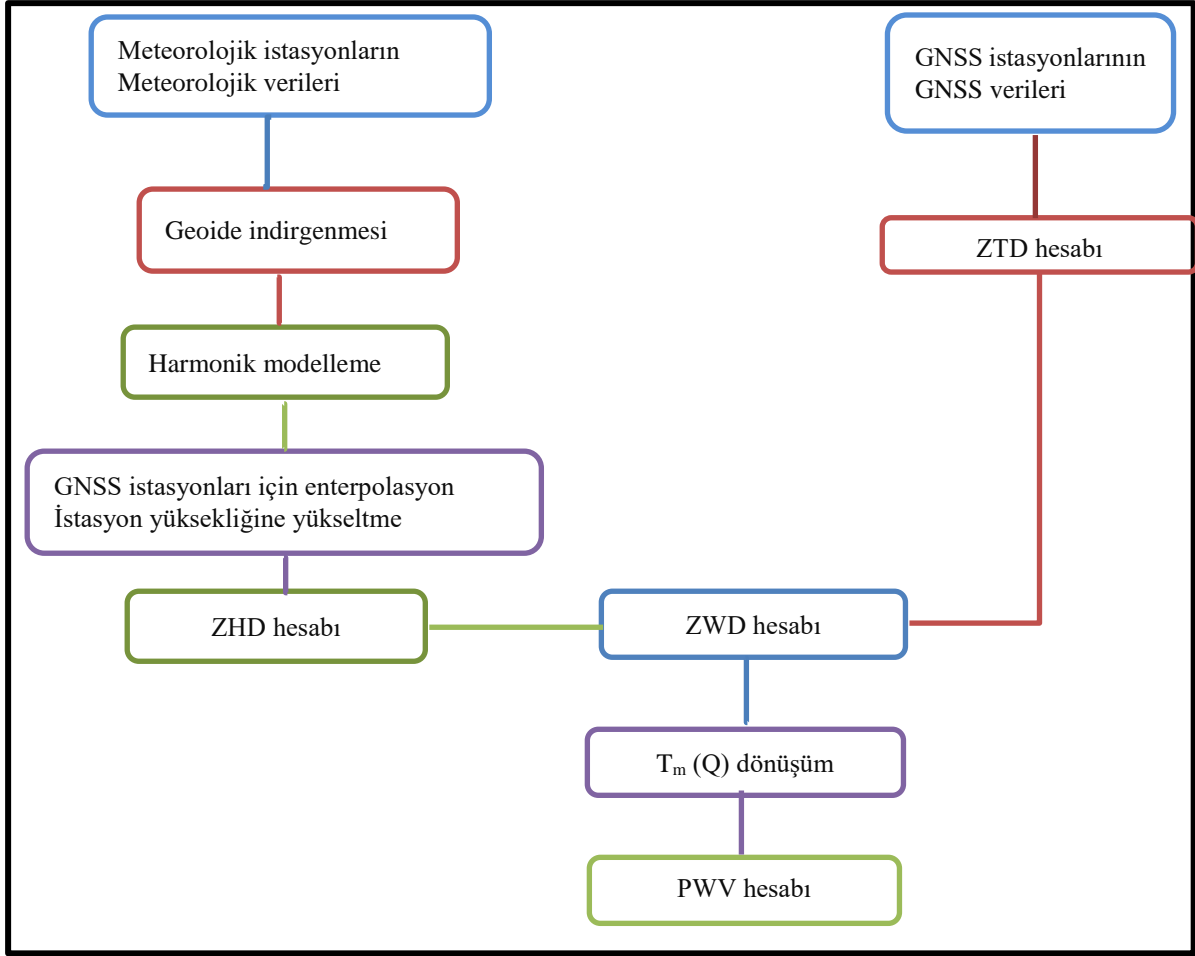


**Şekil 6.2** Tikhonov algoritmasına göre L şekli grafiği.

Test 1 ağında, sıcaklık, basınç ve nemlilik parametrelerinin modellenmesi için,  $a_{00}$ ,  $a_{10}$ ,  $a_{11}$ ,  $b_{11}$ ,  $a_{20}$ ,  $a_{21}$ ,  $b_{21}$ ,  $a_{22}$ ,  $b_{22}$ ,  $a_{30}$  olmak üzere 10 bilinmeyen yeterli olmuştur.

Enterpolasyon noktalarının (veya kontrol noktalarının) verileri de, modellemedeki biçimde düzenlenmiştir. Enterpolasyon için  $a_{nm}$ ,  $b_{nm}$  katsayıları, modellemede belirlenmiş olan bilinmeyenler sayısına göre alınarak, dizayn matrisi ( $A_E$ ) oluşturulur ve enterpolasyon değerleri hesaplanır.

Küresel harmonik fonksiyonlarla modelleme ve enterpolasyon için geliştirilen yazılımın akış diyagramı aşağıdaki gibidir (Şekil 6.3). MATLAB'da geliştirilen yazılımının kodları EK B'de verilmektedir.



Şekil 6.3 Yazılım akış diyagramı.

Yazılım geliştirme çalışmalarında, Marmara Bölgesinde meteorolojik verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğünden temin edilen istasyonlar ağı test ağı olarak alınmıştır. 1-15 Ağustos 2010 tarihinde, saat 01.00’de yapılmış olan gözlemler, test çalışmalarında kullanılmıştır. Test ağı içinde, Lüleburgaz meteoroloji istasyonu kontrol noktası olarak seçilmiş ancak yakınındaki KIRL istasyonundaki meteorolojik veriler sadece 2 günlük olması nedeniyle bu istasyon kontrol noktası olarak kullanılamamıştır. Sakarya, İnegöl meteoroloji istasyonları kontrol istasyonları olarak seçilmiştir.

1-15 Ağustos 2010 tarihleri, saat 13.00 için, 15 günlük sıcaklık, basınç ve nemlilik parametreleri modellendirilmiş ve modellerden iki kontrol noktasının sıcaklık, basınç ve nemlilik değerleri enterepol edilmiştir. Modelden bulunan  $l_{\text{model}}$  ile istasyon ölçüleri  $l_{\text{ölçü}}$  farklarının istatistiği Çizelge 6.2’de verilmiştir.

**Çizelge 6.2** Test 1 ağı kontrol noktalarında, sıcaklık, basınç ve nemlilik enterpolasyonu sonuçları.

Parametre	Ortalama $m_0$	Farklar Ortalaması	
		Sakarya	İnegöl
Sıcaklık	$\pm 1,70$ K	0,05 K	-0,62 K
Basınç	$\pm 1,74$ hPa	-1,4 hPa	-1,1 hPa
Nemlilik	$\pm 8,7$ %	-7,9 %	0,4 %

Çizelge 6.2'deki ortalama  $m_0$ ; Eşitlik 2.51'den hesaplanan birim ölçünün karesel ortalama hatalarının ortalamasıdır ve bu değer modellemenin presizyonunun ölçüsü olarak alınabilir. Farklar ortalaması; kontrol noktalarında, bilinen değerler ile enterpolasyondan bulunan değerler arasındaki farkların aritmetik ortalamasıdır.

Çizelge 6.2'de verilen ortalama karesel ortalama hataları ile enterpole edilen sıcaklık, basınç ve nemlilik değerleriyle elde edilen su buharının presizyonu, Bölüm 5.3'te verilen Çizelge 5.2'ye göre hesaplanabilir. Test 1 ağından elde edilen;  $m_T = \pm 1,70$  K,  $m_P = \pm 1,74$  hPa,  $m_H = \pm 8,7$  % ve  $T_m = 181,35$  K,  $Q = 6,26$  ile;  $m_{ZHD} = \pm 0,002277$ .  $m_P = \pm 4,0$  mm olur. Ağırlıklı ortalama sıcaklığının presizyonu; yersel sıcaklığın presizyonunun etkisi  $m_{T_s}$  ve model hatası  $m_{T_m}$  dikkate alınarak,  $m_{T_s} = \pm 0,80$ .  $m_{T_s} = \pm 1,4$  K ve buradan;  $m_{T_m} = \pm ((2,54)^2 + (1,4)^2)^{1/2} = \pm 2,9$  K olarak bulunur.  $m_{T_m}/T_m = \pm \% 1$  ile  $m_{PWV} = \pm 0,72 - 1,43$  kg/m<sup>2</sup> olur (Çizelge 6.3).

**Çizelge 6.3** Hata analizi sonuçları.

Parametre	Standart sapma	$\frac{\sigma_{ZTD}}{Q}$	$\frac{\sigma_{ZHD}}{Q}$	$\sigma_Q/Q$ . PWV	
				PWV=10	PWV=50
ZTD [mm]	$\pm 4-6$				
Yer basıncı $p_s$ [hPa]	$\pm 1,7$				
Sabit 2,2767	$\pm 0,0015$				
$T_m$ [K] 287,76*	$\pm 2,54^*$				
$k'_2$ [K/hPa] 22,1	$\pm 2,2$				
$k_3$ [K <sup>2</sup> /hPa] $3,739 \cdot 10^5$	$\pm 0,012$				
$F(\lambda, H) \cong 0,999 \cong 1,0$ ( $\lambda = 35,5$ , $H = 1000$ m)	$\pm 0,001$				
Q 6,25*	$\pm 0,0684^*$ $\pm 0,063$	$\pm 0,64-0,96$	$\pm 0,97$	$\pm 0,14$	$\pm 0,56$
			$\sigma_{PWV}$ [mm]	$\pm 1,18$	$\pm 1,30$

\* Bu çalışmada elde edilen veriler

Kontrol noktalarındaki  $I_{\text{model}}-I_{\text{ölçü}}$  farkları ortalaması, enterpolasyonun doğruluğunun bir ölçüsü olarak alınabilir. Bu farkların, ortalama karesel ortalama hata sınırları içinde olduğu görülüyor.

### 6.3 TEST 2 AĞININ SEÇİMİ

Test 2 ağı Zonguldak ve çevresi olarak  $39^{\circ}$ - $42^{\circ}$  enlem ve  $29^{\circ}$ - $33^{\circ}$  boylamlarını içine alacak biçimde düşünülmüştür. Test ağında, daha geniş çerçeveyi Meteoroloji istasyonları ve bunun içinde TUSAGA-Aktif istasyonları oluşturmaktadır. Böylece, meteoroloji istasyonlarının verileriyle TUSAGA-Aktif istasyonlarının meteorolojik verilerinin hesaplanmasında enterpolasyon amaçlanmıştır.

Test ağı meteoroloji istasyonlarının meteorolojik verileri  $39^{\circ}$ - $42^{\circ}$  enlem ve  $29^{\circ}$ - $33^{\circ}$  boylam sınırları içindeki tüm meteoroloji istasyonlarının 1 saat aralıklı verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğünden istenmiştir. Ancak, istenilen istasyonların bazılarında meteorolojik gözlem kayıtları bulunamamıştır. Mevcut kayıtlar ise 3 saat aralıklarda çoğunlukla 3, 6, 9, 12, 18 saatleri olarak sıcaklık, basınç ve nem kayıtları olarak elde edilmiştir.

Verileri elde edilen 28 meteoroloji istasyonunun ortak verileri (yıl, ay, gün, saat olarak) araştırılmıştır. Harmonik modelleme ve enterpolasyon için ağın şekli dikkate alınmalıdır. Ortak veri sayısını arttırırken, bunu sağlayan istasyon sayısı azalmakta ve ağın şekli önemli derecede bozulmaktadır. En iyi optimal ağ, Şekil 6.4'teki biçimde belirlenmiştir. Bu ağın Doğu kesiminde meteoroloji istasyonları, batı kesimlerine göre daha azdır. Bu durum, harmonik fonksiyonlarla modelleme ve enterpolasyonunun doğruluğunu, prezisyonu etkileyen faktörlerden biridir.





## 6.4 TEST 2 AĞININ TUSAGA-AKTİF İSTASYONLARININ GNSS VERİLERİ

TUSAGA-Aktif'in Haziran 2013-Haziran 2014 tarihleri arasındaki GNSS verileri elde edilmiştir. Bu verilerin değerlendirilmesi için oluşturulan GNSS-MET ağı Şekil 6.5'te görülmektedir.



