

**TÜRKİYE ÜZERİNDE
TOPLAM ELEKTRON İÇERİĞİ (TEİ) İÇİN
UZAY-ZAMAN RASSAL ALAN KESTİRİMİ**

**ESTIMATION OF SPACE-TIME RANDOM FIELD
FOR TOTAL ELECTRON CONTENT (TEC)
OVER TURKEY**

MUHAMMET NECAT DEVİREN

**Prof. Dr. Feza Arıkan
Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim - Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2013

MUHAMMET NECAT DEVİREN'in hazırladığı **Türkiye Üzerinde Toplam Elektron İçeriği (TEİ) İçin Uzay-Zaman Rassal Alan Kestirimi** adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan

(Prof. Dr. Gülbin Dural)

Danışman

(Prof. Dr. Feza Arıkan)

Üye

(Doç. Dr. Cenk Toker)

Üye

(Yrd. Doç. Dr. Yakup Sabri Özkazanç)

Üye

(Yrd. Doç. Dr. Umut Sezen)

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

... / ... / 20...

Muhammet Necat DEVİREN

ÖZET

TÜRKİYE ÜZERİNDE TOPLAM ELEKTRON İÇERİĞİ (TEİ) İÇİN UZAY-ZAMAN RASSAL ALAN KESTİRİMİ

MUHAMMET NECAT DEVİREN

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Feza Arıkan

Temmuz 2013, 82 sayfa

İyonküre, sivil ve askeri Kısa Dalga (KD) haberleşmesi, uydu haberleşmesi ve uydu tabanlı seyir, gözlem ve konumlama sistemlerinde çok önemli yere sahip olan bir atmosfer tabakasıdır. İyonküre güneşin etkinliği, jeomanyetik, yerçekimsel ve sismik hareketlilikle değişir. İyonkürenin yapısının anlaşılması, iyonküredeki değişimlerin sürekli gözlemlenmesi ve modellenmesi açısından önemlidir. Bu durum iyonküre uzaktan algılama ve gözlem sistemlerinin sürekli çalışmasını ve bilgi toplanmasını zorunlu kılar. İyonküre katmanının karakteristiğini ifade eden en önemli parametrelere biri Toplam Elektron İçeriği (TEİ)'dir. İyonkürenin yapısının anlaşılması ve TEİ kestirimi için fazla maliyet gerektirmeyen ve en yaygın yöntem olan Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS) işaretleri kullanılır. Bu çalışma kapsamında Türkiye ve Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti (KKTC) üzerine düzgün dağılmış Türkiye Ulusal Sabit GPS Ağı (TUSAGA-Aktif) alıcıları kullanılmıştır. Herbir alıcıdan fiziksel nedenlerden ötürü her an veri alınamadığından, öncelikle uzay-zaman aradeğerleme yöntemi ile eksik veriye sahip istasyonların TEİ değerlerinin kestirilmesi amaçlanmıştır. Daha sonra konumda ve zamanda değişim gösteren iyonküre, bir yönseme fonksiyonu ve bir rassal kalıntı fonksiyonunun toplamı şeklinde yazılarak uzay-zaman rassal fonksiyonu olarak modellenmiştir. Türkiye iyonküre yönseme modelinin parametreleri kestirilerek, Türkiye yönseme modelinin haritaları elde edilmiştir. Çalışmanın devamında elde edilen yönseme değerleri kullanılarak, kalıntı fonksiyonundan teorik Yarı Değişinti Serimi (YDS) hesaplanmıştır. Teorik YDS fonksiyonu kullanılarak Türkiye Krigleme haritaları otomatik olarak çıkarılmış ve güneş merkezli koordinat

dönüşümü yapılarak, TEİ kestirimleri Tekil Değer Ayrışımı (TDA) Yöntemi ile incelenmiştir. Sonuç olarak Türkiye ve KKTC üzerinde orta enlem bölgesel bir YKS alıcı ağı ile otomatik, yakın gerçek zamanlı, yüksek zaman ve konum çözünürlüğünde TEİ kestirimlerinin rassal fonksiyon gerçeklemeleri elde edilmiş ve TDA ile bu rassal fonksiyonun incelenmesi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İyonküre, Toplam Elektron İçeriği (TEİ), Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS), Yönseme, Yarı Değişinti Serimi (YDS), Krigleme, Tekil Değer Ayrışımı (TDA)

ABSTRACT

ESTIMATION OF SPACE-TIME RANDOM FIELD FOR TOTAL ELECTRON CONTENT (TEC) OVER TURKEY

MUHAMMET NECAT DEVİREN

**Master of Science, Department of
Electrical and Electronics Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Feza Arıkan

July 2013, 82 pages

Ionosphere is an important layer of atmosphere for HF and satellite communications, space-based navigation, positioning and guidance systems. Solar, geomagnetic, gravitational and seismic activities cause variations in ionosphere. It is important to understand the structure of ionosphere for modeling and monitoring the variability of the ionosphere. Therefore, the remote sensing and monitoring systems must be operated continuously. Total Electron Content (TEC) is one of the most important parameters that defines the structure of ionosphere. Global Positioning System (GPS), with the network of the world-wide receivers, provides cost-effective solutions in estimating TEC and also, in monitoring the variability of the ionosphere. In this thesis, TEC values, which obtained from Turkish National Permanent GPS Network (TNPNGN-Active) CORS which is distributed uniformly over Turkey and North Cyprus Turkish Republic, are used. Due to various physical or operational disturbances, GPS-TEC can be disrupted for a certain period during the day. Thus, it is an important task to interpolate the missing TEC values with spatio-temporal interpolation method. The geophysical processes can be modeled using random fields due to their variability in space and time. The random field of TEC can be separated into a trend structure and a residual function. Trend parameters of ionosphere are estimated and trend maps are obtained over Turkey. Then, the theoretical semi-variogram function is computed from the residual function which is defined as the difference of random field and trend of TEC. The theoretical semivariogram is used

in the computation of weights of Kriging equation with the assumption of the linear trend. Universal Kriging maps are obtained automatic with high spatial resolution for any desired time interval and TEC distributions are investigated by Singular Value Decomposition (SVD) in a sun-oriented coordinate system. Consequently, near-real time automatical regional maps of TEC are obtained with high space and time resolution over Turkey and North Cyprus Turkish Republic, and the spatio-temporal behavior of TEC random field is investigated using SVD analysis.

Keywords: Ionosphere, Total Electron Content (TEC), Global Positioning System (GPS), Trend, Semivariogram, Kriging, Singular Value Decomposition (SVD)

TEŞEKKÜR

Bu tezin oluŐmasında değerli fikir ve yardımlarından öte, bir anne edasıyla her zaman yanımda olan ve yol gösteren aynı zamanda da mükemmel bir eğitmen olan Sayın Prof. Dr. Feza Arıkan'a teşekkür ederim.

Maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve beni daima destekleyen anneme, babama ve kardeŐlerime teşekkür ederim.

Değerli görüŐ ve önerileriyle bu zorlu süreçte her zaman yolumuzu aydınlatan Sayın Prof. Dr. Orhan Arıkan'a teşekkür ederim.

Bilgi ve deneyimlerini paylaşan değerli jüri üyelerine teşekkür ederim.

Her zaman yanımda bulunan değerli arkadaşlarım Burak Ünsal, Hızır Dilmaç ve Özlem Kınık'a teşekkür ederim.

Sağladıkları gülyüzlü ortam, destek ve yardımları için tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Her zaman bir umut olduğunu gösteren güzel ölkemin güzel insanlarına teşekkür ederim.

Bu tez kapsamındaki çalışmalar TUBİTAK 109E055, 110E296 ve 112E568 projeleri tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER	viii
ÇİZELGELER	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
SÖZLÜK DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. UZAY-ZAMAN ARADEĞERLEME YÖNTEMİ İLE TEİ KESTİRİMİ	6
2.1. Uzaysal Aradeğerleme	6
2.2. Uzay-Zaman Aradeğerleme Yöntemi	8
2.3. Komşulukların Belirlenmesi	9
2.4. Sistem Başarımının Ölçülmesi	10
2.5. Bulgular	11
3. TEİ KESTİRİMLERİNİN RASSAL FONKSİYON GÖSTERİMİ	26
3.1. Doğrusal Yönseme Fonksiyonu	26
3.2. Veri Setinin Oluşturulması	28
3.2.1. Izgara Yapısı ve İndeksleme	28
3.2.2. Uzaklığın Karesinin Tersine ile Ağırlıklandırma	30
3.3. Bulgular	31
4. KRİGLEME	40
4.1. Yarı Değişinti Serimi (YDS)	40
4.2. Ortalamalı Krigleme	42
4.3. Ortalamasız Krigleme	43
4.4. Evrensel Krigleme	43
4.5. Bulgular	46

5. TDA YÖNTEMİ İLE TEİ ANALİZİ	56
5.1. Bulgular	57
6. SONUÇLAR	65
KAYNAKLAR	68
EKLER	70
ÖZGEÇMİŞ	81

ŞEKİLLER

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Elektron yoğunluğunun yükseklik ile değişimi.	2
Şekil 1.2. TUSAGA-Aktif YKS alıcı istasyonlarının Türkiye ve KKTC üzerindeki dağılımı.	3
Şekil 2.1. 10 Ağustos 2010 tarihinde yenc istasyonun TEİ değeri ve uzaysal aradeğerleme yöntemi ile elde edilmiş TEİ kestirimleri.....	13
Şekil 2.2. 0-80 km aralığındaki tüm komşuluklardan elde edilen α katsayıları ve OYF grafikleri: a) 2009 yılı α katsayıları, b) 2009 yılı deneysel dağılımı, c) 2010 yılı α katsayıları, d) 2010 yılı deneysel dağılımı, e) 2011 yılı α katsayıları, f) 2011 yılı deneysel dağılımı, g) 2010 ve 2011 yılları α katsayıları, h) 2010 ve 2011 yıllarının ortak deneysel dağılımı.	15
Şekil 2.3. 80-100 km aralığındaki tüm komşuluklardan elde edilen α katsayıları ve OYF grafikleri: a) 2009 yılı α katsayıları, b) 2009 yılı deneysel dağılımı, c) 2010 yılı α katsayıları, d) 2010 yılı deneysel dağılımı, e) 2011 yılı α katsayıları, f) 2011 yılı deneysel dağılımı, g) 2010 ve 2011 yılları α katsayıları, h) 2010 ve 2011 yıllarının ortak deneysel dağılımı.	16
Şekil 2.4. 100-120 km aralığındaki tüm komşuluklardan elde edilen α katsayıları ve OYF grafikleri: a) 2009 yılı α katsayıları, b) 2009 yılı deneysel dağılımı, c) 2010 yılı α katsayıları, d) 2010 yılı deneysel dağılımı, e) 2011 yılı α katsayıları, f) 2011 yılı deneysel dağılımı, g) 2010 ve 2011 yılları α katsayıları, h) 2010 ve 2011 yıllarının ortak deneysel dağılımı.	17
Şekil 2.5. 120-150 km aralığındaki tüm komşuluklardan elde edilen α katsayıları ve OYF grafikleri: a) 2009 yılı α katsayıları, b) 2009 yılı deneysel dağılımı, c) 2010 yılı α katsayıları, d) 2010 yılı deneysel dağılımı, e) 2011 yılı α katsayıları, f) 2011 yılı deneysel dağılımı, g) 2010 ve 2011 yılları α katsayıları, h) 2010 ve 2011 yıllarının ortak deneysel dağılımı.	18
Şekil 2.6. a) Sistem başarımlar grafiği, b) anrk istasyonunun 06 Ekim 2010 tarihindeki TEİ değeri ile bir gün bir komşuluk kestirimlerinin karşılaştırılması.	21