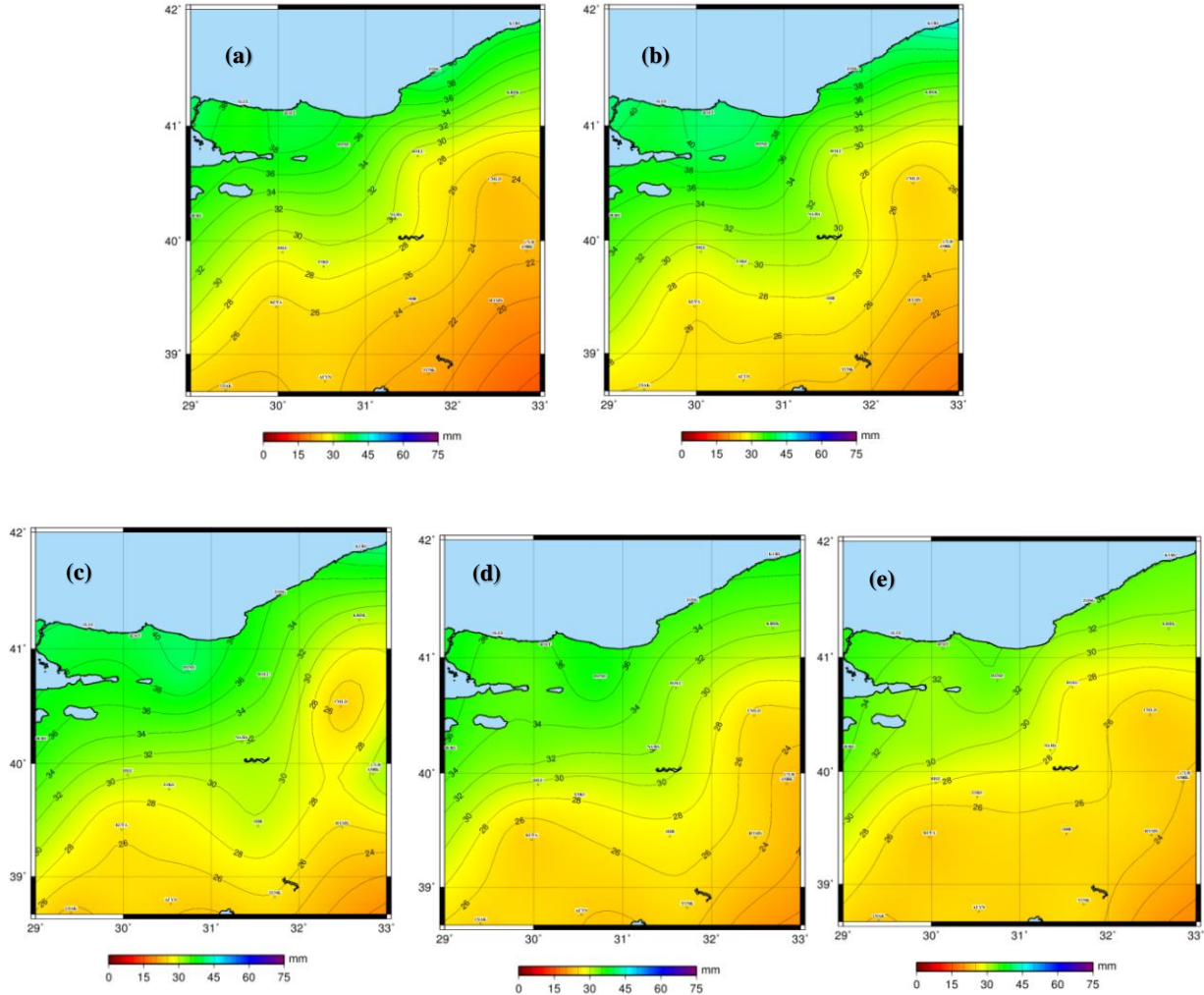
Şekil 6.5 GNSS-MET ağı

Toplamda 26 GNSS istasyonundan yararlanılmıştır. Bunlardan 20 tanesi Marmara bölgesinde bulunan TUSAGA-Aktif istasyonu olup kalan 6 tanesi IGS ağına dahil istasyonlardır (ZECK, CRAO, SOFI, NICO, ISTA, ANKR). GNSS verilerinin değerlendirmelerinde Bernese GNSS Software v5.0 kullanılmıştır (Beutler et al. 2007). Değerlendirilme stratejisi Bölüm 5.2'de anlatıldığı gibidir.

## 6.5 TEST 2 AĞINDA TOPLAM ZENİT GECİKMESİNİN (ZTD) VE YOĞUŞABİLİR SU BUHARININ (PWV) MODELLENMESİ ÇALIŞMALARI

Şekil 6.5'te verilen GNSS-MET ağındaki istasyon noktalarındaki toplam zenit gecikmesi değerleri, Bölüm 5.2'deki değerlendirme stratejisine uygun olarak, Haziran 2013-Haziran 2014 tarihleri için hesaplanmıştır.

GNSS-MET ağının istasyon noktalarının Haziran 2013-Haziran 2014 tarihleri arasında saat 3, 6, 9, 12, 18 için meteorolojik parametreleri Test 2 ağından enterpolasyonla hesaplanmıştır. Bu meteorolojik parametreler kullanılarak hidrostatik zenit gecikmesi ve buradan ıslak zenit gecikmesi değerleri (ZWD) hesaplanmıştır. Islak zenit gecikmesi değerleri; Bölüm 4.1.2’de verilen tüm Türkiye için belirlenen  $T_m=48,55+0,80T_s$  ağırlıklı ortalama sıcaklık bağıntısından hesaplanan  $T_m$  değerleriyle, istasyonlardaki yoğuşabilir su buharı değerlerine dönüştürülmüştür. GNSS-MET ağının yoğuşabilir su buharı değerlerinin görselleştirilmiş örnekleri Şekil 6.6’da görülmektedir. GNSS-MET ağında hesaplanan tüm değerler dijital ortamda saklanmaktadır. Yoğuşabilir su buharının hesabı için MATLAB’da geliştirilen yazılımının kodları EK C’te verilmektedir.



**Şekil 6.6** Test 2 ağında hesaplanan PWV değerleri örnekleri: 1 Ağustos 2013 (a) saat 6, (b) saat 9, (c) saat 12, (d) saat 15 ve (e) saat 18.

GNSS-MET ağında hesaplanan toplam zenit gecikmesi (ZTD) ve yoğuşabilir su buharının (PWV) küresel harmonik fonksiyonlarla nümerik modelleme alışmaları 1-31 Ağustos 2013 tarihleri arasındaki ZTD ve PWV değerleri alınarak yapılmıştır.

GNSS-MET istasyonlarında hesaplanan toplam zenit gecikmesi değerleri ve yoğuşabilir su buharı değerleri harmonik fonksiyonlarla modelleme yazılımıyla doğrudan modellendirilmiştir. Her bir tarih için hesaplanan modellemenin karesel ortalama hataların aritmetik ortalaması;

$$m_{ZTD}=\pm 57,5 \text{ mm}$$

$$m_{PWV}=\pm 2,5 \text{ mm}$$

olarak elde edilmiştir. Bu modelleme presizyonları; modellemenin yeterli doğrulukla yapılamadığının bir ifadesidir.

Bu nedenle; istasyonlardaki toplam zenit gecikmesi ve yoğuşabilir su buharı değerlerinin modellenmesinde, istasyon noktasının yüksekliği de dikkate alınmalıdır. İstasyonlardaki ZTD ve PWV değerleri üç boyutlu harmonik fonksiyonlarla modellendirilebilir. Ancak, yarıçap vektörü r değerinin büyüklüğü medeniyle, test alanı için dizayn matrisinin kondüsyonu bozulmakta ve çözümsüzlük oluşmaktadır.

Yüksekliği dikkate alan bir modelleme için yapılan araştırmalarda; GNSS-MET istasyonlarının ortometrik yüksekliklerinin harmonik modellemede ağırlıklı olarak kullanılması test edilmiştir. Bu amaçla, üç boyutlu küresel harmonik açılımın ifadesi olan Eşitlik 2.42'de,  $r=H$  (ortometrik yükseklik) alınmıştır. Buna göre, açılım tam üç boyutlu bir açılım olmamaktadır. Ancak, iki boyut üzerine yükseklikle ağırlıklandırma veya 2+1 boyutlarında bir değerlendirme olduğu söylenilmektedir. İstasyon noktalarının yüksekliklerinin ağırlıklı olarak alınmasıyla gerçekleştirilen modellemelerden;

$$m_{ZTD}=\pm 12,8 \text{ mm}$$

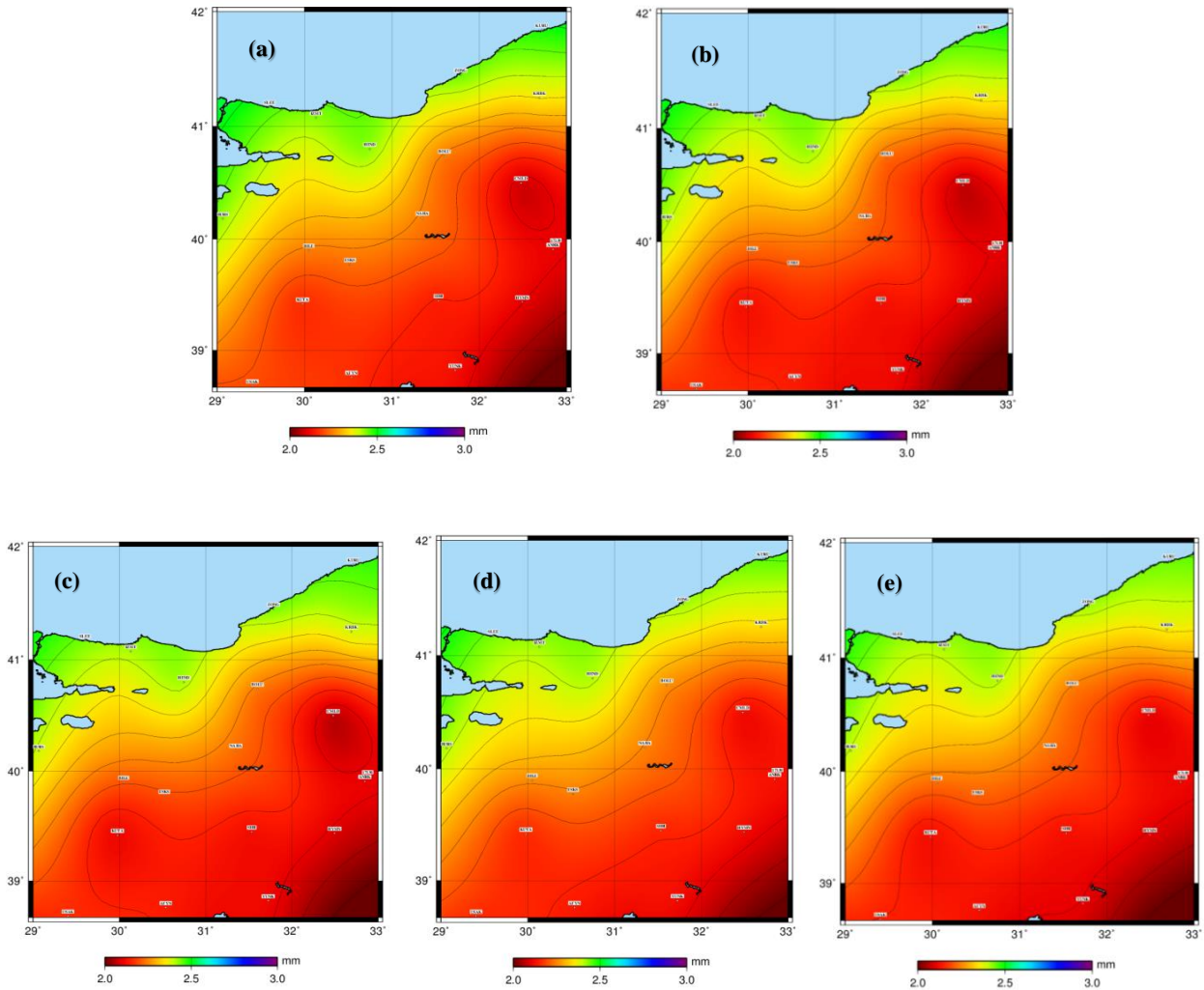
$$m_{PWV}=\pm 2,0 \text{ mm}$$

elde edilmiştir. Burada, yüzey değerleriyle modellemeye göre, ZTD'nin modelleme presizyonu yaklaşık % 350 ve PWV'nin modelleme presizyonu yaklaşık % 25 iyileşmiştir. Test alanı için, 12,8 mm'lik ZTD, 2,04 mm'lik PWV'ye karşılıktır. Elde edilen modelleme