Şekil 2.7. game istasyonunun farklı β değerleriyle elde edilen TEİ kestirimleri; 31 Mart 2011, a) $\beta=0.1$, c) $\beta=0.35$, e) $\beta=0.5$, g) $\beta=1$; 05 Ağustos 2011, b) $\beta=0.1$, d) $\beta=0.35$, f) $\beta=0.5$, h) $\beta=1$	22
Şekil 2.8. Dört farklı zaman için uzay-zaman aradeğerleme yapılırken seçilen g_k değerlerinin değişimi, a) 15 dakika, b) 1 saat, c) 3.5 saat, d) 20 saat.	23
Şekil 2.9. 31 Mart 2011 tarihinde game istasyonunun TEİ değeri ve üç farklı fonksiyon ile TEİ kestirimleri, a) 15 dakika, b) 1 saat, c) 3.5 saat, d) 20 saat.	24
Şekil 2.10. 05 Ağustos 2011 tarihinde game istasyonunun TEİ değeri ve üç farklı fonksiyon ile TEİ kestirimleri, a) 15 dakika, b) 1 saat, c) 3.5 saat, d) 20 saat.	25
Şekil 3.1. Izgara yapısı, (o) : Ölçüm noktaları, (·) : Izgara noktaları.	28
Şekil 3.2. Mayıs 2009 - Mayıs 2012 tarihleri arasında Türkiye iyonküresi ve yönsemesi arasındaki düzgelenmiş yüzde hata grafikleri, a) 0400 GS, b) 1000 GS, c) 1600 GS, d) 2200 GS.	32
Şekil 3.3. 21 Mart 2011 tarihinde Türkiye TEİ haritaları, a) UKTA 1000 GS, b) UKTA 2200 GS, c) yönseme haritası 1000 GS, d) yönseme haritası 2200 GS, e) rassal kalıntı haritası 1000 GS, f) rassal kalıntı haritası 2200 GS.	33
Şekil 3.4. 28 Nisan 2011 tarihinde Türkiye TEİ haritaları, a) UKTA 1000 GS, b) UKTA 2200 GS, c) yönseme haritası 1000 GS, d) yönseme haritası 2200 GS, e) rassal kalıntı haritası 1000 GS, f) rassal kalıntı haritası 2200 GS.	34
Şekil 3.5. 05 Haziran 2011 tarihinde Türkiye TEİ haritaları, a) UKTA 1000 GS, b) UKTA 2200 GS, c) yönseme haritası 1000 GS, d) yönseme haritası 2200 GS, e) rassal kalıntı haritası 1000 GS, f) rassal kalıntı haritası 2200 GS.	35
Şekil 3.6. 21 Mart 2011 tarihinde Türkiye doğrusal yönseme yüzeyi parametre kestirimleri a) \hat{a}_1 , b) \hat{a}_2 , c) \hat{a}_3	36
Şekil 3.7. 05 Haziran 2011 tarihinde Türkiye doğrusal yönseme yüzeyi parametre kestirimleri a) \hat{a}_1 , b) \hat{a}_2 , c) \hat{a}_3	37
Şekil 3.8. 2011 yılının her günü için 1000 GS'de Türkiye doğrusal yönseme yüzeyi parametre kestirimleri a) \hat{a}_1 , b) \hat{a}_2 , c) \hat{a}_3	38

Şekil 3.9. Mayıs 2009 - Mayıs 2012 tarihleri arasında her gün için 1000 GS'de Türkiye doğrusal yönseme yüzeyi parametre kestirimleri a) \hat{a}_1 , b) \hat{a}_2 , c) \hat{a}_3	39
Şekil 4.1. Matern fonksiyonunun parametreleri değiştirilerek elde edilen YDS fonksiyonları, a) $a_m = 0.05$, $\sigma_m^2 = 1$, $d = 400$, b) $a_m = 0.05$, $\sigma_m^2 = 1$, $\nu = 1$, c) $a_m = 0.05$, $\nu = 1$, $d = 400$, d) $\sigma_m^2 = 1$, $\nu = 1$, $d = 400$	48
Şekil 4.2. 25 Ekim 2011 tarihinde deneysel YDS ve Matern uyarlama, a) J_1 maliyet fonksiyonu, 1000 GS, b) J_2 maliyet fonksiyonu, 1000 GS, c) J_1 maliyet fonksiyonu, 2200 GS, d) J_2 maliyet fonksiyonu, 2200 GS.	49
Şekil 4.3. 27 Mart 2011 tarihinde deneysel YDS ve Matern uyarlama, a) 0300 GS, c) 0900 GS, e) 1500 GS, g) 2100 GS, ve 25 Ekim 2011 tarihinde deneysel YDS ve Matern uyarlama, b) 0300 GS, d) 0900 GS, f) 1500 GS, h) 2100 GS.	50
Şekil 4.4. 25 Ekim 2011 tarihinde Matern parametrelerinin günlük değişimi, a) a_m , b) σ_m^2 , c) ν , d) d	51
Şekil 4.5. 21 Mart 2011 tarihinde deneysel YDS ve Matern uyarlama, a) 1000 GS, b) 2200 GS.	53
Şekil 4.6. 21 Mart 2011 tarihinde Türkiye TEİ haritaları, a) UKTA 1000 GS, b) UKTA 2200 GS, c) Krigleme haritası 1000 GS, d) Krigleme haritası 2200 GS.	53
Şekil 4.7. 28 Nisan 2011 tarihinde deneysel YDS ve Matern uyarlama, a) 1000 GS, b) 2200 GS.	54
Şekil 4.8. 28 Nisan 2011 tarihinde Türkiye TEİ haritaları, a) UKTA 1000 GS, b) UKTA 2200 GS, c) Krigleme haritası 1000 GS, d) Krigleme haritası 2200 GS.	54
Şekil 4.9. 05 Haziran 2011 tarihinde deneysel YDS ve Matern uyarlama, a) 1000 GS, b) 2200 GS.	55
Şekil 4.10. 05 Haziran 2011 tarihinde Türkiye TEİ haritaları, a) UKTA 1000 GS, b) UKTA 2200 GS, c) Krigleme haritası 1000 GS, d) Krigleme haritası 2200 GS.	55
Şekil 5.1. 28 Nisan 2011 tarihinde kartezyen koordinatlardan güneş eksenli koordinat sistemine dönüşüm, a) 0300 GS, b) 0900 GS, c) 1500 GS, d) 2100 GS.	58

Şekil 5.2. 28 Nisan 2011 tarihinde güneş eksenli koordinat sisteminde TEİ haritaları; Krigleme haritaları a) 0300 GS, c) 0900 GS, e) 1500 GS, g) 2100 GS; en yüksek enerjili tekil değer kullanılarak elde edilen geri çatma haritaları b) 0300 GS, d) 0900 GS, f) 1500 GS, h) 2100 GS.	59
Şekil 5.3. 21 Mart 2011 tarihinde güneş eksenli koordinat sisteminde TEİ haritaları; Krigleme Haritaları, a) 1000 GS, c) 2300 GS; en yüksek enerjili tekil değer kullanılarak elde edilen geri çatma haritaları, b) 1000 GS, d) 2300 GS.	62
Şekil 5.4. 05 Haziran 2011 tarihinde güneş eksenli koordinat sisteminde TEİ haritaları; Krigleme Haritaları, a) 1000 GS, c) 2300 GS; en yüksek enerjili tekil değer kullanılarak elde edilen geri çatma haritaları, b) 1000 GS, d) 2300 GS.	63
Şekil 5.5. 21 Mart 2011 tarihinde Türkiye TEİ haritaları; UKTA yöntemi ile, a) 1000 GS, b) 1800 GS; Krigleme Haritaları, c) 1000 GS, d) 1800 GS; en yüksek enerjili tekil değer kullanılarak elde edilen geri çatma haritaları, e) 1000 GS, f) 1800 GS.	64
Şekil .1. Jeodezik koordinatlardan kartezyen koordinatlara dönüşüm.	78
Şekil .2. Kartezyen koordinatlardan güneş eksenli koordinat sistemine dönüşüm.	79

ÇİZELGELER

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. yenc istasyonunun 10 Ağustos 2010 günü TEİ kestiriminde komşuluklarının ağırlıklandırıldığı katsayılar ve her bir komşuluğa olan uzaklığı	12
Çizelge 2.2. yenc istasyonunun 10 Ağustos 2010 günü TEİ kestirimi hata normları	13
Çizelge 2.3. 2009 yılı tüm komşulukların tek tek katkılarından kestirilen α katsayılarının OYF fonksiyonlarının ortalama değerleri ve standart sapmaları	19
Çizelge 2.4. 2010 yılı tüm komşulukların tek tek katkılarından kestirilen α katsayılarının OYF fonksiyonlarının ortalama değerleri ve standart sapmaları	19
Çizelge 2.5. 2011 yılı tüm komşulukların tek tek katkılarından kestirilen α katsayılarının OYF fonksiyonlarının ortalama değerleri ve standart sapmaları	19
Çizelge 2.6. 2010 ve 2011 yılları için tüm komşulukların tek tek katkılarından kestirilen α katsayılarının OYF fonksiyonlarının ortalama değerleri ve standart sapmaları	19
Çizelge 2.7. geme istasyonunun farklı β değerleriyle elde edilen TEİ kestirimleri düzgelenmiş hata tablosu	21
Çizelge 2.8. geme istasyonunun 31 Mart 2011 tarihinde TEİ kestirimleri hata normları	23
Çizelge 2.9. geme istasyonunun 05 Ağustos 2011 tarihinde TEİ kestirimleri hata normları	23
Çizelge 4.1. 25 Ekim 2011 tarihinde iki farklı maliyet fonksiyonu ile deneysel ve teorik YDS fonksiyonlarının ayrı ayrı karşılaştırılması	49
Çizelge 4.2. 25 Ekim 2011 tarihinde iki farklı maliyet fonksiyonu ile 150 km'den yakın ve uzak olan uzaklıkların deneysel ve teorik YDS fonksiyonlarının ayrı ayrı karşılaştırılması	49
Çizelge 4.3. Teorik ve deneysel YDS fonksiyonlarının düzgelenmiş hata fonksiyonu ile karşılaştırılması	51
Çizelge 5.1. 28 Nisan 2011 tarihinde TDA analiz sonucunda düzgelenmiş hata değerleri	60

Çizelge 5.2. 28 Nisan 2011 tarihinde TDA analiz sonucunda düzgelenmiş hata değerleri	61
Çizelge 5.3. 21 Mart 2011 ve 05 Haziran 2011 tarihlerinde TDA analiz sonucunda düzgelenmiş hata değerleri	62
Çizelge 5.4. 21 Mart 2011 tarihinde düzgelenmiş hata fonksiyonun ile UKTA yöntemi ve en yüksek enerjili tekil değer kullanılarak elde edilmiş geri çatma haritalarının Krigleme haritalarıyla olan farkı ..	63

SİMGELER VE KISALTMALAR

BLUE	Best Linear Unbiased Estimator
D-TEİ	Düzgünleştirilmiş Toplam Elektron İçeriği
GS	Greenwich Saati
HGK	Harita Genel Komutanlığı
KD	Kısa Dalga
KKTC	Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti
OYF	Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu
SKLD	Simetrik Kullback-Leibler Mesafesi
TDA	Tekil Değer Ayrışımı
TEİ	Toplam Elektron İçeriği
TUSAGA	Türkiye Ulusal Sabit GPS Ağı
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
UKTA	Uzaklığın Karesinin Tersine ile Ağırlıklandırma
YDS	Yarı Değişinti Serimi
YKS	Yerküresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System -GPS)

SÖZLÜK DİZİNİ

Aradeğerleme	: Interpolation
Beklenti	: Expectation
Birim Matris	: Identity Matrix
Değişinti	: Variance
Durağanlık	: Stationarity
Enaz Kareler	: Least Square
Eniyileme	: Optimization
Eniyi Olabilirlik	: Maximum Likelihood
Enküçükleme	: Minimization
Eşdeğişinti	: Covariance
Evrensel Krigleme	: Universal Kriging
Geniş Anlamda Durağanlık	: Wide Sense Stationarity
Greenwich Saati	: Universal Time
Güneş Lekesi Sayısı	: Sun Spot Number
Gürbüz	: Robust
İşaret	: Signal
Kalıntı	: Residual
Kobra Eğrisi	: Cubic spline
Köşegen Matris	: Diagonal Matrix
Külçe Değeri	: Nugget Effect
Leksikografik	: Lexicographical
Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu	: Probability Density Function
Ortalamalı Krigleme	: Simple Kriging
Ortalamasız Krigleme	: Ordinary Kriging
Parçacık Sürü Optimizasyonu	: Particle Swarm Optimization
Rassal	: Random
Simetrik Kullback-Leibler Mesafesi	: Symmetric Kullback-Leibler Distance
Tekil Değer Ayrışımı	: Singular Value Decomposition
Toplam Elektron İçeriği	: Total Electron Content

Uzaklığın Tersine ile Ağırlıklandırma	:	Inverse Distance Weighting
Üniter	:	Unitary
Yansız	:	Unbiased
Yapısal Uzaklık	:	Range
Yarı Değişinti Serimi	:	Semivariogram
Yerküresel Konumlama Sistemi	:	Global Positioning System
Yön Bağımsız	:	Isotropic
Yönseme	:	Trend

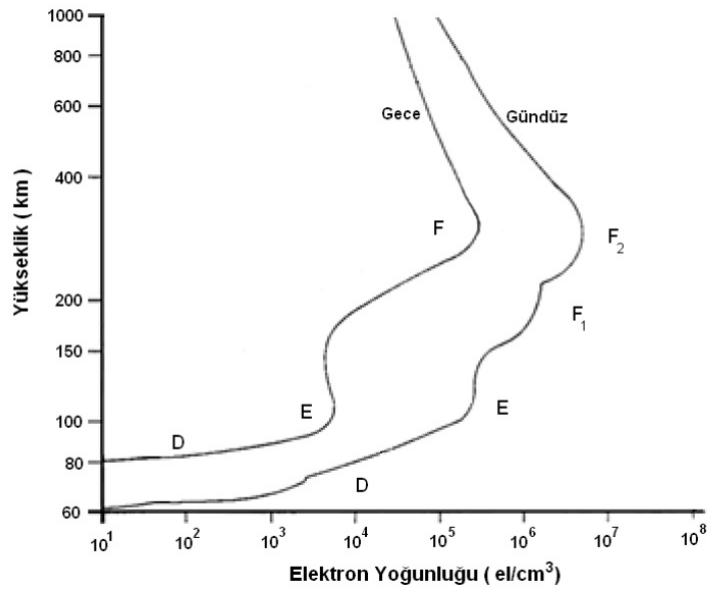
1. GİRİŞ

İyonküre, yeryüzünden yaklaşık 60 km ile 1100 km arasındaki yükseklikte yer alan, yüksek enerjili mor ötesi ve X-ışınlarının gaz atomlarının ve moleküllerinin son yörüngelerinde dolanan elektronları serbest hale geçirmesiyle oluşmuş nötr plazma katmanıdır [1]. Radyo dalgalarının yayılımını sağlayarak iletişim ortamı oluşturan bu atmosfer tabakası özellikle sivil ve askeri Kısa Dalga (KD) uygulamalarda radyo dalgalarını yansıtarak uzak bölgeler ile haberleşme sağlanması açısından önemli bir yere sahiptir. Güneş ışınımının iyonküre üzerinde büyük etkileri vardır. Şiddetli güneş ışınimleri iyonkürede serbest elektron miktarını arttırarak iyonkürenin plazma frekansının değişmesine yol açar. Plazma frekansındaki bu farklılık KD haberleşmesini sağlayan işaretlerin iyonkürenin farklı bir bölgesinden yansımaya neden olur böylece KD iletişimde kesintiler oluşur [2]. İyonküre uydu haberleşmesi için de büyük bir öneme sahiptir. Uydulardan yeryüzündeki alıcılara gönderilen işaretler iyonküre katmanında frekansın fonksiyonu olarak kırılmaya uğrar [3]. Bu durum uydu sistemleri için düzeltilmesi gereken temel hatalardan birini doğurur [4]. Bunların yanısıra son araştırmalar iyonkürenin elektron yoğunluğu ve sismik aktiviteler arasında bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur [5]. Sonuç olarak iyonküre tarafından etkilenen tüm bu sistemlerin etkilerinin incelenmesi için iyonküre katmanının yapısı anlaşılmalı ve bu katmandaki değişimler gözlemlenebilmelidir.

İyonkürenin radyo dalgalarına etkisi iyonkürede elektron yoğunluğundaki değişimler incelenerek anlaşılabilir. Güneş ışınimleri ise iyonkürede iyonlaşma miktarı üzerinde en büyük etkiye sahip enerji kaynağıdır. Güneş ışınımı ile taşınan enerji, elektronları moleküllerinden ayrılarak serbest hale geçirir. Bu enerji iyonkürenin her bölgesinde aynı olmadığından iyonlaşma iyonkürenin her bölgesinde de aynı değildir. İyonlaşmanın en yüksek seviyelere ulaştığı zaman dilimi, güneş ışınımının en yüksek olduğu, yerel saate göre 1200 civarlarıdır. Geceleri ise elektronları serbest halde tutabilecek büyük bir enerji kaynağı olmadığından elektron yoğunluğunda azalma gözlemlenir. Günlük değişimlerin yanısıra iyonkürede mevsimsel değişimler de meydana gelmektedir. Güneş lekeleri sayısı ve güneş patlamaları güneş ışınım seviyesini değiştirdiğinden ötürü iyonlaşmayı ve iyonküredeki serbest elektron miktarını önemli ölçüde etkiler [2].

İyonküre tabakası ekvatorial enlem, orta enlem ve yüksek enlem olmak üzere çoğ-

rafi olarak üç enlem bölgesinde incelenmektedir. Güneş ışınlarının en fazla etkilediği bölge olmasından ötürü ekvatorial enlem bölgesi en yüksek elektron yoğunluğunun olduğu bölgedir. Orta enlem bölgesi iyonküredeki değişimlerin en az olduğu bölge olduğundan en sakin bölgedir. Yüksek enlem bölgesinde ise iyonlaşma, güneş enerjisinin yanında, parçacıkların birbirleriyle çarpışması sonucu ortaya çıkan enerji ile de gerçekleşir. İyonlaşma miktarına göre bu tabaka D, E, F1 ve F2 katmanlarından oluşmaktadır. İyonkürenin en alt katmanı olan D katmanı 60 km ile 90 km yükseklikte bulunur. Radyo dalgaları D katmanı tarafından kısmen soğurulur ve zayıflatılır. E katmanı ise yeryüzünden 90 km ile 150 km arasındaki yükseklikte bulunur. İyonkürenin en dış katmanı olan F katmanı F1 ve F2 olmak üzere iki katman halinde incelenmektedir. İyonlaşmanın en fazla olduğu F2 katmanı, KD ve uydu haberleşmesi açısından en önemli katmandır [4]. Şekil 1.1'de iyonkürenin elektron yoğunluğunun yüksekliğe göre değişimi ve iyonkürenin katmanları görülmektedir.



Şekil 1.1. Elektron yoğunluğunun yükseklik ile değişimi.

İyonküre katmanının karakteristiğini ifade eden en önemli parametrelerden biri Toplam Elektron İçeriği (TEİ)'dir. TEİ, uydu ile alıcı arasında 1 m² kesit alanlı silindir boyunca toplam serbest elektron miktarını ifade eder. Birimi TECU olup 1 TECU, 10¹⁶ el/m²'dir. TEİ değerlerinin zamanda ve uzayda değişimleri incelenerek iyonküredeki kısa ve uzun dönemli değişimler takip edilebilir [7].

İyonküredeki Toplam Elektron İçeriği (TEİ) incelemeleri için yaygın olarak uydulardan gönderilen işaretler kullanılır. Bu uydu sistemlerinden bazıları Yerküresel Konum-

lama Sistemi (YKS), GLONASS ve TOPEX/Poseidon sistemleridir [4]. İyonkürenin yapısının anlaşılması ve TEİ kestirimi için fazla maliyet gerektirmeyen ve en yaygın yöntem olan YYS işaretlerinden yararlanılır. Yerel ve yerküresel YYS istasyon ağı kurularak iyonküre sürekli olarak izlenmekte ve TEİ haritaları oluşturulmaktadır. Bu çalışmada Harita Genel Komutanlığı (HGK) tarafından Türkiye ve Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti (KKTC) üzerine konuşlandırılmış, birbirine 80 km ile 100 km uzaklıklarla yerleştirilmiş istasyonlardan oluşan TUSAGA-Aktif YYS alıcı ağı kullanılmıştır. Türkiye ve KKTC üzerinde konuşlandırılmış aktif olarak çalışan çift frekanslı 146 adet YYS istasyonundan oluşan TUSAGA-Aktif YYS ağı Şekil 1.2'de verilmiştir. TUSAGA-Aktif YYS ağı istasyonlarının Türkiye üzerinde düzgün dağıldığı görülmektedir.