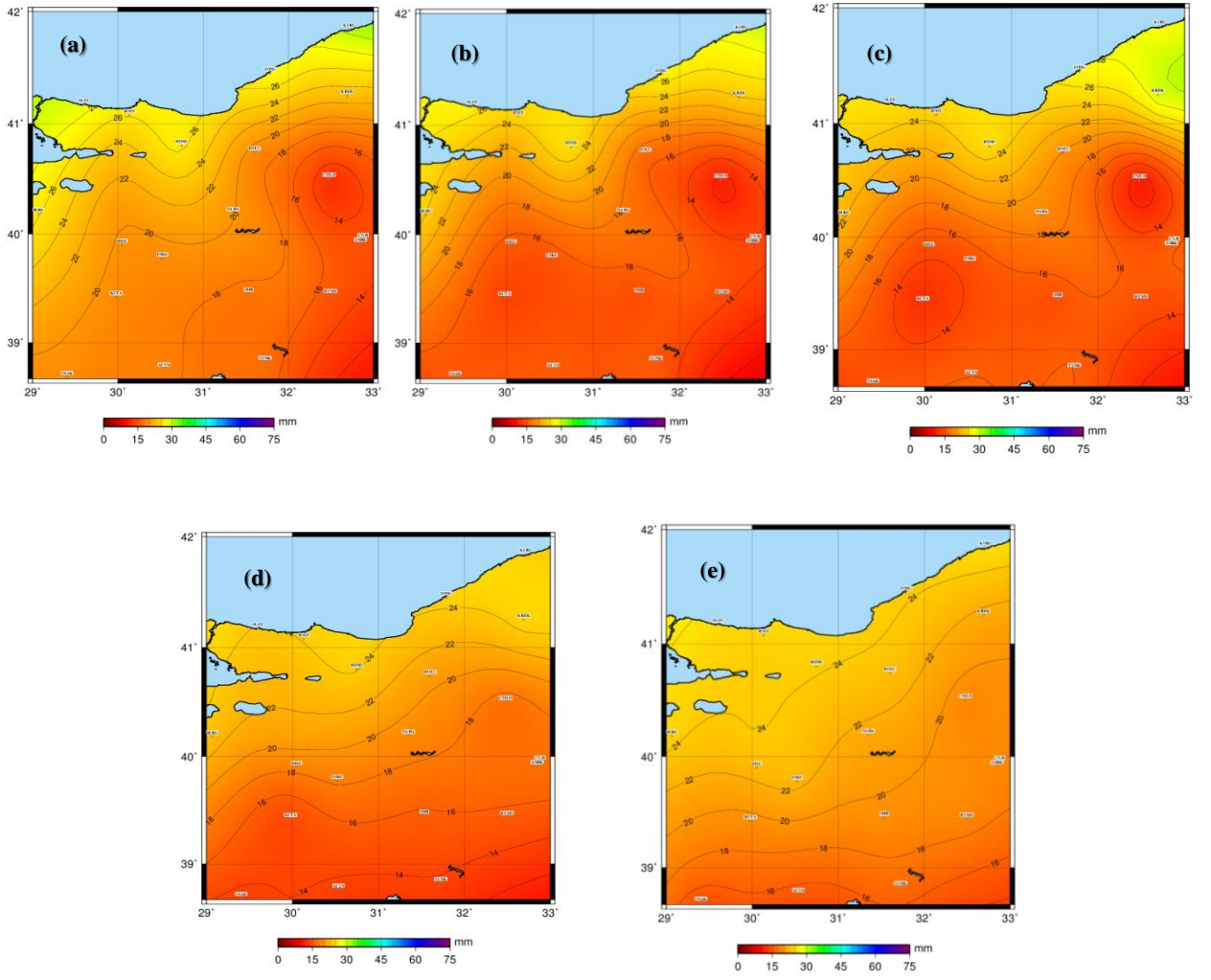
presizyonları, istasyonlardaki ZTD ve PWV değerlerinin elde edilme presizyonlarına çok yakındır. Bu nedenle, modelden dolayı herhangi bir ilave hatanın olmadığı söylenebilir.

Harmonik fonksiyonlarla nümerik modelleme sonuçları bilinmeyenler vektörleri  $x$ 'lerdir. Burada her bir model için 10 parametre yeterli olmuştur. Buna göre, belirli bir tarih için GNSS-MET ağının kapladığı alanın ZTD modeli veya PWV modeli 10 bilinmeyen parametre ile ifade edilir. Uygun yazılım ile bu modelden ZTD veya PWV'nin konumsal dağılımı görselleştirilebilir. Modelden grid veri üretilebilir.

GNSS-MET ağı alanında 1-31 Ağustos 2013 tarihindeki 6, 9, 12, 15 ve 18 saatleri için elde edilen toplam zenit gecikmesi dağılımı Şekil 6.7'de ve yoğunlaşabilir su buharı dağılımı Şekil 6.8'de verilmiştir.



Şekil 6.7 GNSS-MET ağında toplam zenit gecikmesi dağılımı 19 Ağustos 2013 (a) saat 6, (b) saat 9, (c) saat 12, (d) saat 15 ve (e) saat 18.



**Şekil 6.8** GNSS-MET ağında yoğuşabilir su buharı dağılımı 19 Ağustos 2013 (a) saat 6, (b) saat 9, (c) saat 12, (d) saat 15 ve (e) saat 18.

## BÖLÜM 7

### SONUÇ VE ÖNERİLER

GNSS'nin jeodeziye ve yer bilimlerine sağladığı olanaklar giderek artmaktadır. GNSS Meteorolojide; geniş alanlar için yoğunlaşabilir su buharının presizyonlu olarak mekânsal ve zamansal dağılım bilgilerini sağlamak suretiyle, meteorolojinin hava tahmini, ekstrem hava olaylarının tahmini, iklim araştırmalarına katkıda bulunmaktadır ve bu çalışmalar jeodezi için de günceldir. Ayrıca, GNSS'de de; PPP, RTK, VLBI vb. uygulamalarda presizyonlu su buharı kestirimlerine ihtiyaç vardır.

GNSS uygulamalarının temel gereksinimlerinden biri, ZTD ve PWV arasındaki dönüşüm için, ağırlıklı ortalama sıcaklık  $T_m$  modelinin veya dönüşüm faktörü  $Q$  modelinin bölgesel olarak belirli olmasıdır. İkinci olarak, presizyonlu ve güvenilir ZTD değerlerinin elde edilmesi için jeodezik ağırlık tasarımı ve değerlendirme stratejisinin belirlenmesi gelmektedir.

Ağırlıklı ortalama sıcaklık  $T_m$  veya  $Q$  dönüşüm faktörünün, bölgedeki radyosonda istasyonlarında yapılan uzun süreli profil gözlemlerinin analizlerinden belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle, çalışmanın başlangıcında, radyosonda profil analizi algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma ile, profil sıcaklık verilerinin öncül karesel ortalama hataları  $m_T$ , profilin ağırlıklı ortalama sıcaklığı  $T_m$ , dönüşüm faktörü  $Q$  hesaplanmaktadır. Ayrıca, algoritmanın doğruluğunun kontrolü amacıyla PWV değerleri de hesaplanmıştır.

Türkiye'deki, Adana, Ankara, Diyarbakır, Erzurum, Isparta, İstanbul, İzmir ve Samsun olmak üzere toplam 8 radyosonda istasyonunun 2011 yılına ait UTC=0<sup>h</sup> ve UTC=12<sup>h</sup> saatlerindeki profil gözlemleri WMO bilgi bankası Wyoming Üniversitesi'nden alınmış ve analiz edilmiştir. Gözlem yapılamayan günler, aletsel hatalar vb. nedenlerle toplam 4.103 adet profil değerlendirilmiştir.

Radyosonda profil analizlerinden, her istasyon için ve tüm istasyonlar için hesaplanan profil sıcaklıklarının karesel ortalama hatalarının matematiksel ortalaması,  $\pm 1,21-1,58$  K ve tüm istasyonlar için  $\pm 1,33$  K bulunmuştur (Çizelge 4.1). Sıcaklık presizyonları birbirlerine yakın olduğundan, tüm istasyonlardaki sıcaklıklar eşit ağırlıklı olarak değerlendirilmiştir.

İstasyonun hesapladığı ve yayınlanan  $PWV_{RS}$  değerleri ile geliştirilen algoritmadan hesaplanan  $PWV_{Alg}$  değerleri arasındaki farkların ortalaması  $0,6$  mm ve standart sapması  $\pm 0,7$  mm bulunmuştur. Radyosondalardan elde edilen  $PWV$  değerlerinin presizyonları olarak  $\pm 1,3$  mm değeri (Liou et al. 2000; Park et al. 2010) dikkate alındığında, geliştirilen algoritmanın yeterli presizyonla çalıştığı söylenebilir. Bu algoritma, kullanılan model nedeniyle orijinaldir ve gelecekte benzer çalışmalarda kullanılacaktır.

Bevis et al.'da (1992) geliştirilen, yüzey sıcaklığı  $T_s$ 'ye bağlı olarak, ağırlıklı ortalama sıcaklığın  $T_m$  elde edilmesinin  $T_m-T_s$  lineer modeli, ayrı ayrı istasyonlar ve tüm istasyonlar için geliştirilmiştir (Çizelge 4.1). Ağırlıklı ortalama sıcaklığın karesel ortalama hataları, istasyonlarda  $\pm 2,21-2,44$  K ve tüm istasyonlar için (tüm Türkiye için)  $\pm 2,57$  K bulunmuştur. Tüm istasyonlar için;  $T_m=48,55+0,80T_s\pm 2,57$  K elde edilmiştir. Bu bağıntıya göre hesaplanan  $T_m$  değerlerinin oransal presizyonu, normal sıcaklıklar ( $t=20$  °C) için %  $0,9$  bulunur. Ayrıca,  $T_m$  ve  $T_s$  arasındaki korelasyon  $0,99$  olarak elde edilmiştir.

$T_m-T_s$  modelleri üzerindeki mevsimsel etkilerin olup olmadığını incelemek için, profillerde hesaplanan  $T_m$  değerleri, mevsimlere ayrılarak İlkbahar (Mart, Nisan, Mayıs), Yaz (Haziran, Temmuz, Ağustos), Sonbahar (Eylül, Ekim, Kasım), Kış (Aralık, Ocak, Şubat) ve her mevsim için ayrı modellendirilmiştir (Çizelge 4.2). Çizelge 4.2'den, Kış ve İlkbahar mevsimlerinde nemliliğin daha az olması nedeniyle, karesel ortalama hatalarının en küçük olduğu görülüyor. Grupların karesel ortalama hatalarının F-testi ile karşılaştırılması, Sonbahar dışındaki grupların, istatistiksel olarak anlamlı gruplar olduğunu göstermektedir (Çizelge 4.5).

$T_m-T_s$  modelleri üzerindeki karasal ve ılıman iklim bölgelerinin etkilerini incelemek için, Ankara, Diyarbakır, Erzurum, Isparta istasyonları karasal iklim istasyonları ve diğer istasyonlar ılıman iklim istasyonları olarak iki gruba ayrılmış ve modellendirilmiştir (Çizelge 4.3). Karasal modelin karesel ortalama hatası  $\pm 2,38$  K ve ılıman modelin karesel ortalama hatası  $\pm 2,43$  K bulunmuştur. Karesel ortalama hatalar birbirlerine çok yakındır ve F-testi (Çizelge 4.5) karasal-ılıman olarak gruplandırmanın anlamlı olmadığını göstermektedir.



$T_m - T_s$  modelleri üzerindeki gece-gündüz farkının etkisini araştırmak için, veriler gece ve gündüz olarak iki gruba ayrılmış ve modellendirilmiştir (Çizelge 4.4). Karesel ortalama hatalar; gündüz için  $\pm 2,51$  K ve gece için  $\pm 2,31$  K bulunmuştur. Verilerin gece-gündüz olarak gruplandırılması F-testinde anlamlı çıkmıştır (Çizelge 4.5).

$T_m - T_s$  modelleri üzerindeki mevsimsel, karasal-ılıman iklim ve gece-gündüz etkilerini araştırmak için; geliştirilen modellerle normal sıcaklık  $t=20$  °C ve ekstrem sıcaklık  $t=40$  °C için  $T_m$  değerleri hesaplanmış ve modeller birbirleriyle karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.6). Bu karşılaştırma sonuçları, sadece ekstrem sıcaklıklarda, tüm-kış ve karasal-ılıman bölgeler arasında anlamlı farklar belirlenmiştir.

Yukarıdaki sonuçlardan;  $T_m$  üzerinde normal sıcaklıklarda sistematik etkilerin olmadığı, ekstrem yüzey sıcaklıklarında az da olsa bazı sistematik etkilerin olabileceği görölmüştür. Bevis et al. (1992) modelinin karşılaştırmalarından da benzer sonuçlar bulunmuştur (Çizelge 4.6).  $T_m$  hesabında mevsimsel ve gece-gündüz farklılıklarında anlamlı değişiklik oluşmamıştır.

Lineer modellerin presizyonları ve güvenilirlikleri GNSS-RS istasyonlarında test edilmiştir.  $PWV_{GNSS}$  değerleri, her bir model için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Ankara ve İstanbul GNSS-RS istasyonlarında,  $PWV_{RS} - PWV_{GNSS}$  farklarının ortalamaları sırasıyla 2,01-2,05 mm ve 2,33-2,39 mm ve standart sapmaları  $\pm 1,60$  mm ve  $\pm 1,72-1,73$  mm olarak hesaplanmıştır (Çizelge 5.4). Bu sonuçlar, geliştirilen modellerin sonuçları arasında anlamlı farkların olmadığını göstermektedir.  $PWV_{RS}$  ve  $PWV_{GNSS}$  arasındaki korelasyon Ankara için 0,87, İstanbul için 0,90 bulunmuştur. Literatürde ise korelasyon katsayısı değerleri 0,86 (Raju et al. 2007) ile 0,97 (Notarpietro et al. 2012) arasında verilmektedir. Modeller üzerindeki sistematik etkilerin ortalama modelde minimum olduğu ve tüm istasyonlar için geliştirilen  $T_m = 48,55 + 0,80T_s \pm 2,57$  K modeli (Çizelge 4.1) tüm Türkiye için kullanılması önerilmektedir.

Q dönüşüm faktörünün modellenmesi çalışmalarından, istasyonun sıcaklığı ( $T_s$ ), istasyonun enlemi ( $\theta$ ), istasyonun yüksekliği ( $H$ ) ve yılın günü ( $t_D$ ) parametrelerini içeren Eşitlik 82 en küçük karesel ortalama hatası olan modeldir. Bu modele göre; Q dönüşüm faktörünün 1km'lik yükseklik değişimine karşılık 0,0833 (% 1,3) değiştiği görölmektedir (Çizelge 4.9).

Q dönüşüm faktörü modelleri GNSS-RS istasyonlarında test edilmiştir. Ankara ve İstanbul için  $PWV_{RS} - PWV_{GNSS}$  farklarının ortalamaları sırasıyla 1,41-1,58 mm ve 1,59-1,63 mm ve standart sapmaları  $\pm 1,71 - \pm 1,73$  mm ve  $\pm 1,77$  mm -  $\pm 1,80$  mm olarak bulunmuştur. Her iki

istasyon için de; ortalamalar ve standart sapmalar arasındaki farklar anlamlı değildir. Bu nedenlerle tüm Türkiye Q modeli olarak;  $Q_{BEU} = [5,7053 - 0,0067(T_s[K] - 287,7620) + 0,0130\theta[^\circ] + 0,0833H[km] + 0,0709 \sin\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right) + 0,1195 \cos\left(2\pi \frac{t_D}{365}\right)$  modeli (Çizelge 4.9) önerilebilir ve modelin presizyonu (% 1,1,  $Q_{ort} = 6,26$  için)  $\pm 0,0684$ 'tür. Bu modelin en az sistematik bileşen içerdiği de söylenebilir.

Tüm Türkiye için  $T_m$  modelinden hesaplanan Ankara ve İstanbul istasyonlarındaki  $\Delta PWV$  farkları ortalama 2,18 mm ve standart sapma  $\pm 1,67$  mm olarak alınabilir. Benzer şekilde her iki istasyon için Eşitlik 4.10'dan hesaplanan  $\Delta PWV$  farkları da; ortalama 1,56 mm ve standart sapma  $\pm 1,75$  mm olarak ortalamaları alınabilir.

Bu sonuçlara göre, Q modelinin ortalama değeri 0,62 mm daha küçük ve standart sapması  $\pm 0,08$  mm kadar büyük olmaktadır. Bu nedenlerle, Q modelinin kullanılması durumunda  $T_m$  modeline göre daha küçük düzeltmeye karşılık benzer presizyonlar elde edileceği söylenebilir. Q modelinin presizyonu  $\pm 1,75$  mm, Bölüm 1'de açıklanan çalışmaların sonuçlarıyla uyumludur.

$PWV_{RS} - PWV_{GNSS}$  farklarından bulunan sonuçlar, radyosonda ve GNSS hatalarının toplamıdır (Rozsa 2014).  $PWV_{GNSS}$ 'in presizyonu,  $PWV_{GNSS}$ 'in presizyonu  $\pm 1,0$  mm alındığında  $\pm 1,2 - 1,4$  mm bulunur.

Bu çalışmada Bernese v5.0 yazılımı esas alınmıştır. Ancak, kontrol amacıyla GAMIT/GLOBK ile de değerlendirmeler yapılmıştır. Ankara ve İstanbul GNSS-RS istasyonlarında, GAMIT/GLOBK ile hesaplanan ZTD değerlerinin geliştirilen tüm Türkiye için  $T_m$  modeli ve geliştirilen  $Q_{Hibrit}$  modeline  $PWV$ 'ye dönüşümü sonuçları (Çizelge 5.5 ve Çizelge 5.10),  $\Delta PWV$  farklarının ortalamalar ve karesel ortalama hatalar olarak Bernese v5.0 sonuçları ile uyumlu ve daha iyi olduğunu göstermektedir.

Sürekli meteorolojik gözlemlerin yapılmadığı GNSS istasyonlarındaki meteorolojik veriler, bu istasyonların çevresindeki sürekli meteoroloji istasyonlarının verilerinden enterpolasyon ile sağlanabilir. Küresel yüzey üzerinde, bir mekansal modelleme ve enterpolasyon için küresel harmonik fonksiyonlar önceliklidir. Sıcaklık, basınç, nemlilik,  $PWV$  ve ZTD parametrelerinin küresel harmonik fonksiyonlar ile mekansal modellenmesi araştırılmıştır.

Sıcaklık, basınç ve nemlilik parametrelerinin seçilen test ağı koşullarında elde edilen modelleme ve enterpolasyon presizyonları  $m_{Tort} = \pm 1,74$  K,  $m_{Port} = \pm 0,95$  hPa,  $m_{Hort} = \pm 14,88$  %

değerlerinin PWV'ye etkileri, PWV=5 mm için  $\pm 0,5$  mm ve PWV=50 mm için  $\pm 1,32$  mm olmaktadır (Mekik vd. 2015). Bu sonuçlar, test alanı gibi küçük alanlarda da sıcaklık ve basınç değerlerinin enterpolasyonlarında küresel harmonik fonksiyonlarını kullanılabileceğini göstermektedir.

Ayrıca, istasyon yüksekliklerini de (hesaplanan/elde edilen) ZTD ve PWV değerlerinin yükseklik ağırlıklı modellenmesinde, modelleme presizyonlarının, önemli derecede iyileştiği (ZTD'de yaklaşık % 78, PWV'de % 20) de gözlenmiştir.

Bu çalışma ile Türkiye'de ilk kez

- Radyosonda analizi ile  $T_m$  ağırlıklı ortalama sıcaklıklar ve Q dönüşüm faktörleri hesaplanmış,
- Tüm Türkiye'de geçerli normal meteorolojik koşullarda  $\pm 0,9$  oransal doğruluklu  $T_m-T_s$  modeli geliştirilmiş,
- Tüm Türkiye'de geçerli  $\pm 1,15$  oransal doğruluklu Q dönüşüm faktörü modeli geliştirilmiş,
- Geliştirilen modellerin doğrulukları GNSS-RS istasyonlarından test edilmiş,
- TUSAGA-Aktif istasyonlarının sıcaklık, basınç ve nemlilik parametrelerinin su buharı belirlemek için yeterli presizyonla küresel harmonik fonksiyonlarla enterpolasyon yoluyla elde edilmesi yöntemi geliştirilmiş,
- TUSAGA-Aktif istasyonlarında elde edilen toplam zenit gecikmesi ve yoğuşabilir su buharı değerlerinin küresel harmonik fonksiyonlarla nümerik modellenmesi geliştirilmiş,
- Analiz, değerlendirme ve modelleme çalışmaları için gereken yazılımlar geliştirilmiştir.
- TUSAGA-Aktif'in GNSS MET ağına dönüştürülmesi için gereken altyapı araştırmalarının büyük bir kısmı tamamlanmıştır.