Şekil 1.2. TUSAGA-Aktif YYS alıcı istasyonlarının Türkiye ve KKTC üzerindeki dağılımı.

TUSAGA-Aktif YYS ağı üzerinde bulunan herbir gözlem istasyonundan Mayıs 2009'dan bu yana sürekli veri alınarak, iyonküredeki değişimler gözlemlenmekte ve istasyonun o andaki TEİ değeri hesaplanmaktadır [1, 6, 7, 8]. Bu çalışmada TUSAGA-Aktif YYS alıcı ağı üzerindeki istasyonlardan elde edilen verilerden gürbüz, güvenilir ve yüksek zaman çözünürlüklü TEİ kestirimi yapabilen IONOLAB-TEC kullanılmıştır. IONOLAB-TEC, F. Arıkan, C. B. Erol ve O. Arıkan tarafından geliştirilen, Düzgünleştirilmiş TEİ (D-TEİ) algoritması ile, herhangi bir TUSAGA-Aktif YYS alıcısının TEİ değeri ile 30 saniyede bir hesaplanabilmektedir [1, 2, 9].

Herbir alıcıdan elektrik kesintisi, istasyonun farklı bir yere taşınması ve çeşitli nedenlerle kapatılmasından ötürü sürekli veri alınamamaktadır. İyonkürenin radyo dalgalarına etkisi, jeomanyetik, yerçekimsel ve sismik hareketliliğin iyonküre üzerinde etkilerinin gözlemlenebilmesi için sürekli gözlenmesi gerekmektedir. Bu da çeşitli

fiziksel nedenlerden dolayı istasyonlardan gelen eksik verilerin tamamlanmasını zorunlu kılar. Daha önce yapılan araştırmalar sonucu bu eksikliklerin uzay-zaman aradeğerlemesi yapılarak giderilebileceği gösterilmiştir [10].

Bu alışma kapsamında öncelikle Türkiye zerine düzgün dağılımiş TUSAGA-Aktif YKS ağı üzerinden seçilen bir istasyonun eksik TEİ değerleri, uzaysal aradeğerleme tekniği ile bu istasyon merkezli 150 km yarıçaplı çember içerisinde kalan komşu istasyonlarından elde edilmiştir. Uzaysal aradeğerleme yöntemi kullanılırken komşu istasyonların TEİ değerlerinin eksik olmadığı koşulları altında kestirimler yapılmıştır. TUSAGA-Aktif ağı üzerindeki istasyonlardan seçilen belirli bir istasyonun TEİ değerleri sırasıyla uygun dört komşuluk iki gün, simetrik iki komşuluk iki gün ve bir komşuluk bir gün ile eniyilenecek kestirilmiştir. Uygun dört komşuluk ve iki komşuluk her durumda bulunamadığı için 2009, 2010 ve 2011 yılları için bir gün ve her bir komşuluk için ayrı ayrı uzaysal aradeğerleme katsayıları elde edilmiştir. Hesaplanan tüm katsayıların 0-80 km, 80-100 km, 100-120 km ve 120-150 km içerisinde kalan komşuluklara göre ayrı ayrı deneysel dağılımları çıkarılmıştır. Elde edilen deneysel dağılımların Olasılıksal Yoğunluk Fonksiyonlarının (OYF) Gauss dağılımına sahip olduğu gözlemlenmiş ve herbir aralık için normal dağılımlı OYF'nin parametreleri hesaplanmıştır. Belirli istasyonların TEİ değerleri ile parametreleri bilinen bu Gauss dağılımlı OYF'den çekilen katsayılar ile 0-80 km aralığındaki komşuluklarından kestirilen TEİ değerleri karşılaştırılırken Simetrik Kullback-Leibler Mesafesi (SKLD) ve Ortalama Karesel Hata normlarına bakılmıştır. Bu çalışmanın devamında ise ortak uzay-zaman aradeğerleme yöntemleri birleştirilmiştir. Türkiye zerine düzgün şekilde yerleştirilmiş YKS alıcılarından veri kaybı olan istasyonlar bu şekilde en az hata ile tamamlanmıştır.

İyonküre katmanı konumda ve zamanda değişim göstermesinden ötürü durağan olmayan rassal fonksiyon olarak modellenmiştir. Bu tez kapsamında, TEİ değerlerinin rassal fonksiyonu bir yönseme fonksiyonu ile rassal kalıntı fonksiyonunun toplamı olarak ifade edilmiştir [11]. Daha önce yapılan çalışmalarda orta enlem iyonküre yönsemesinin doğrusal ynsemeye sahip olduğu gösterilmiştir [12, 13]. Çalışmanın ikinci aşamasında, Türkiye ve KKTC'nin kapsadığı bölgenin doğrusal yönseme modeli parametreleri çıkartılmış ve iyonküre yönseme haritaları oluşturulmuştur. Daha önce yapılan çalışmaları desteklemek amacıyla örnekleme noktalarından alınan değerlerde doğrusal yönseme ve gerçek TEİ değerleri arasındaki hataya bakılmıştır.

Bunun sonucunda orta enlem bölgesinde bulunan Türkiye ve KKTC'nin iyonküre modelinin doğrusal olarak modellenebileceği sonucu desteklenmiştir. Daha sonra her beş dakikada bir Türkiye'yi kapsayan bölgenin doğrusal yönseme parametreleri çıkartılmış, günlük, mevsimlik ve üç yıllık değişimi incelenmiştir.

Çalışmanın devamında ise Türkiye doğrusal yönseme modeli kullanılarak rassal kalıntı fonksiyonu hesaplanmış ve Krigleme yöntemi [11, 14, 15, 16] ile otomatik Türkiye TEİ haritaları çıkartılmıştır. Çalışma yapılırken öncelikle rassal kalıntı fonksiyonundan deneysel YDS elde edilmiş ve PSO [17, 18] ile deneysel YDS fonksiyonuna uyarlanan teorik YDS'nin parametreleri kestirilmiştir. Kestirilmiş teorik YDS kullanılarak, Evrensel Krigleme yöntemiyle uzayda $0.5^0 \times 0.6^0$, zamanda ise beş dakika çözünürlükte haritalar elde edilmiştir.

Çalışmanın son aşamasında elde edilen haritalar kullanılarak jeodezik koordinat sisteminden güneş eksenli koordinat sistemine dönüşüm yapılmış ve TDA yöntemi ile beşer dakika zaman aralığıyla alınmış ardışık yedi zaman dilimi için analiz yapılmıştır. Bunun sonucunda enerjinin hemen hemen hepsinin bir tekil değer üzerinde yoğunlaştığı görülmüş ve bu tekil değer kullanılarak TEİ değerleri tekrar oluşturulup hata normlarına bakılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda sadece en yüksek enerjili tekil değer kullanılabileceği görülmüştür. Sonuç olarak Türkiye ve KKTC'yi kapsayan orta enlem bölgesi üzerinde zamanda beş dakika çözünürlükte ve uzayda $0.5^0 \times 0.6^0$ çözünürlükte, Evrensel Krigleme yöntemi ile otomatik TEİ kestirimlerinin rassal fonksiyon gerçeklemeleri elde edilmiş ve TDA yöntemiyle rassal fonksiyonun analizi yapılmıştır.

Bölüm 2'de uzay-zaman aradeğerleme yöntemi anlatılmış ve uzaysal aradeğerleme yapılırken komşuluklar belirlenerek herbir komşuluğun ağırlıklandırılacağı katsayılar hesaplanmıştır. Daha sonra uzay ve zaman aradeğerleme yöntemleri birleştirilmiş ve hata kriterleri hesaplanmıştır. Bölüm 3'te, TEİ'nin rassal fonksiyon olarak gösterimi yazılarak, doğrusal yönseme parametrelerinin kestirilmiştir. Ayrıca Türkiye iyonküre yönseme haritaları her beşer dakikada bir çıkartılmıştır. Bölüm 4'te Evrensel Krigleme yöntemi anlatılmış ve teorik ve deneysel YDS fonksiyonları hesaplanmıştır. Bölüm 5'te ise güneş eksenli koordinat sistemine dönüşümü yapılarak, TDA yöntemi ile TEİ analizi yapılmıştır.

2. UZAY-ZAMAN ARADEĞERLEME YÖNTEMİ İLE TEİ KESTİRİMİ

İyonküre güneşin etkinliği, jeomanyetik, yerçekimsel ve sismik hareketlilikle değişim gösterir. Tüm bu etmenlerin iyonküre üzerinde etkilerinin gözlemlenebilmesi için iyonkürenin sürekli gözlenmesi gerekmektedir. Her bir alıcıdan fiziksel nedenlerden ötürü her an veri alınamamaktadır. Bu da çeşitli fiziksel nedenlerden dolayı istasyonlardan gelen eksik verilerin tamamlanmasını zorunlu kılar. Daha önce yapılan araştırmalar sonucu bu eksikliklerin uzay-zaman aradeğerlemesi yapılarak giderilebileceği gösterilmiştir [10].

2.1 Uzaysal Aradeğerleme

Herhangi bir YKS alıcı ağı üzerinde belirlenmiş bir istasyonun eksik TEİ değerlerinin, belirli bir yarıçap içerisindeki komşuluklarının TEİ değerlerinden kestirilmesini amaçlar. Bu ağ üzerinde seçilen bir u istasyonu için d . gündeki TEİ vektörü

$$\mathbf{x}_{u;d} = [x_{u;d}(1) \dots x_{u;d}(n) \dots x_{u;d}(N_{u;d})]^T \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada $N_{u;d}$ seçilmiş olan u istasyonunun d . gün için TEİ değerlerinin sayısını verir. $[\cdot]^T$ ise devriği operatörünü temsil eder.

Belirlenmiş u istasyonu için, bu istasyon merkezli oluşturulan R_r yarıçaplı bir çember içerisinde kalan diğer istasyonlar komşu istasyonlar olarak adlandırılır. Bu yöntemin amacı komşu istasyonların TEİ değerleri kullanılarak, her bir istasyonun yakınlık, uzaklık, seçilmiş olan u istasyona göre konumu göz önüne alınarak bir katsayı ile çarpılıp, u istasyonunun günlük TEİ değerlerinin kestirilmesidir.

Belirlenmiş u istasyonunun d . gün için R_r yarıçaplı çember içerisinde kalan N_{u,R_r} tane komşuluktan kestirilmiş TEİ değeri $\hat{\mathbf{x}}_{u;d;R_r}$ ile ifade edilir ve;

$$\hat{\mathbf{x}}_{u;d;R_r} = \sum_{v=1}^{N_{u,R_r}} \alpha_{u;d;R_r}(v) \mathbf{x}_{v;d;R_r} \quad (2.2)$$

ile hesaplanır. Burada $\alpha_{u;d;R_r}(v)$, belirlenmiş u istasyonu için d . günde R_r yarıçaplı çember içerisinde bulunan N_{u,R_r} tane komşuluğundan v . komşuluğun katkısını ifade etmektedir. $\mathbf{x}_{v;d;R_r}$ ise R_r yarıçaplı çember içerisindeki v . komşuluğun d . gündeki TEİ değerlerinin vektörüdür.