## KAYNAKLAR

- Askne J and Nordius H** (1987) Estimation of Tropospheric Delay for Microwaves from Surface Weather Data. *Radio Science*, 22 (3): 379-386.
- Bai Z and Feng Y** (2003) GPS Water Vapor Estimation Using Interpolated Surface Meteorological Data from Australian Automatic Weather Stations. *Journal of Global Positioning Systems*, 2 (2): 83-89.
- Baltink H K, Van Der Marel H and Van Der Hoeven A G A** (2002) Integrated Atmospheric Water Vapour Estimates from a Regional GPS Network. *Journal of Geophysical Research*, 107 (D3): 3-1-3-8.
- Bevis M, Businger S, Herring T A, Rocken C, Anthes R and Ware R H** (1992) GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97 (D14): 15787-15801.
- Bevis M, Businger S, Chiswell S, Herring T A, Anthes R A, Rocken C and Ware R H** (1994) GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water. *Journal of applied meteorology*, 33 (3): 379-386.
- Beutler G** (2015) GNSS for Science: Today and in Future. *Tenth Meeting of the International Committee on Global Navigation Satellite Systems (ICG)*, 2-6 Kasım 2015, Boulder, Kolorado, ABD.
- Boccolari M, Fazlagic S, Barbati A, Malmusi S and Santangelo R** (2006) GPS, NCEP data and METEOSAT Precipitable Water Comparisons for Balkans Area. Second Balwois Conference on Water Observation and Information System for Decision Support, 23-26 Mayıs 2006, Ohrid, Makedonya.
- Bock O, Bouin M N, Doerflinger E, Collard P, Masson F, Meynadier R, Nahmani S, Koite M, Gaptia Lawan Balawan K, Dide F, Ouedraogo D, Pokperlaar S, Ngamini J-B, Lafore J P, Janicot S, Guichard F and Nuret M** (2008) West African Monsoon observed with ground-based GPS receivers during African Monsoon Multidisciplinary Analysis (AMMA). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113 (D21105).
- Bokoye A I, Royer A, O'Neill N T, Cliche P, McArthur L J B, Teillet P M, Fedosejevs G and Thériault J-M** (2003) Multisensor Analysis of Integrated Atmospheric Water Vapor Over Canada and Alaska., *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108 (D15): ACH 21-1 - ACH 21-16.
- Bosy J, Kaplan J, Rohm W, Sierny J and Hadas T** (2012) Near Real-time Estimation of Water Vapour in the Troposphere Using Ground GNSS and the Meteorological Data. *Annales Geophysicae*, 30 (9): 1379-1391.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Boutiouta S and Lahcene A** (2013) Preliminary Study of GNSS Meteorology Techniques in Algeria. *International Journal of Remote Sensing*, 34 (14): 5105-5118.
- Boehm J and Schuh H** (2004) Vienna mapping functions in VLBI analyses. *Geophys. Res. Lett.*, 31(1): L01603 01601-01604.
- Böhm J, Niell A, Tregoning P and Schuh H** (2006) Global Mapping Function (GMF): A New Empirical Mapping Function Based on Numerical Weather Model Data. *Geophysical Research Letters*, 33 (7).
- Böhm J, Heinkelmann R and Schuh H** (2007) Short Note: A Global Model of Pressure and Temperature for Geodetic Applications. *Journal of Geodesy*, 81 (10): 679-683.
- Brenot H, Walpersdorf A, Reverdy M, Van Baelen J, Ducrocq V, Champollion C, Masson F, Doerflinger E, Collard P and Giroux P** (2014) A GPS Network for Tropospheric Tomography in the Framework of the Mediterranean Hydrometeorological Observatory Cévennes-Vivarais (southeastern France). *Atmospheric Measurement Techniques*, 7 (2): 553-578.
- Davis J L, Herring T A, Shapiro I I, Rogers A E E and Elgered G** (1985) Geodesy by Radio Interferometry: Effects of Atmospheric Modelling Errors on Estimates of Baseline Length. *Radio Science*, 20 (6): 1593-1607.
- Dousa J** (2004) Evaluation of Tropospheric Parameters Estimated in Various Routine GPS Analysis. *Physics and Chemistry of the Earth*, 29 (2): 167-175.
- Dousa J and Bennitt G V** (2013) Estimation and Evaluation of Hourly Updated Global Zenith Total Delays over Ten Months”, *GPS Solut.*17, 453-464.
- Emardson T R, Elgered G and Johansson J M** (1998) Three Months of Continuous Monitoring of Atmospheric Water Vapor with a Network of Global Positioning System Receivers. *Journal of Geophysical Research*, 103 (D2): 1807-1820.
- Emardson T R and Derks H J P** (2000) On the Relation Between the Wet Delay and the Integrated Precipitable Water Vapour in the European Atmosphere. *Meteorological Applications*, 7 (1): 61-68.
- Goad C C and Goodman L** (1974) A Modified Hopfield Tropospheric Refraction Correction Model. *the Fall Annual Meeting of the American Geophysical Union*, 12-17 Aralık 1974, San Francisco, California, A.B.D..
- Golub G H, Hansen P C and O’leary D P** (1999). Tikhonov Regularization and Total Least Squares”, *Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM) Journal on Matrix Analysis and Applications*, 21 (1): 185-194.
- Gürbüz G, Mekik Ç, Deniz İ ve Rozsa S** (2014) Radyosonda ve GPS Verileri ile Elde Edilen Yoğuşabilir Su Buharı Değerlerinin Karşılaştırılması. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6 (3): 32-39.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Ha J H, Park K D and Heo B H** (2006) Development of a Local Mean Temperature Equation for GPS-based Precipitable Water Vapor over the Korean Peninsula. *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 23 (4): 373-384.
- Hatanaka Y, Iizuka T, Sawada M, Yamagiwa A, Kikuta Y, Johnson J M and Rocken C** (2003) Improvement of the Analysis Strategy of GEONET. *Bulletin of the Geographical Survey Institute*, 49: 11-37.
- Heise S, Wickert J, Bayerle G, Schmidt T and Reigber C H** (2006) Global Monitoring of Tropospheric Water Vapor with GPS Radio Occultation Aboard CHAMP,” *Advances in Space Research*, 37 (12): 2222-2227.
- Hogg D C, Guiraud F O and Decker M T** (1981) Measurement of Excess Radio Transmission Length on Earth-Space Paths. *Astronomy and Astrophysics*, 95: 304-307.
- Huang C-Y, Cheng C-Z, Lin P-H, Fong C-J, Wickert J and Hsiao C-C** (2009) Occultation Retrieval of Atmospheric Profiles from the FORMOSAT-3/COSMIC Mission: Early results. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 20 (1): 21-34.
- Igondová M** (2009) Analysis of Precision and Accuracy of Precipitable Water Vapour Derived from GPS Observations. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 39 (2): 121-132.
- Isioye O A, Combrinck L, Botai J O and Munghemezulu C** (2015) The Potential for Observing African Weather with GNSS Remote Sensing. *Advances in Meteorology*.
- Jade S and Vijayan M S M** (2008) GPS-based Atmospheric Precipitable Water Vapor Estimation Using Meteorological Parameters Interpolated from NCEP Global Reanalysis Data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113 (D3).
- Jin S G, Lou O and Ren C** (2010) Effect of Physical Correlations on Long-Distance GPS Positioning and Zenith Tropospheric Delay Estimates. *Advance in Space Research*, 46 (2): 190-195.
- John V O and Buehler S A** (2005) Comparison of Microwave Satellite Humidity Data and Radiosonde Profiles: A Survey of European Stations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5 (7): 1843-1853.
- Kasara A** (1977) Numerical Integration of the Global Barotropic Primitive Equations with Hough Harmonic Expansions., *Journal of Atmospheric Sciences*, 34 (5): 687-701.
- Liou Y A, Huang C Y and Teng Y T** (2000) Precipitable Water Observed by Ground-based GPS Receivers and Microwave Radiometry. *Earth Planets Space*, 52 (6): 445-450.
- Liou Y A, Teng Y T, Van Hove T and Liljegren J C** (2001) Comparison of Precipitable Water Observations in the near Tropics by GPS, Microwave Radiometer, and Radiosondes. *Journal of Applied Meteorology*, 40 (1): 5-15.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Lo J and El-Mowafy A** (2011) Interpolation of the GNSS Wet Tropospheric Delay. *the Surveying Spatial Sciences Biennial Conference*, 21-25 Kasım 2011, Wellington, Yeni Zelanda.
- Lüdecke H J, Hempelmann A and Weiss C O** (2013) Multi-Periodic Climate Dynamics: Spectral Analysis of Long-term Instrumental and Proxy Temperature Records. *Climate of the Past*, 9 (1): 447-452.
- Malderen R V** (2014) A Literature Survey on Integrated Water Vapor (IWV) Intercomparison Studies. *1st ES1206 GNSS4SWEC Workshop*, 26-28 Şubat 2014, Münih, Almanya.
- Marini J W and Murray C W** (1973) Correction of Laser Range Tracking Data for Atmospheric Refraction at Elevations Above 10 Degrees.
- Mekik C, Yıldırım O and Bakıcı S** (2011) The Turkish RTK CORS Network (TUSAGA-Aktif) Infrastructure. *Scientific Research and Essays*, 6 (19): 3986-3999.
- Mekik C and Can O** (2010) An Investigation on Multipath Errors in Real Time Kinematic GPS Method. *Scientific Research and Essays*, 5 (16), 2186-2200.
- Mendes V B and Langley R B** (1994) A Comprehensive Analysis of Mapping Functions Used in Modeling Tropospheric Propagation Delay in Space Geodetic Data., *International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation*, 30 Ağustos-2 Eylül 1994, Banff, Kanada.
- Mendes V B and Langley R B** (1998) Optimization of Tropospheric Delay Mapping Function Performance for High Precision Geodetic Applications. *DORIS Days*, 27-29 Nisan 1998, Toulouse, Fransa.
- Mendes V B and Langley R B** (2002) Revised Refractive Index Formulae and Their Effect in Zenith Delay Prediction and Estimation. *Position Location and Navigation Symposium 2002*, 15-18 Nisan 2002, Palm Springs, Kaliforniya, ABD.
- Mendes V B, Prates G, Pavlis E C, Pavlis D E and Langley R B** (2002) Improved Mapping Functions for Atmospheric Refraction Correction in SLR. *Geophysical Research Letters*, 29 (10).
- Mendes V B and Pavlis E C** (2002) Atmospheric Refraction at Optical Wavelengths: Problems and Solutions. *13th International Laser Ranging Workshop*, 7-11 Ekim 2002, Washington, D.C., ABD.
- Miidla P, Rannat K and Uba P** (2009) A Mathematical Model of Tropospheric Water Vapor Tomography. *Environmental and Computer Science ICECS'09 Second International Conference on IEEE*, 28-30 Aralık 2009, 183-187.
- Moszynski K** (1995) On Solving Linear Algebraic Equations with an Ill-conditioned Matrix. *Applicationes Mathematicae*, 22 (4): 499-513.



## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Niell A E, Coster A J, Solheim F S, Mendes V B, Toor P C, Langley R B and Ruggles C A** (1996) Measurement of Water Vapor by GPS, WVR and Radiosonde. *11th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry*, 23-24 Ağustos 1996, Onsala, İsveç.
- Ning T, Wang J, Elgered G, Dick G, Wickert J, Bradke M, Sommer M, Querel R and Smale D** (2015) The Uncertainty of the Atmospheric Integrated Water Vapour Estimated from GNSS Observations. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 8 (8): 8817-8857.
- Notarpietro R, Cucca M and Bonafoni S** (2012) GNSS Signals: A Powerful Source for Atmosphere and Earth's Surface Monitoring. *Remote Sensing of Planet Earth*, Chemin Y(Ed.), ISBN 978-953-307-919-6, InTech, e-book, 171-200.
- Pacione R and Vespe F** (2003) GPS Zenith Total Delay Estimation in the Mediterranean Area for Climatological and Meteorological Applications. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20 (7):1034-1042.
- Pacione R, Bock O and Dousa J** (2014) GNSS Atmospheric Water Vapor Retrieval methods. *1st ES1206 GNSS4SWEC Workshop*, 26-28 Şubat 2014, Münih, Almanya.
- Park C, Baek J and Cho J** (2010) Analysis on Characteristics of Radiosonde Bias Using GPS Precipitable Water Vapor. *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 27 (3): 213-220.
- Park C-G, Roh K-M and Cho J** (2012) Radiosonde Sensors Bias in Precipitable Water Vapor From Comparisons With Global Positioning System Measurements. *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 29 (3): 295-303.
- Pottioux E, Berckmans J, Haan S and Bruyninx C** (2014) Producing IWV Maps for Guiding Nowcasting of Severe Weather. *1st ES1206 GNSS4SWEC Workshop*, 26-28 Şubat 2014, Münih, Almanya.
- Rohm W** (2012) The Precision of Humidity in GNSS Tomography. *Atmospheric Research*, 107: 69-75.
- Rohm W, Yuan Y, Biadeglne B, Zhang K and Marshall J** (2014) Ground-based ZTD/IWV Estimation Aystem for Numerical Weather Prediction in Challenging Weather Conditions. *Atmosphere Research*, 138: 414-426.
- Rózsa S** (2014) Uncertainty considerations for the comparison of water vapour derived from radiosondes and GNSS. *Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet. Proceedings of the International Association of Geodesy Symposia*, 139: AQ17 65–78.
- Rózsa S, Kenyeres A, Weidinger T, Gyöngyösi A Z** (2014) Near real-time estimation of integrated water vapour from GNSS observations in Hungary. *Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet Proceedings of International Association of Geodesy Symposia*, 139: 31-39.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Rothacher M, Beutler G, Gurtner W, Geiger A, Kahle H G and Schneider D** (1986) The Swiss 1985 GPS Campaign. *the Fourth International Symposium on Satellite Positioning*, 2, 979–991, Teksas, ABD.
- Saastamoinen I I** (1973) Contribution to the Theory of Atmospheric Refraction., *Bulletin G'eod'esique*, 107: 13–34.
- Sapucci L F** (2014) Evaluation of Modeling Water-Vapor-Weighted Mean Tropospheric Temperature for GNSS-Integrated Water Vapor Estimates in Brazil. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53 (3): 715-730.
- Sato K, Realini E, Tsuda T, Oigawa M, Iwaki Y, Shoji Y and Seko H** (2013) A High-Resolution, Precipitable Water Vapor Monitoring Sytem Using a Dense Network of GNSS Receivers. *Journal of Disaster Research*, 8 (1): 37-47.
- Schmidt T, Wickert J, Heise S, Flechter F, Fagiolini E, Schwarz G, Zenner L and Gruber T** (2008) Comparison of ECMWF Analysis with GPS Radio Occultations from CHAMP, *Annales Geophysicae*, 26: 3225-3234.
- Schmidt T, Wickert J and Haser A** (2010) Variability of the Upper Troposphere and Lower Stratosphere Observed with GPS Radio Occultation Bending Angles and Temperatures. *Advances in Space Research*, 46: 150–161.
- Sharifi M A, Khaniani A S, Joghateni M, Schmidt T, Masoumi S and Wickert J** (2013) Tropause Analysis over Iranian Region Using GPS Radio Occultation Data. *Advanced Space Research*, 52: 1700-1707.
- Suortti T M, Kats A, Kivi R, Kampeer N, Leitereer U, Miloshevich L M, Neurer R, Paukkunen A, Ruppert P, Vomel H and Yushkov V** (2008) Tropospheric Comparisons of Vaisala Radiosondes and Balloon-Borne Frost-Point and Lyman- $\alpha$  Hygrometers during the LAUTLOS-WAVVAP. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25 (2): 149-166.
- Raju C S, Saha K, Thampi B V and Parameswaran K** (2007) Empirical Model for Mean Temperature for Indian Zone and Estimation of Precipitable Water Vapor from Ground Based GPS Measurements. *Annales Geophysicae* , 25: 1935–1948.
- Thayer G D** (1974) An Improved Equation for the Radio Refractive Index of Air. *Radio Science*, 9 (10): 803-807.
- Tregoning P, Boers R, O'Brien D and Hendy M** (1998) Accuracy of Absolute Precipitable Water Vapor Estimates from GPS Estimates. *Journal of Geophysical Research*, 103 (D22): 28,701-28,710.
- Troller M, Lutz S, Walpersdorf A, Geiger A, Bürki B, Bock O, Doerflinger E and Kahle H G** (2005) Determination of Continuous 3D Water Vapor Distribution Using the High-Density GPS Network of the Escompte Campaign. *Final ESCOMPTE Workshop*, 2-4 Şubat 2005, Marsilya, Fransa.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- URL-1** <<http://i2.wp.com/www.gisresources.com/wp-content/uploads/2013/09/1270810508028.png>>
- URL-2** <<http://www.geod.uni-bonn.de/apmg/lehrstuhl/aufgabenberich/physikgeo.php>>, Ziyaret tarihi: 2006.
- URL-3** <<http://en.wikipedia.org/wiki/Tikhonov-regularization>>, Ziyaret tarihi: 2015.
- URL-4** <<http://www.mathworks.com/matlabcentral>>, Ziyaret tarihi: 2015.
- URL-5** <<https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/weather-balloon/integrated-globalradiosonde-archive>>, Ziyaret tarihi: 2015.
- URL-6** <<http://radiosondemuseum.org/what-is-a-radiosonde/>>
- URL-7** <<http://cliffmass.blogspot.com.tr/2012/10/how-high-do-weather-balloons-rise.html>>
- URL-8** <<http://www.mgm.gov.tr/genel/sss.aspx?s=ravinsonde>>
- URL-9** <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
- URL-10** <<http://www.mgm.gov.tr/genel/sss.aspx?s=ravinsonde>>, Ziyaret tarihi: 2015.
- URL-11** <<http://celebrating200years.noaa.gov/transformations/spatial/image1.html>>
- URL-12** <<http://egvap.dmi.dk/>>
- URL-13** <[http://apollo.lsc.vsc.edu/classes/remote/lecture\\_notes/gps/suominet.html](http://apollo.lsc.vsc.edu/classes/remote/lecture_notes/gps/suominet.html)>
- URL-14** <<http://www.mathworks.com/help/signal/ref/plomb.html>>, Ziyaret tarihi: 2015.
- URL-15** <<http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm96/intpt.html>>, Ziyaret tarihi: 2014.
- Vespe F, Benedetto C and Pacione R** (2004) The Use of Refractivity by Radio Occultation Technique for the Derivation of Atmospheric Water Vapor Content. *Physics and Chemistry of the Earth*, 29: 257-265.
- Wang J, Zhang L and Dai A** (2005) Global Estimates of Water-Vapor-Weighted Mean Temperature of Atmosphere for GPS Applications. *Journal of Geophysical Research*, 110 (D21).
- Wickert J, Michalak G, Schmidt T, Beyerle G, Cheng C, Healy S B, Heise S, Huang C, Jakowski N, Köhler W, Mayer C, Offiler D, Ozawa E, Pavelyev A G, Rothacher M, Tapley B and Arras C** (2009) “GPS Radio Occultation Result from CHAMP, GRACE and FORMOSAT-3/COSMIC”, *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 20 (1): 35-50.



## BİBLİYOGRAFYA

- Aksoy A** (1974) *Matematik İstatistik Yöntemlerle Jeodezik Ölçülerin İrdelenmesi*, İTÜ Yayınları, İstanbul, 74s.
- Berg H** (1948) *Allgemeine Meteorologie*, Bonn Dümmler's Verlag Yayınları, Bonn, Almanya, 337pp.
- Blais J A R** (1988) *Estimation and Spectral Analysis*, Calgary Üniversitesi Yayınları, Alberta, Kanada.
- Beutler G, Bock H, Dach R, Fridez P, Gäde A, Hugentobler U, Jäggi A, Meindl M, Mervart L and Prange L** (2007) *User Manual of the Bernese GPS Software, Version 5.0*, Astronomi Enstitüsü, Bern Üniversitesi Yayınları, Bern, İsviçre.
- Gkioulekus E** (1996) *Algorithms with Matlab*, Washington Üniversitesi Yayınları.
- Gürbüz G** (2015) GNSS ve radyosonda'dan elde edilen yoğunlaşabilir su buharı miktarlarının karşılaştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Geomatik Anabilim Dalı, Zonguldak, 118s.
- Jin S G, Cardellach E and Xie F** (2014) *GNSS Remote Sensing: Theory, Methods and Applications*, ISBN: 978-94-007-7481-0, Springer, Hollanda, 276pp.
- Haan S** (2006) *National/Regional Operational Procedures of GPS Water Vapour Networks and Agreed International Procedures, Instruments and Observing Methods*. Report No.92, World Meteorological Organization, TD-No 1340, 20pp.
- Li J, Schmit T J, Jin X and Martin G** (2010) *GOES-R Advanced Baseline Imager (ABI) Algorithm Theoretical Basis Document for Theoretical Basis Document for Legacy Atmospheric Moisture Profile, Legacy Atmospheric Temperature Profile, Total Precipitable Water, and Derived Atmospheric Stability Indices*. NOAA NESDIS Center for Satellite Applications and Research US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Environmental Satellite, Data, and Information Service, 106pp.
- Lutz S L** (2008) High-resolution GPS tomography in view of hydrological hazard assessment. *PhD Thesis*, Swiss Zürih Federal Teknoloji Enstitüsü , Zürih, İsviçre, 219pp.
- Mekik Ç, Aktuğ B, Özlüdemir M T, Görmüş K S, Mert İ, Deniz İ ve Gürbüz G** (2015) *GPS ile Atmosferik Su Buharı Kestirimi Projesinin Raporu*, TÜBİTAK 112Y350 nolu proje, Ankara, 118s.

## BİBLİYOGRAFYA (devam ediyor)

- Mendes V B** (1999) Modeling the Neutral-Atmospheric Propagation Delay in Radiometric Space Techniques. *PhD Thesis*, Jeodezi ve Geomatik Mühendisliği Bölümü, New Brunswick Üniversitesi, Kanada, 378pp.
- Nielsen N W and Petersen C** (2003) *A Generalized Thunderstorm Index Developed for DMI-HIRLAM*. Scientific Report 03-16, Danimarka Meteoroloji Enstitüsü, Kopenhag, Danimarka, 27pp.
- Ning T** (2012) GPS Meteorology: With Focus on Climate Applications. *PhD Thesis*, Department of Earth and Space Sciences, Chalmers Teknik Üniversitesi, Gothenburg, İsveç, 82pp.
- Nguyen N C** (2006) A Note on Tikhonov Regularization of Linear Ill-Posed Problems. Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, ABD, 4pp.
- Perler D** (2011) Water Vapor Tomography using Global Navigation Satellite Systems. *PhD Thesis*, Zürih Federal Teknoloji Enstitüsü, Zürih, İsviçre, 207pp.
- Sierk B** (2000) Solar Spectrometry for Determination of Tropospheric Water Vapor. *PhD Thesis*, Zürih Federal Teknoloji Enstitüsü, Zürih, İsviçre, 225pp.
- Schüler T** (2001) On Ground-based GPS Tropospheric Delay Estimation. *PhD Thesis*, Bundeswehr Üniversitesi, Münih, Almanya, 374pp.
- Solbrig P** (2000) Untersuchungen über die Nutzung numerischer Wettermodelle zur Wasserdampfbestimmung mit Hilfe des Global Positioning Systems. *Diploma Thesis*, Institute of Geodesy and Navigation, University of FAF Munich, Münih, Almanya.
- Song D S** (2006) Accuracy Improvement of Precipitable Water Vapor Estimation by Precise GPS Analysis. *PhD Thesis*, SungKyunKwan Üniversitesi, Güney Kore.
- Tan S M and Fox C** (2015) Regularization Methods for Linear Inverse Problems., PHYSICS 707, The University of Auckland. Yeni Zelanda.
- Troller M R** (2004) GPS Based Determination of the Integrated and Spatially Distributed Water Vapor in the Troposphere. *PhD Thesis*, Zürih Federal Teknoloji Enstitüsü, Zürih, İsviçre, <http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-004796376>.

## EK AÇIKLAMALAR

### EK A: Radyosonda Profil Analizi MATLAB Kodu

```
disp('*****')
disp('*** SONDA ANALIZ, ILKE DENIZ ***')
disp('*** 2013, ZONGULDAK ***')
disp('*****')
fname= input('Txt dosyasini seciniz:', 's');
File= [fname,'.txt'];
data=load (File);
gun=input('kaçinci gün olduğunu giriniz: ');
ay=input('kaçinci ay olduğunu giriniz: ');
z=input('radyosonda hangi saatte ölçüm yapmış giriniz: ');
t=data(:,3); %sıcaklık
td=data(:,4);
H=data(:,5);%nemlilik
p=data(:,1);%basınç

% İstanbul için alınan değerler
sten=40.96; % istasyonun enlemi, derece
styuk=39.0; % istasyonun yüksekliği, metre
n=size(data);
format long
m=n(1,1);
for i=1:m
    y=(h(i,.)-h(1))/1000.;
    a11(i,:)=y;
    a12(i,:)=y^2;
    a13(i,:)=y^3;
    a14(i,:)=y^4;
    a15(i,:)=y^5;
    a16(i,:)=y^6;
    a17(i,:)=y^7;
end
if h(m)>8000.
A=[a00 a11 a12 a13 a14 a15 a16 a17 ];
nn=size(A);
AT=A.';
N=AT*A;
Q=inv(N);
nt=AT*t;
XT=Q*nt;
% VT sıcaklık düzeltmesi
VT=A*XT-t;
VTT=VT';
VVT=VTT*VT;
```

```

Ts=(t(1)+VT(1))+273.16; % Ts yüzey sıcaklığı
mot=sqrt(VVT/(m-nnn)); % mot sıcaklığın karesel ortalama hatası
B=[XT sqrt(diag(Q))*mot];
% T bilinmeyenlerin istatistik testi, t testi
disp('T bilinmeyenlerin istatistik testi')
sol=0.95;
sed=m-nnn;
tx=tinvs(sol,sed);
for i=1:nnn
    if abs(XT(i))>tx*sqrt(Q(i,i))*mot
        istanaliz=[int2str(i) '.bilinmeyen anlamlı']
    elseif abs(XT(i))<tx*sqrt(Q(i,i))*mot
        istanaliz=[int2str(i) '.bilinmeyen anlamlı değil']
    end
end
else
A=[a00 a11 a12 a13 a14 ];
nn=size(A);
AT=A.';
N=AT*A;
Q=inv(N);
nt=AT*t;
XT=Q*nt;
% VT sıcaklık düzeltmesi
VT=A*XT-t;
VTT=VT';
VVT=VTT*VT;
Ts=(t(1)+VT(1))+273.16; % Ts yüzey sıcaklığı (Kelvin)
mot=sqrt(VVT/(m-nnn)); % mot sıcaklığın karesel ortalama hatası
B=[XT sqrt(diag(Q))*mot];
% T bilinmeyenlerin istatistik testi, t testi
disp('T bilinmeyenlerin istatistik testi')
sol=0.95;
sed=m-nnn;
tx=tinvs(sol,sed);
for i=1:nnn
    if abs(XT(i))>tx*sqrt(Q(i,i))*mot
        istanaliz=[int2str(i) '.bilinmeyen anlamlı ']
    elseif abs(XT(i))<tx*sqrt(Q(i,i))*mot
        istanaliz=[int2str(i) '.bilinmeyen anlamlı değil']
    end
end
end
end
% e/T ve e/T2 Fonksiyonları hesaplanması
A1=[a00 a11 a12 a13 a14 a15 a16 a17 ];
AT1=A1.';
N1=AT1*A1;
Q1=inv(N1);
for i=1:m
    T=t(i,:)+273.16+VT(i,:);