Uzaysal aradeğerleme yöntemi ile herbir komşuluğun ağırlıklandırılacağı katsayılar, seçilmiş u istasyonunun geçmiş günlerinin, u istasyon merkezli R_r yarıçaplı komşuluğundaki istasyonlarından enküçükleme yöntemi ile elde edilmesini sağlayan katsayılar olarak seçilir. Enküçükleme yöntemi Eşitlik 2.3'de gösterildiği şekilde yazılır;

$$\alpha_{u;d;R_r}(v) = \arg \min_{\alpha_{u;d;R_r}(v)} \sum_{d_n=d_i}^{d_s} \left\| \mathbf{x}_{u;d_n} - \sum_{v=1}^{N_{u,R_r}} \alpha_{u;d;R_r}(v) \mathbf{x}_{v;d_n;R_r} \right\|_2^2 \quad (2.3)$$

Burada enküçükleme yöntemi d_i . günden başlayarak d_s . güne kadar $N_{d_s-d_i}$ gün üzerinden hesaplanır. Enküçükleme yöntemi uygulanırken $N_{d_s-d_i}$ gün için seçilmiş u istasyonunun R_r yarıçaplı komşuluğundaki istasyonların TEİ değerleri tam olarak kabul edilmiştir. Eksik veriye sahip olan istasyonlar gözleme yapılırken komşuluklardan atılır. $\|\cdot\|_2$ ise metrik uzaklığı ifade eden \mathcal{L}_2 normunun gösterimidir. Eşitlik 2.3 ile verilen enküçükleme denklemi aşağıdaki şekilde kapalı forma indirgenir.

$$\underline{\alpha}_{u;d;R_r} = \left(\sum_{d_n=d_i}^{d_s} \mathbf{x}_{u;d_n;R_r}^T \mathbf{x}_{u;d_n;R_r} \right)^{-1} \left(\sum_{d_n=d_i}^{d_s} \mathbf{b}_{u;d_n;R_r} \right) \quad (2.4)$$

Burada $\underline{\alpha}_{u;d;R_r}$ seçilmiş u istasyonunun d . gün ve R_r yarıçaplı komşuluğu içerisinde kalan istasyonların ağırlıklandırılacağı eniyilenmiş katsayılar vektörünü ifade eder ve aşağıdaki biçimde gösterilir:

$$\underline{\alpha}_{u;d;R_r} = [\alpha_{u;d;R_r}(1) \dots \alpha_{u;d;R_r}(v) \dots \alpha_{u;d;R_r}(N_{u,R_r})]^T \quad (2.5)$$

$\mathbf{X}_{u;d_n;R_r}$ ise u istasyonunun d_n . gün için R_r yarıçaplı komşuluğundaki istasyonların TEİ değerlerinin oluşturduğu matrisi ifade eder

$$\mathbf{X}_{u;d_n;R_r} = [\mathbf{x}_{1;d_n;R_r} \dots \mathbf{x}_{v;d_n;R_r} \dots \mathbf{x}_{N_{u,R_r};d_n;R_r}] \quad (2.6)$$

ve Eşitlik 2.6'da gösterildiği şekilde yazılırken, $\mathbf{b}_{u;d_n;R_r}$ ise

$$\mathbf{b}_{u;d_n;R_r} = \mathbf{X}_{u;d_n;R_r}^T \mathbf{x}_{u;d_n} \quad (2.7)$$

ile ifade edilir.

2.2 Uzay-Zaman Aradeğerleme Yöntemi

Zamanda aradeğerleme yöntemi için kobra eğrisi kullanılmıştır. Kobra eğrisi fonksiyonunda kullanılan N_n , $\mathbf{x}_{u;d}$ TEİ vektörü içerisindeki eksik veri sayısını ifade ederken, kopukluk başlamadan önce elde edilen son örneğin kaçınıcı veri olduğu n_i , kopukluk bittikten sonra elde edilen ilk örneğin kaçınıcı veri olduğu ise n_s ile verilir. Buradaki eksik veri sayısı, $N_n = n_s - n_i - 1$ ile bulunabilir. Zamanda aradeğerleme yöntemiyle kestirilmiş TEİ değeri vektörü aşağıda verilen eşitlik ile ifade edilebilir.

$$\hat{\mathbf{x}}_{u;d;N_n} = f_C(x_{u;d}(n_i), x_{u;d}(n_s), N_n) \quad (2.8)$$

f_C fonksiyonu başlangıç değeri, $x_{u;d}(n_i)$ ve bitiş değeri, $x_{u;d}(n_s)$ arasındaki N_n tane verinin üçüncü dereceden bir polinomla yani kobra eğrisi ile aradeğerlemesini gösterir.

Gün içerisinde TEİ kestirimi yapılırken zamanda aradeğerleme yöntemi ile uç kısımlar, uzayda aradeğerleme yöntemi ile ise ara kısımlar en iyi şekilde kestirilir. Buradaki amaç iki yöntemi birlikte kullanarak en iyi kestirimi gerçekleştirmektir. Eşitlik 2.9'da gösterildiği gibi uzay ve zaman aradeğerleme yöntemleri bir araya getirilebilir.

$$\hat{\mathbf{x}}_{u;d;c} = \mathbf{G}\hat{\mathbf{x}}_{u;d;R_r} + (\mathbf{I} - \mathbf{G})\hat{\mathbf{x}}_{u;d;N_n} \quad (2.9)$$

burada \mathbf{I} birim matrisini gösterir ve köşegen matrisi olan \mathbf{G} ise Eşitlik 2.10'da verilen enküçükleme yöntemi ile elde edilir.

$$\mathbf{G} = \arg \min_{\mathbf{G}} \sum_{d_n=d_i}^{d_s} \|\mathbf{x}_{u;d_n} - \hat{\mathbf{x}}_{u;d_n;c}\|_2^2 \quad (2.10)$$

\mathbf{G} köşegen matrisi $\mathbf{G} = \text{diag}(g_1, \dots, g_k, \dots, g_{N_n})$ şeklinde ifade edilebilir. $\text{diag}(\cdot)$ matematiksel olarak köşegen matrisini temsil eder. Eşitlik 2.10'daki enküçükleme yöntemi, Eşitlik 2.11'deki gibi açılabilir.

$$\min_{g_1, \dots, g_{N_n}} \sum_{d_n=d_i}^{d_s} \sum_{k=1}^{N_n} [x_{u;d_n}(k) - g_k \hat{x}_{u;d_n;R_r}(k) - (1 - g_k) \hat{x}_{u;d_n;N_n}(k)]^2 \quad (2.11)$$

En uygun g_k değerleri hesaplanırken her bir g_k değerinin birbirinden bağımsız olduğu bilgisi altında eşitlik;

$$\min_{g_k} \sum_{d_n=d_i}^{d_s} [x_{u;d_n}(k) - \hat{x}_{u;d_n;N_n}(k) - g_k(\hat{x}_{u;d_n;R_r}(k) - \hat{x}_{u;d_n;N_n}(k))]^2 \quad (2.12)$$

şeklinde düzenlenebilir ve bu denklem çözülerek;

$$g_k = \frac{\sum_{d_n=d_i}^{d_s} (\hat{x}_{u;d_n;R_r}(k) - \hat{x}_{u;d_n;N_n}(k))(x_{u;d_n}(k) - \hat{x}_{u;d_n;N_n}(k))}{\sum_{d_n=d_i}^{d_s} (\hat{x}_{u;d_n;R_r}(k) - \hat{x}_{u;d_n;N_n}(k))^2} \quad (2.13)$$

sonucuna ulaşılır.

Belirli bir YKS alıcı ağı üzerinde fiziksel nedenlerden ötürü, hem seçilen u istasyonunun hem de R_r yarıçap içerisindeki komşuluklarının d_i . günden başlayarak d_s . güne kadar TEİ değerlerinin var olduğu ardışık gün bulmak çok zordur. Tek gün üzerinden kestirimler yapıldığında ise Eşitlik 2.13 aşağıda verilen forma dönüşür:

$$g_k = \frac{x_{u;d_n}(k) - \hat{x}_{u;d_n;N_n}(k)}{\hat{x}_{u;d_n;R_r}(k) - \hat{x}_{u;d_n;N_n}(k)} \quad (2.14)$$

Eşitlik 2.14 ile verilen denklemde $\hat{x}_{u;d_n;R_r}(k)$ ve $\hat{x}_{u;d_n;N_n}(k)$ arasındaki fark çok az olduğu zamanlarda g_k katsayısı sonsuza yakınsamaktadır. Bu yüzden özellikle verilerin çok az olduğu günlerde Eşitlik 2.13 yerine aşağıdaki gibi yeni bir fonksiyon kullanılabilir.

$$g_k = 1 - \frac{e^{-\beta(k-1)} + e^{-\beta(N_n-k)}}{1 + e^{-\beta(N_n-1)}} \quad (2.15)$$

Yukarıdaki denklemde β değeri 0 ile 1 arasında değer alırken, β 'yı 0 seçmek sadece zamanda aradeğerleme yapmak anlamına gelmektedir.

2.3 Komşulukların Belirlenmesi

TUSAGA-Aktif YKS alıcı ağı üzerinde belirlenmiş bir u istasyon merkezli R_r yarıçaplı bir çember oluşturularak, çember içerisinde kalan istasyonlar belirlenir ve belirlenen istasyonlar u istasyonunun R_r komşuluğundaki istasyonlar olarak adlandırılır. Herbir

komşunun katkısının hesaplanabilmesi için ilk aşamada kullanılacak istasyonların verilerinin tam olması gerektiğinden, eksik veriye sahip olan istasyonlar komşuluktan çıkarılır. Kalan istasyonlardan u istasyonunun d . gün için TEİ değerleri hesaplanır.

Daha önce araştırmalardan gözlem yoluyla elde edilen iyonküredeki elektron yoğunluğunun 100 km içerisinde değişmediği bilgisi baz alınarak, bu çalışmada belirlenmiş u istasyon merkezli 150 km yarıçaplı çember içerisinde kalan istasyonlar komşu istasyonlar olarak adlandırılmıştır.

2.4 Sistem Başarımının Ölçülmesi

Uzay-zaman aradeğerleme yönteminin başarımı üç farklı hata normu ile belirlenebilir. Bu hata normları Ortalama Karesel Hata, düzgelenmiş hata ve Simetrik Kullback-Leibler Mesafesi (SKLD) olarak seçilmiştir.