```



```

Td=td(i,:)+273.16;
w=min(max(210./T,0.5),0.98);
tw=w*T+(1.-w)*Td;
if T>273.16
    for k=1:3 %3 iterasyon
        etw=6.1078*exp(17.269*(tw-273.16)/(tw-35.86));
        rtw=0.622*etw/(p(i,)-etw);
        et=6.1078*exp(17.269*(T-273.16)/(T-35.86));
        rt=0.622*et/(p(i,)-et);
        ftw=(T-tw)*(1000.+rtw*4186.)-2500000.*(rtw-rt);
        f11=17.269*(273.16-17.269)*rtw/((tw-35.86)^2*(1.-x));
        f12=2500000.+4186*(tw-T);
        f1=f11*f12;
        f2=1000.+rtw*4186.;
        dtw=ftw/(f1+f2);
        tw=tw+dtw;
        etw1=6.1078*exp(17.269*(tw-273.16)/(tw-35.86));
    end
else
    for k=1:3
        etw=6.1078*exp(21.875*(tw-273.16)/(tw-7.66));
        rtw=0.622*etw/(p(i,)-etw);
        et=6.1078*exp(21.875*(T-273.16)/(T-7.66));
        rt=0.622*et/(p(i,)-et);
        ftw=(T-tw)*(1000.+rtw*4186.)-2500000.*(rtw-rt);
        f11=21.875*(273.16-21.875)*rtw/((tw-7.66)^2*(1.-x));
        f12=2500000.+4186*(tw-T);
        f1=f11*f12;
        f2=1000.+rtw*4186.;
        dtw=ftw/(f1+f2);
        tw=tw+dtw;
        etw1=6.1078*exp(21.875*(tw-273.16)/(tw-7.66));
    end
end
e=H(i,)*etw1*0.01;
eT(i,)=e/T;
eTT(i,)=e/(T^2);
end
neT=AT1*eT;
xeT=Q1*neT;
veT=A1*xeT-eT;
veTE=veT';
eTeT=veTE*veT;
moeT=sqrt(eTeT/(m-8));
C=[xeT sqrt(diag(Q1))*moeT];
% e/T bilinmeyenlerinin istatistik testi
disp('e/T bilinmeyenlerinin istatistik testi')
for i=1:8
    if abs(xeT(i))>tx*sqrt(Q1(i,i))*moeT
        istanaliz=[int2str(i) '.bilinmeyen anlamlı ']
    end
end

```

```

elseif abs(xeT(i))<tx*sqrt(Q1(i,i))*moeT
    istanaliz=[int2str(i) 'bilinmeyen anlamlı degil']
end
end
neTT=AT1*eTT;
xeTT=Q1*neTT;
veTT=A1*xeTT-eTT;
veTTe=veTT';
vveTT=veTTe*veTT;
moeTT=sqrt(vveTT/(m-8));
% e/T2 bilinmeyenlerinin istatistik testi
disp('e/T2 bilinmeyenlerinin istatistik testi')
for i=1:8
    if abs(xeTT(i))>tx*sqrt(Q1(i,i))*moeTT
        istanaliz=[int2str(i) 'bilinmeyen anlamlı']
    elseif abs(xeTT(i))<tx*sqrt(Q1(i,i))*moeTT
        istanaliz=[int2str(i) 'bilinmeyen anlamlı degil']
    end
end
dh=(h(m)-h(1))/1000.;
meT1=xeT(1)*dh;
meT2=xeT(2)*(dh^2)/2.;
meT3=xeT(3)*(dh^3)/3.;
meT4=xeT(4)*(dh^4)/4.;
meT5=xeT(5)*(dh^5)/5.;
meT6=xeT(6)*(dh^6)/6.;
meT7=xeT(7)*(dh^7)/7.;
meT8=xeT(8)*(dh^8)/8.;
meT=meT1+meT2+meT3+meT4+meT5+meT6+meT7+meT8;
neTT=AT1*eTT;
xeTT=Q1*neTT;
veTT=A1*xeTT-eTT;
veTTe=veTT';
vveTT=veTTe*veTT;
moeTTT=sqrt(vveTT/(m-8));
meTT1=xeTT(1)*dh;
meTT2=xeTT(2)*dh^2/2.;
meTT3=xeTT(3)*dh^3/3.;
meTT4=xeTT(4)*dh^4/4.;
meTT5=xeTT(5)*dh^5/5.;
meTT6=xeTT(6)*dh^6/6.;
meTT7=xeTT(7)*dh^7/7.;
meTT8=xeTT(8)*dh^8/8.;
meTT=meTT1+meTT2+meTT3+meTT4+meTT5+meTT6+meTT7+meTT8;
% Tm ağırlıklı ortalama sıcaklık, K
Tm=meT/meTT;
% ZWD ıslak zenit gecikmesi, mm
ZWD=meT*22.1+meTT*377600.;
% Toplam ve hidrostatik zenit gecikmesi, mm
feenh=1.-(0.00266*cosd(2*sten))-(0.00028*styuk/1000.0);

```

```

ZHD=2.2779*p(1)/feenh;
ZTD=ZHD+WZD; % mm
% Q faktörü
Q=ZWD/PW;
DOY=date2doy(ay,gun);
disp('DOY-z Ts(K) mot Tm(K) ZWD(mm) ZHD(mm) ZTD(mm) PW(mm) Q h')
disp('=====')
E=[DOY z Ts mot Tm ZWD ZHD ZTD PW Q h(end)];
fprintf('%2.0f-%1.0f %8.4f %6.4f %6.4f %6.1f %9.1f %9.1f %6.4f %6.4f %6.0f\n',E)

```



## EK B: Küresel Harmonik Analizi MATLAB Kodu

```
disp('*****')
disp('*** HARMONİK ANALİZ, ILKE DENİZ ***')
disp('*** 2013, ZONGULDAK ***')
disp('*****')
% küresel harmonik fonksiyonlarla sıcaklık, basınç ve nemlilik modellemesi
% 10 Temmuz 2010 saat 1.00 daki değerler
datam=[17015 41.08333 31.16667 10. 30.5 1009.3 78.3;
 17050 41.68333 26.55000 51.2 32.0 1005.4 53.2;
 17054 41.15000 27.81667 183.0 31.1 989.8 55.9;
 17066 40.76667 29.93333 76.0 32.2 1001.4 56.3;
 17067 40.73333 29.80000 18.4 29.9 1008.1 68.9;
 17072 40.83333 31.16667 145.7 32.2 993.2 58.4;
 17112 40.13333 26.40000 5.5 31.6 1010.8 58.3;
 17114 40.31667 27.98333 63.0 29.4 1003.5 55.6;
 17116 40.21667 29.00000 100.3 31.3 998.5 62.6;
 17120 40.15000 29.98333 539.2 32.2 949.1 47.0;
 17145 39.60000 27.01667 20.7 32.7 1007.4 55.9;
 17155 39.41667 29.96667 969.3 37.3 903.4 19.9;
 17175 39.31667 26.70000 3.6 30.4 1009.2 61.9;
 17608 41.25000 26.68333 51.7 31.8 1005.2 56.3];
nno=datam(:,1);
em=datam(:,2); %em;modellemede enlem
H=datam(:,4); %H ortometrik yükseklik
eb=datam(:,3); %eb;modellemede boylam
Ts=datam(:,5); %Ts sıcaklık
Ps=datam(:,6); %Ps basınç
nem=datam(:,7); %nem nemlilik
r=1.; %r yarıçap
%datak kontrol veya enterpole edilecek noktalara ilişkin veriler
datak=[17631 41.40000 27.35000 46.0 32.0 1005.6 52.9
 17069 40.76667 30.40000 30.43 33.3 1006.3 48.1
 17670 40.08333 29.51667 280.00 32.1 977.3 56.9];
bk=datak(:,3); %bk kontrol noktaları boylamı
tkk=datak(:,2); %tkk kontrol noktaları enlemi
Hk=datak(:,4); %Hk kontrol noktaları yüksekliği
Tsk=datak(:,5); %Tsk kontrol noktaları sıcaklığı
Psk=datak(:,6); %Psk kontrol noktaları basıncı
Nemk=datak(:,7); %Nemk kontrol noktaları nemi
n=size(datam);
m=n(1,1);%ölçü sayısı
format short
% ölçülerin geoide indirgenmesi
for i=1:m
  Tr(i,1)=Ts(i,1)+0.0065*H(i,1);
  Pr(i,1)=Ps(i,1)*(1+0.0000226*H(i,1))^5.225;
  Hs(i,1)=nem(i,1)*exp(0.0006396*H(i,1));
end
```

% İki değişkenli polinom ile enterpolasyon

FIO=39.0; % FIO test alanının ortalama enlemi

LO=26.0; % LO test alanının ortalama boylamı

Kk=1.57;

for i=1:m

x(i,:)=(em(i,:)-FIO)\*Kk;

y(i,:)=(eb(i,:)-LO)\*Kk;

A0(i,:)=1.;

A1(i,:)=x(i,:);

A2(i,:)=y(i,:);

A3(i,:)=x(i,:)^2;

A4(i,:)=x(i,:)\*y(i,:);

A5(i,:)=y(i,:)^2;

A6(i,:)=x(i,:)^3;

A7(i,:)=(x(i,:)^2)\*y(i,:);

A8(i,:)=x(i,:)\*y(i,:)^2;

A9(i,:)=y(i,:)^3;

A10(i,:)=x(i,:)^4;

A11(i,:)=(x(i,:)^3)\*y(i,:);

A12(i,:)=(x(i,:)^2)\*(y(i,:)^2);

A13(i,:)=x(i,:)\*y(i,:)^3;

A14(i,:)=y(i,:)^4;

end

% D dizayn matrisi

D=[A0 A1 A2 A3 A4 A5 A6];

d=size(D);

dd=d(1,2);

DT=D.;

DTD=DT\*D;

DN=inv(DTD);

% sıcaklık modellemesi

DTt=DT\*Tr;

DXt=DN\*DTt;

DVt=D\*DXt-Tr;

DVtV=DVt.;

DVVt=DVtV\*DVt;

MOt=sqrt(DVVt/(m-dd));

% basınç modellemesi

DTp=DT\*Pr;

DXp=DN\*DTp;

DVp=D\*DXp-Pr;

DVpV=DVp.;

DVVp=DVpV\*DVp;

MOp=sqrt(DVVp/(m-dd));

% nem modellemesi

DTn=DT\*Hs;

DXn=DN\*DTn;

DVn=D\*DXn-Hs;

DVnV=DVn.;

DVVn=DVnV\*DVn;

```

MOn=sqrt(DVVn/(m-dd));
% sıcaklık ölçülerinin uyuşumsuzluk testi
for i=1:m
    if abs(DVt(i))>3.0*MOt
        NNO=nno(i);
        [int2str(NNO) 'noktasında sıcaklık uyuşumsuz']
    end
end
% basınç ölçülerinin uyuşumsuzluk testi
for i=1:m
    if abs(DVp(i))>3.0*MOp
        NN1=nno(i);
        [int2str(NN1) 'noktasında basınç uyuşumsuz']
    end
end
% nem ölçülerinin uyuşumsuzluk testi
for i=1:m
    if abs(DVn(i))>3.0*MOn
        NN2=nno(i);
        [int2str(NN2) 'noktasında nem uyuşumsuz']
    end
end
% bilinmeyenlerin istatistik analizi
sol=0.90;
sed=m-dd;
tx=tinv(sol,sed);
for i=1:dd
    if abs(DXt(i))>tx*sqrt(DN(i,i))*MOt
        tpolian= [int2str(i) 'bil sig' ];
    elseif abs(DXt(i))<tx*sqrt(DN(i,i))*MOt
        tpolian=[int2str(i) 'bil sig değil'];
    end
end
for i=1:dd
    if abs(DXp(i))>tx*sqrt(DN(i,i))*MOp
        ppolian=[int2str(i) 'bil sig'];
    elseif abs(DXp(i))<tx*sqrt(DN(i,i))*MOp
        ppolian=[int2str(i) 'bil sig değil'];
    end
end
for i=1:dd
    if abs(DXn(i))>tx*sqrt(DN(i,i))*MOn
        npolian=[int2str(i) 'bil sig'];
    elseif abs(DXn(i))<tx*sqrt(DN(i,i))*MOn
        npolian=[int2str(i) 'bil sig değil'];
    end
end
%harmonik katsayıların hesabı
for i=1:m
    v=(90.-em(i,:));

```

```

t=cosd(v);
b=eb(i,:);
a00(i,:)=1.;
a10(i,:)=t*r;
a11(i,:)=(1-t^2)^0.5*cosd(b)*r;
b11(i,:)=(1-t^2)^0.5*sind(b)*r;
a20(i,:)=0.5*(3*t^2-1)*r^2;
a21(i,:)=3*(1-t^2)^0.5*t*cosd(b)*r^2;
b21(i,:)=3*(1-t^2)^0.5*t*sind(b)*r^2;
a22(i,:)=3*(1-t^2)*cosd(2*b)*r^2;
b22(i,:)=3*(1-t^2)*sind(2*b)*r^2;
a30(i,:)=0.5*t*(5*t^2-3)*r^3;
a31(i,:)=1.5*(1-t^2)^0.5*cosd(b)*r^3;
b31(i,:)=1.5*(1-t^2)^0.5*sind(b)*r^3;
a32(i,:)=15*(1-t^2)*t*cosd(2*b)*r^3;
b32(i,:)=15*(1-t^2)*t*sind(2*b)*r^3;
a33(i,:)=15*(1-t^2)^1.5*cosd(3*b)*r^3;
b33(i,:)=15*(1-t^2)^1.5*sind(3*b)*r^3;
a40(i,:)=0.125*(35*t^4-30*t^2+3)*r^4;
a41(i,:)=2.5*(1-t^2)^0.5*t*(7*t^2-3)*sind(b)*r^4;
b41(i,:)=2.5*(1-t^2)^0.5*t*(7*t^2-3)*cosd(b)*r^4;
a42(i,:)=7.5*(1-t^2)*(7*t^2-1)*cosd(2*b)*r^4;
b42(i,:)=7.5*(1-t^2)*(7*t^2-1)*sind(2*b)*r^4;
a43(i,:)=105*(1-t^2)^1.5*t*cosd(3*b)*r^4;
b43(i,:)=105*(1-t^2)^1.5*t*sind(3*b)*r^4;
a44(i,:)=105*(1-t^2)^2*cosd(4*b)*r^4;
b44(i,:)=105*(1-t^2)^2*sind(4*b)*r^4;
a50(i,:)=0.125*t*(63*t^4-70*t^2+15)*r^5;
a51(i,:)=1.875*(1-t^2)^0.5*(21*t^4-14*t^2+1)*cosd(b)*r^5;
b51(i,:)=1.875*(1-t^2)^0.5*(21*t^4-14*t^2+1)*sind(b)*r^5;
a52(i,:)=52.5*(1-t^2)*t*(3*t^2-1)*cosd(2*b)*r^5;
b52(i,:)=52.5*(1-t^2)*t*(3*t^2-1)*sind(2*b)*r^5;
a53(i,:)=52.5*(1-t^2)^1.5*(9*t^2-1)*cosd(3*b)*r^5;
b53(i,:)=52.5*(1-t^2)^1.5*(9*t^2-1)*sind(3*b)*r^5;
a54(i,:)=945*(1-t^2)^2*t*sind(4*b)*r^5;
b54(i,:)=945*(1-t^2)^2*t*cosd(4*b)*r^5;
a55(i,:)=945*(1-t^2)^2.5*cosd(5*b)*r^5;
b55(i,:)=945*(1-t^2)^2.5*sind(5*b)*r^5;
end
% A dizayn matrisi
A=[a00 a10 a11 b11 a20 a21 b21 a22 b22 a30]
nn=size(A);
mm=nn(1,2);
AT=A.';
ATA=AT*A;
ATB=AT*Tr;
ATP=AT*Pr;
ATn=AT*Hs;
NI=eye(mm);
LAMDA=[1e+6 1000.0 10.0 1.0 0.00001 0.000001 1e-7 1e-8 1e-9 1e-10 1e-12];

```



```

kk=size(LAMDA);
k=kk(1,2);
for i=1:k
    LAMNI=LAMDA(:,i)*NI;
    Q=(ATA+LAMNI);
    N=inv(Q);
    XLAMDA=N*ATn;
    V=A*XLAMDA-Hs;
    VT=V.';
    VV=VT*V;
    MO=sqrt(VV/(m-mm));
end
LAMNI1=(1e-12)*NI;
QL=(ATA+LAMNI1);
N=inv(QL);
% XTLAM sıcaklık modeli bilinmeyenleri
XTLAM=N*ATB;
nmb=size(XTLAM);
% XPLAM basınç modeli bilinmeyenleri
XPLAM=N*ATP;
Vt=A*XTLAM-Tr;
VtT=Vt.';
VVt=VtT*Vt;
% XHLAM nem modeli bilinmeyenleri
XHLAM=N*ATn;
Vn=A*XHLAM-Hs;
Vtn=Vn.';
VVn=Vtn*Vn;
% moT sıcaklık birim ölçünün karesel ortalama hatası
moT=sqrt(VVt/(m-mm))
Vp=A*XPLAM-Pr;
VpT=Vp.';
VVp=VpT*Vp;
% moP basınç birim ölçünün karesel ortalama hatası
moP=sqrt(VVp/(m-mm))
% moH nem birim ölçünün karesel ortalama hatası
moH=sqrt(VVn/(m-mm))
% kontrol noktalarında sıcaklık, basınç ve nemlilik enterpolasyonu
nk=size(datak);
mk=nk(1,1);
for i=1:mk
    tk=cosd(90.-tkk(i,:));
    bkk=bk(i,:);
    ak00(i,:)=1.;
    ak10(i,:)=tk*r;
    ak11(i,:)=(1-tk^2)^0.5*cosd(bkk)*r;
    bk11(i,:)=(1-tk^2)^0.5*sind(bkk)*r;
    ak20(i,:)=0.5*(3*tk^2-1)*r^2;
    ak21(i,:)=3*(1-tk^2)^0.5*tk*cosd(bkk)*r^2;
    bk21(i,:)=3*(1-tk^2)^0.5*tk*sind(bkk)*r^2;

```

```

ak22(i,:)=3*(1-tk^2)*cosd(2*bkk)*r^2;
bk22(i,:)=3*(1-tk^2)*sind(2*bkk)*r^2;
ak30(i,:)=0.5*tk*(5*tk^2-3)*r^3;
ak31(i,:)=1.5*(1-tk^2)^0.5*cosd(bkk)*r^3;
bk31(i,:)=1.5*(1-tk^2)*0.5*sind(bkk)*r^3;
ak32(i,:)=15*(1-tk^2)*tk*cosd(2*bkk)*r^3;
bk32(i,:)=15*(1-tk^2)*tk*sind(2*bkk)*r^3;
ak33(i,:)=15*(1-tk^2)^1.5*cosd(3*bkk)*r^3;
bk33(i,:)=15*(1-tk^2)^1.5*sind(3*bk)*r^3;
ak40(i,:)=0.125*(35*tk^4-30*tk^2+3)*r^4;
ak41(i,:)=2.5*(1-tk^2)^0.5*tk*(7*tk^2-3)*sind(bkk)*r^4;
bk41(i,:)=2.5*(1-tk^2)^0.5*tk*(7*tk^2-3)*cosd(bkk)*r^4;
ak42(i,:)=7.5*(1-tk^2)*(7*tk^2-1)*cosd(2*bkk)*r^4;
bk42(i,:)=7.5*(1-tk^2)*(7*tk^2-1)*sind(2*bkk)*r^4;
ak43(i,:)=105*(1-tk^2)^1.5*tk*cosd(3*bkk)*r^4;
bk43(i,:)=105*(1-tk^2)^1.5*tk*sind(3*bkk)*r^4;
ak44(i,:)=105*(1-tk^2)^2*cosd(4*bkk)*r^4;
bk44(i,:)=105*(1-tk^2)^2*sind(4*bkk)*r^4;
ak50(i,:)=0.125*tk*(63*tk^4-70*tk^2+15)*r^5;
ak51(i,:)=1.875*(1-tk^2)^0.5*(21*tk^4-14*tk^2+1)*cosd(bkk)*r^5;
bk51(i,:)=1.875*(1-tk^2)^0.5*(21*tk^4-14*tk^2+1)*sind(bkk)*r^5;
ak52(i,:)=52.5*(1-tk^2)*tk*(3*tk^2-1)*cosd(2*bkk)*r^5;
bk52(i,:)=52.5*(1-tk^2)*tk*(3*tk^2-1)*sind(2*bkk)*r^5;
ak53(i,:)=52.5*(1-tk^2)^1.5*(9*tk^2-1)*cosd(3*bkk)*r^5;
bk53(i,:)=52.5*(1-tk^2)^1.5*(9*tk^2-1)*sind(3*bkk)*r^5;
ak54(i,:)=945*(1-tk^2)^2*tk*sind(4*bkk)*r^5;
bk54(i,:)=945*(1-tk^2)^2*tk*cosd(4*bkk)*r^5;
ak55(i,:)=945*(1-tk^2)^2.5*cosd(5*bkk)*r^5;
bk55(i,:)=945*(1-tk^2)^2.5*sind(5*bkk)*r^5;
end
KK=zeros(1,mm);
% KK kontrol noktaları için interpolasyon matrisi
KK=[ ak00 ak10 ak11 bk11 ak20 ak21 bk21 ak22 bk22 ak30];
nnn=size(KK);
TK=KK*XTLAM % TK kontrol noktasının enterpole edilmiş sıcaklığı
PK=KK*XPLAM % PK kontrol noktasının enterpole edilmiş basıncı
HK=KK*XHLAM % HK kontrol noktasının enterpole edilmiş nemi
% ölçülerin istasyon yüksekliğine çıkarılması
for i=1:mk
    Tks(i,:)=TK(i,1)-0.0065*Hk(i,1);
    Pks(i,:)=PK(i,1)/(1+0.0000226*Hk(i,1))^5.225;
    Hks(i,:)=HK(i,1)/2.71828^(0.0006396*Hk(i,1));
end
for i=1:mk
farkt(i,1)=Tsk(i,:)-Tks(i,:); % farkt modelden bulunan ile istasyon sıcaklık farkı, derece
farkp(i,1)=Psk(i,:)-Pks(i,:); % farkp modelden bulunan ile istasyon basıncı farkı, mbar
farkn(i,1)=Nemk(i,:)-Hks(i,:); % farkN modelden bulunan ile istasyon nem farkı, %
end
Farklar=[farkt farkp farkn]

```

## EK C: PWV Hesabı İçin MATLAB Kodu

```
disp('*****')
disp('***  PWV HESABI, ILKE DENİZ  ***')
disp('***  2013, ZONGULDAK  ***')
disp('*****')
[file path] = uigetfile('.xlsx','Bir dosya seciniz');
data=xlsread([path '/' file],4);
PS=data(:,2);%basınç
TS=data(:,3);%sıcaklık
HS=data(:,4);%nem
MM=data(:,5);%ZTD
a=(TS.*7.5);
b=(TS+237.3);
c=a./b;
for i=1:size(PS,1);
cc(i)=10^c(i);
end
cc1=cc';
d=HS./100;
ES=d.*cc1.*6.1078;

% Saastamoinen Kuru&Islak Hesabı
KTS=TS+273.15;
e=0.002277;
f=0.155471*ES;
kuru=e*(PS-f);
bwet=(MM-kuru); % ZWD
% ZWD'den PW Hesabı
TM=(48.55+(0.80*KTS));
j=377600./TM;
k=64.8+j;
RW=461.524;
l=10^-5;
KAU=k*RW*l;
PWV=(bwet./KAU)*1000;
```



## ÖZGEÇMİŞ

1982'de İstanbul'da doğdu; ilk ve orta öğrenimini İstanbul'da tamamladı; 2000-2004 yıllarında YTÜ, İnşaat Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü'nde Lisans programını bitirdi; 2004-2005 yılında Boğaziçi Üniversitesi, Yabancı Diller Yüksekokulu'nda İngilizce Hazırlık öğrenimi gördü; 2005-2007 yıllarında Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Jeodezi Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans programını tamamladı; 2008 İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora çalışmasına başladı; 2011 yılında ZKÜ, Mühendislik Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak göreve başladı; bu tarihten sonraki doktora çalışmalarına BEÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda devam etti.

### **ADRES BİLGİLERİ:**

Adres: Bülent Ecevit Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi  
Geomatik Mühendisliği Bölümü  
67100, ZONGULDAK

Tel: (+90) 372 291 14 00

E-posta: ideniz@beun.edu.tr