Ortalama Karesel Hata, belirlenmiş u istasyonunun d . gündeki TEİ değeri ile, komşuluklarından kestirilen TEİ değeri arasındaki metrik uzaklığın karesinin ortalama değerinin karekökünü ifade eder ve matematiksel olarak Eşitlik 2.16'da verildiği gibi gösterilir.

$$e_{RMS}(u; d) = \sqrt{\frac{1}{N_{u;d}} \|\mathbf{x}_{u;d} - \hat{\mathbf{x}}_{u;d}\|_2^2} \quad (2.16)$$

Düzgelenmiş Hata, u istasyonunun d . gündeki TEİ değeri ile u istasyonunun $N_{u;R_r}$ tane komşuluğundan kestirilen TEİ değeri arasındaki farkın karesinin toplanarak, u istasyonunun d . gündeki TEİ değerinin altında kalan alan ile düzgelenmesi sonucu elde edilir ve Eşitlik 2.17'de gösterildiği gibi yazılır.

$$e_N(u; d) = \frac{\|\mathbf{x}_{u;d} - \hat{\mathbf{x}}_{u;d}\|_2}{\|\mathbf{x}_{u;d}\|_2} \quad (2.17)$$

SKLD ise iki Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (OYF) arasındaki benzerliklerin ve farklılıkların ölçümünde kullanılır. Eşitlik 2.18'de verilen belirlenmiş u istasyonunun d . gündeki TEİ değerinin OYF'si ile Eşitlik 2.19'da gösterilen kestirilmiş TEİ değerlerinin OYF'si arasındaki benzerlikler SKLD kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\mathbf{P}_{u;d} = \mathbf{x}_{u;d} \left(\sum_{n=1}^{N_{u;d}} x_{u;d}(n) \right)^{-1} \quad (2.18)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{u;d} = \hat{\mathbf{x}}_{u;d} \left(\sum_{n=1}^{N_{u;d}} \hat{x}_{u;d}(n) \right)^{-1} \quad (2.19)$$

Eşitlik 2.18 ve 2.19 kullanılarak öncelikle $\hat{\mathbf{P}}_{u;d}$ 'den $\mathbf{P}_{u;d}$ 'ye daha sonra ise $\mathbf{P}_{u;d}$ 'den $\hat{\mathbf{P}}_{u;d}$ 'ye olan Kullback-Liebler Mesafeleri (KLM):

$$KLM(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \setminus \mathbf{P}_{u;d}) = \left(\sum_{n=1}^{N_{u;d}} \hat{P}_{u;d}(n) \ln \left(\frac{\hat{P}_{u;d}(n)}{P_{u;d}(n)} \right) \right) \quad (2.20)$$

$$KLM(\mathbf{P}_{u;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u;d}) = \left(\sum_{n=1}^{N_{u;d}} P_{u;d}(n) \ln \left(\frac{P_{u;d}(n)}{\hat{P}_{u;d}(n)} \right) \right) \quad (2.21)$$

eşitlikleri ile verilir [19, 20]. Eşitlik 2.20 ve 2.21 ile ifade edilen KLM fonksiyonları toplanarak TEİ değerleri arasındaki SKLD elde edilir ve matematiksel olarak:

$$e_{SKLD}(u; d) = KLM(\mathbf{P}_{u;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u;d}) + KLM(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \setminus \mathbf{P}_{u;d}) \quad (2.22)$$

şeklinde ifade edilir.

2.5 Bulgular

Bu çalışmada öncelikle 2009-2011 yılları arasında TUSAGA-Aktif YKS istasyonlarından alınan veriler kullanılarak uzaysal aradeğerleme yöntemi yapılmış ve seçilmiş istasyonun hesaplama yapılan gündeki TEİ değeri ile kestirim değeri karşılaştırılarak yöntemin başarısı ölçülmüştür. Sonuçlar doğrultusunda en uygun komşuluklar belirlenmeye çalışılmıştır. İyonkürenin 100 km içerisinde değişmediği öngörüsü altında, 2009, 2010 ve 2011 yılları için herbir istasyon merkezli 150 km yarıçaplı çemberler içerisinde kalan komşuluklarının tek başına ağırlıklandırıldığı katsayılar hesaplanmıştır. Bu ağırlıklandırmalar sonucunda 0-80 km, 80-100 km, 100-120 km ve 120-150 km içerisindeki komşulukların ağırlıklandırıldığı katsayıların deneysel dağılımları çıkarılarak, normal dağılımlı olasılık yoğunluk fonksiyonlarının olduğu gözlemlenmiştir. Son olarak da uzay ve zaman aradeğerleme yöntemleri bir araya getirilerek sistemin başarımı ölçülmüştür.

En uygun komşuluk ve gün seçimine örnek olarak, Şekil 2.1’de, $[39.94^0 K \quad 27.24^0 D]$ konumunda bulunan yenc (Yenice, Çanakkale, Türkiye) istasyonunun 10 Ağustos 2010 günü TEİ değeri ile bir gün bir komşuluk, iki gün iki komşuluk ve iki gün dört komşuluk kullanılarak kestirilmiş TEİ değerleri görünmektedir. Çizelge 2.1’de ise her bir komşuluğun yenc istasyonuna olan uzaklığı ve kestirimler elde edilirken ağırlıklandırıldığı katsayılar verilmiştir. Seçilen istasyonlar yenc istasyonuna göre simetrik konuşlandırılmış en yakın dört istasyondur. Çizelge 2.2’de ise üç hata normu ile kestirilen TEİ değerleri kıyaslanmıştır.

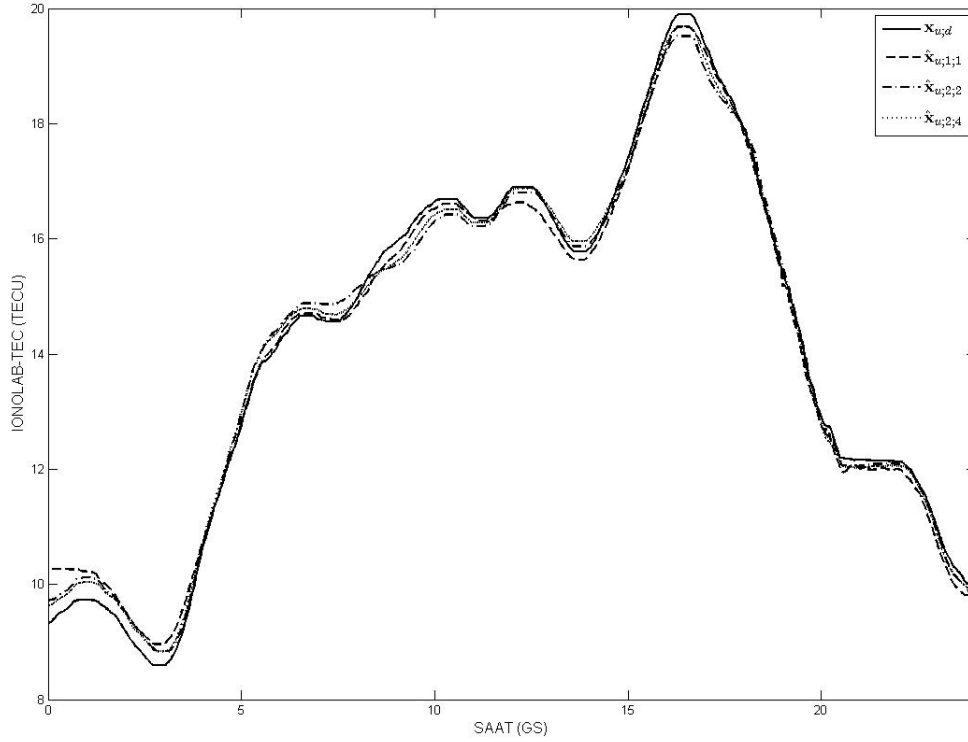
Komşu istasyonlar	Uzaklık (km)	$\alpha_{u;1;1}$	$\alpha_{u;2;2}$	$\alpha_{u;2;4}$
balk	64.83	0.9825	-0.0308	-0.0210
cana	73.26	-	1.0358	0.5787
band	77.89	-	-	0.2111
ayvl	84.16	-	-	0.2298

Çizelge 2.1. yenc istasyonunun 10 Ağustos 2010 günü TEİ kestiriminde komşuluklarının ağırlıklandırıldığı katsayılar ve her bir komşuluğa olan uzaklığı

Çizelge 2.1 ile verilen $\alpha_{u;1;1}$ bir gün bir komşuluk, $\alpha_{u;2;2}$ iki gün iki komşuluk ve $\alpha_{u;2;4}$ ise iki gün dört komşuluğun ağırlıklandırıldığı katsayıları temsil eder.

Çizelge 2.2’den de açıkça görüldüğü üzere en iyi kestirim sonuçları üç hata normunda da dört komşuluk ve iki gün ile elde edilmiştir, fakat fiziksel nedenlerden dolayı belirlenmiş herhangi bir istasyon için uygun dört komşuluk bulmak her zaman mümkün olmamaktadır. Bu durumda iki gün iki komşuluk ve bir gün bir komşuluk kullanılarak yakın hata normları ile kestirimler yapılabildiği Çizelge 2.2’de gösterilmektedir. 2009-2011 yılları arasında yapılan incelemeler, SKLD hata normunun 5×10^{-3} ve daha az olduğu durumlarda, TEİ değeri ile kestiriminin OYF olarak birbirine benzediği ve hatanın makul olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Türkiye üzerine konuşlandırılmış diğer istasyonlar üzerinden yapılan benzer çalışmalarda da benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Belirlenmiş bir istasyon için iki gün ve dört komşuluk kullanılarak genel olarak en iyi kestirimler elde edilmiştir. Daha öncede belirtildiği üzere her zaman uygun dört komşuluk bulunamadığından, belirlenmiş u istasyonu için 150 km yarıçap içerisinde kalan her bir komşuluğun tek tek etkisine



Şekil 2.1. 10 Ağustos 2010 tarihinde yenc istasyonun TEİ değeri ve uzaysal aradeğerleme yöntemi ile elde edilmiş TEİ kestirimleri.

gün ve komşuluk sayısı	e_{RMS}	e_N	e_{SKLD}
1 gün 1 komşuluk	0.2443	0.0168	3.7856×10^{-4}
2 gün 2 komşuluk	0.2253	0.0155	2.6605×10^{-4}
2 gün 4 komşuluk	0.1763	0.0121	1.7484×10^{-4}

Çizelge 2.2. yenc istasyonunun 10 Ağustos 2010 günü TEİ kestirimi hata normları

bakılmış ve bir gün bir istasyon kullanılarak kestirimlerin yapılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Türkiye üzerine düzgün dağılmış TUSAGA-Aktif YKS alıcı ağı üzerindeki her bir istasyonun 2009, 2010 ve 2011 yılları için 150 km yarıçaplı komşuluğunda kalan her bir komşuluk ayrı ayrı kullanılarak uzaysal aradeğerleme yöntemi ile ağırlıklandırıldığı katsayılara bakılmıştır. Enbüyük olabilirlik seçimi altında bu katsayıların OYF grafiği çizilmiş ve Gauss dağılımlı OYF'lere sahip oldukları gözlemlenmiştir.

Şekil 2.2'de TUSAGA-Aktif alıcı ağı üzerinde bulunan her bir istasyonun 0-80 km

yarıçapı içerisinde bulunan herbir komşuluğunun 2009, 2010, 2011 ve 2010-2011 yılları için ayrı ayrı ağırlıklandırıldığı katsayılar hesaplanmıştır. Tüm katsayıların ortalama değeri ve standart sapması enbüyük olabilirlik seçimi altında hesaplanmıştır [21].

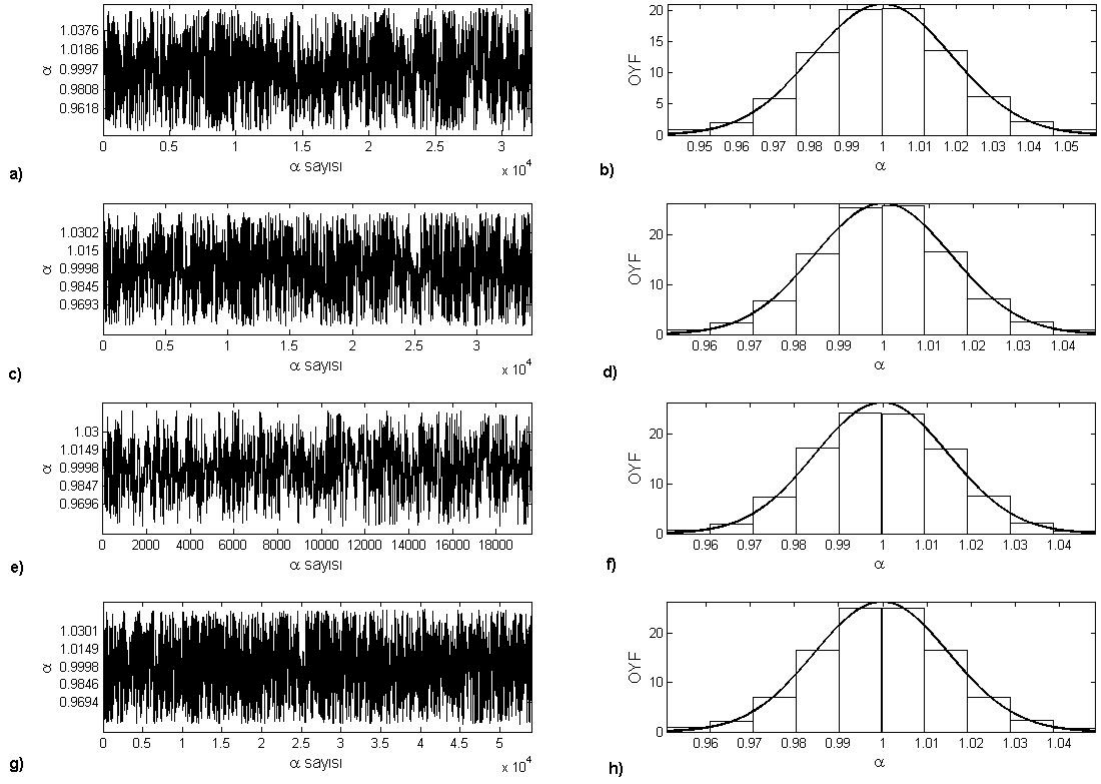
$$\hat{\mu}_\alpha = \frac{1}{N_\alpha} \sum_{n=1}^{N_\alpha} \alpha_{u;1;1}(n) \quad (2.23)$$

$$\hat{\sigma}_\alpha = \left(\frac{1}{N_\alpha} \sum_{n=1}^{N_\alpha} (\alpha_{u;1;1}(n) - \hat{\mu}_\alpha)^2 \right)^{1/2} \quad (2.24)$$

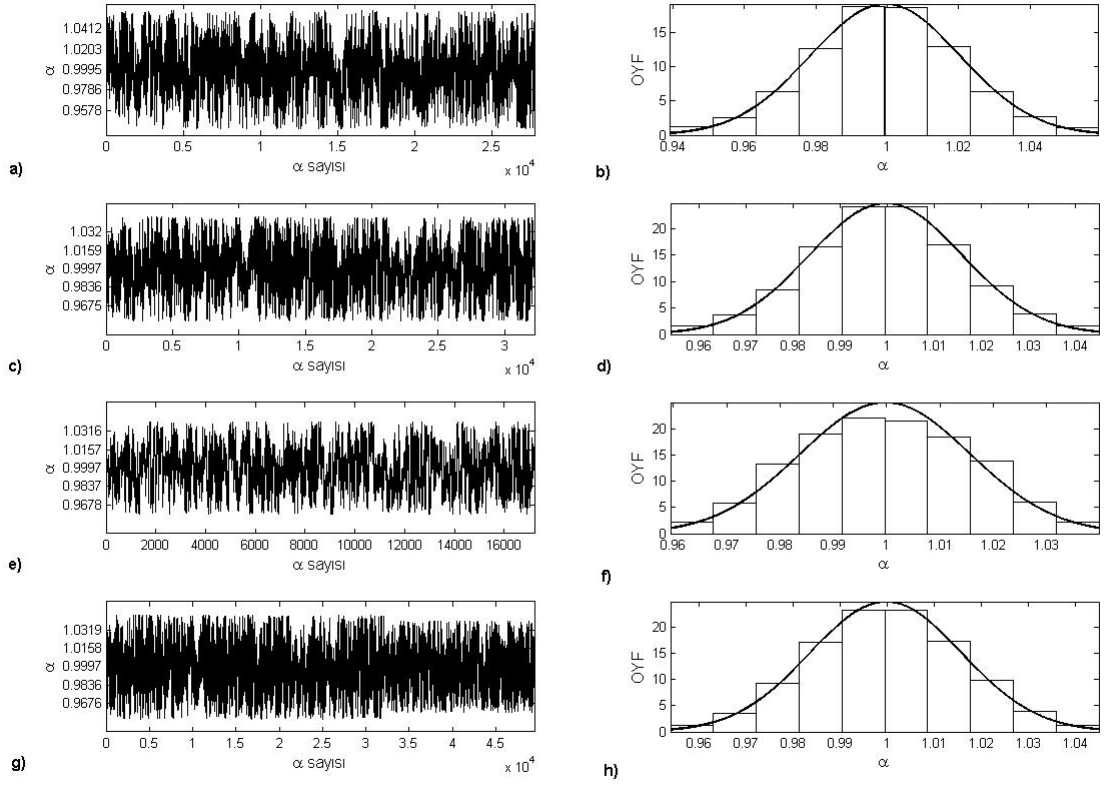
$\hat{\mu}_\alpha$ tüm α değerlerinin ortalama değerini, $\hat{\sigma}_\alpha$ standart sapmasının matematiksel ifadesidir. N_α ise kullanılmış olan tüm α değerlerinin sayısını verir.

Tüm bu sonuçlar altında 2009, 2010, 2011 ve 2010-2011 yılları için 0-80, 80-100, 100-120, 120-150 km arasındaki α değerleri çıkarılmış, ortalama değerleri ve standart sapmaları hesaplanmıştır. 2010 ve 2011 yılları 2009 yılına göre daha güvenilir sonuçlara sahiptir. 2009 yılında ölçüm hataları, veri kaybının çokluğu gibi nedenlerle incelemelerde ayrı tutulmuştur.

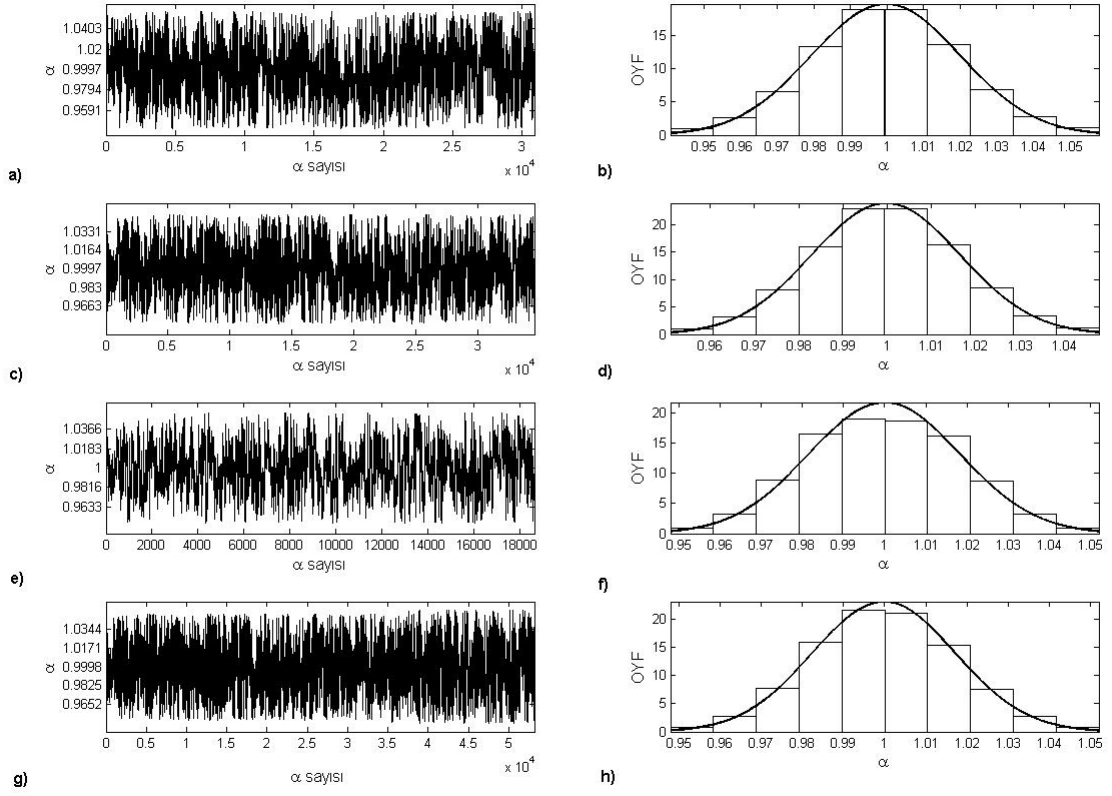
Şekil 2.3, Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te ise sırasıyla 80-100, 100-120, 120-150 km yarıçapı içerisinde kalan TUSAGA-Aktif YKS istasyonundaki komşulukların ağırlıklandırıldığı katsayıların ortalama değerleri ve standart sapmaları hesaplanmış ve bu değerler altından Gauss OYF grafikleri çıkartılarak, deneysel dağılım grafikleriyle birlikte gösterilmiştir.



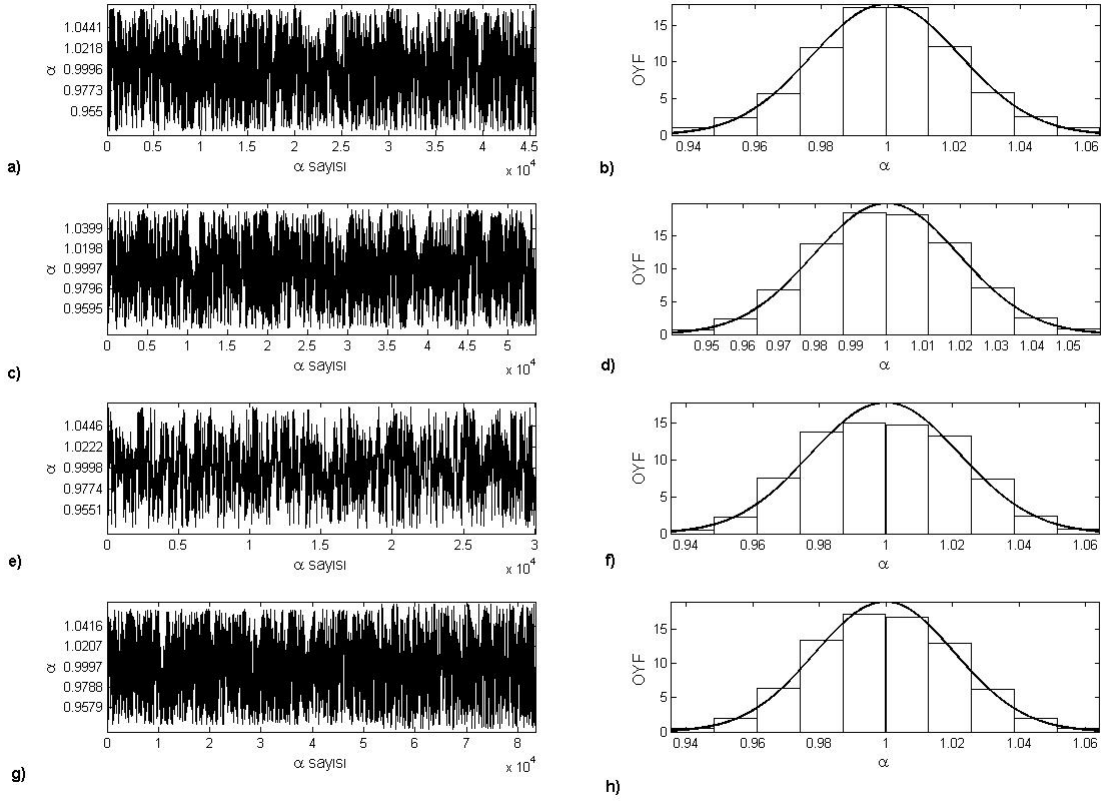
Şekil 2.2. 0-80 km aralığındaki tüm komşuluklardan elde edilen α katsayıları ve OYF grafikleri: a) 2009 yılı α katsayıları, b) 2009 yılı deneysel dağılımı, c) 2010 yılı α katsayıları, d) 2010 yılı deneysel dağılımı, e) 2011 yılı α katsayıları, f) 2011 yılı deneysel dağılımı, g) 2010 ve 2011 yılları α katsayıları, h) 2010 ve 2011 yıllarının ortak deneysel dağılımı.



Şekil 2.3. 80-100 km aralığındaki tüm komşuluklardan elde edilen α katsayıları ve OYF grafikleri: a) 2009 yılı α katsayıları, b) 2009 yılı deneysel dağılımı, c) 2010 yılı α katsayıları, d) 2010 yılı deneysel dağılımı, e) 2011 yılı α katsayıları, f) 2011 yılı deneysel dağılımı, g) 2010 ve 2011 yılları α katsayıları, h) 2010 ve 2011 yıllarının ortak deneysel dağılımı.



Şekil 2.4. 100-120 km aralığındaki tüm komşuluklardan elde edilen α katsayıları ve OYF grafikleri: a) 2009 yılı α katsayıları, b) 2009 yılı deneysel dağılımı, c) 2010 yılı α katsayıları, d) 2010 yılı deneysel dağılımı, e) 2011 yılı α katsayıları, f) 2011 yılı deneysel dağılımı, g) 2010 ve 2011 yılları α katsayıları, h) 2010 ve 2011 yıllarının ortak deneysel dağılımı.



Şekil 2.5. 120-150 km aralığındaki tüm komşuluklardan elde edilen α katsayıları ve OYF grafikleri: a) 2009 yılı α katsayıları, b) 2009 yılı deneysel dağılımı, c) 2010 yılı α katsayıları, d) 2010 yılı deneysel dağılımı, e) 2011 yılı α katsayıları, f) 2011 yılı deneysel dağılımı, g) 2010 ve 2011 yılları α katsayıları, h) 2010 ve 2011 yıllarının ortak deneysel dağılımı.

komşuluk yarıçapı	$\hat{\mu}_\alpha$	$\hat{\sigma}_\alpha$
0-80 km	0.99971	0.018931
80-100 km	0.99949	0.020855
100-120 km	0.99973	0.020301
120-150 km	0.99955	0.022287

Çizelge 2.3. 2009 yılı tüm komşulukların tek tek katkılarından kestirilen α katsayılarının OYF fonksiyonlarının ortalama değerleri ve standart sapmaları

komşuluk yarıçapı	$\hat{\mu}_\alpha$	$\hat{\sigma}_\alpha$
0-80 km	0.99975	0.015227
80-100 km	0.99972	0.016136
100-120 km	0.99973	0.016703
120-150 km	0.99970	0.020093

Çizelge 2.4. 2010 yılı tüm komşulukların tek tek katkılarından kestirilen α katsayılarının OYF fonksiyonlarının ortalama değerleri ve standart sapmaları

komşuluk yarıçapı	$\hat{\mu}_\alpha$	$\hat{\sigma}_\alpha$
0-80 km	0.99982	0.015084
80-100 km	0.99971	0.015962
100-120 km	0.99996	0.018331
120-150 km	0.99982	0.022370

Çizelge 2.5. 2011 yılı tüm komşulukların tek tek katkılarından kestirilen α katsayılarının OYF fonksiyonlarının ortalama değerleri ve standart sapmaları

komşuluk yarıçapı	$\hat{\mu}_\alpha$	$\hat{\sigma}_\alpha$
0-80 km	0.99978	0.015186
80-100 km	0.99972	0.016062
100-120 km	0.99981	0.017308
120-150 km	0.99974	0.020952

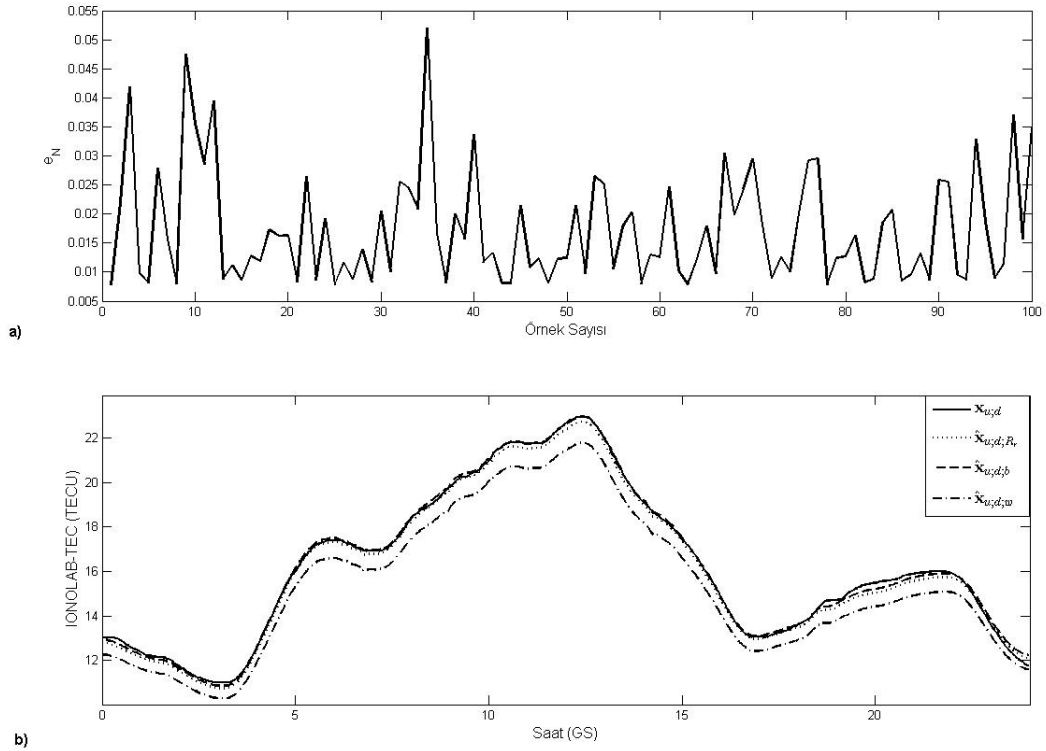
Çizelge 2.6. 2010 ve 2011 yılları için tüm komşulukların tek tek katkılarından kestirilen α katsayılarının OYF fonksiyonlarının ortalama değerleri ve standart sapmaları

TUSAGA-Aktif YKS ağı üzerinde bulunan tüm istasyonların 0-150 km aralığındaki her bir komşuluğunun tek başına ağırlığı bulunmuştur. Daha sonra tüm istasyonların sırasıyla 0-80 km, 80-100 km, 100-120 km ve 120-150 km aralığındaki istasyonların katsayıları bir araya getirilerek enbüyük olabilirlik seçimi altında Eşitlik 2.23 ve Eşitlik 2.24 kullanılarak ortalama değerleri ve standart sapmaları hesaplanmıştır. Tüm bu işlemler 2009, 2010, 2011 ve 2010-2011 yıllarına uygulanmış ve sonuçlar sırasıyla Çizelge 2.3, Çizelge 2.4, Çizelge 2.5 ve Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Elde edilen bilgiler ışığında 0-80 km arasındaki komşuluklar, ortalama değeri 0.99978 ve standart sapması 0.015186 olan Gauss Olasılık Yoğunluk Fonksiyonundan çekilen bir katsayı ile çarpılarak, belirlenen istasyonun TEİ değeri düşük hatalar ile elde edilebileceği gösterilmiştir. Şekil 2.6'da $[39.86^0 K \quad 32.85^0 D]$ konumunda bulunan anrk (Ankara, Türkiye) istasyonunun 06 Ekim 2010 tarihindeki TEİ değerinin, bu istasyondan 57.5 km uzakta $[39.84^0 K \quad 33.52^0 D]$ konumunda bulunan kkal (Kırıkkale, Türkiye) istasyonunun aynı gündeki TEİ değerinden, verilen OYF altından çekilen bir katsayı ile çarpılarak elde edilmiş anrk istasyonunun en iyi ve en kötü TEİ kestirimi ile uzaysal aradeğerleme yöntemiyle hesaplanan katsayı ile kestirilen TEİ değerleri karşılaştırılmıştır.

Şekil 2.6a'da $\mathbf{x}_{u;d}$ ile $\hat{\mathbf{x}}_{u;d;R_r}$ arasındaki düzgelenmiş hatanın grafiğidir. Burada kkal istasyonunun TEİ değeri, ortalama değeri ve standart sapması daha önce belirtilmiş olan normal dağılımlı OYF içerisinde seçilen bir katsayı ile çarpılarak anrk istasyonunun TEİ değeri kestirilmiş ve anrk istasyonunun o günkü değeri ile kıyaslanmıştır. Şekil 2.6b'de ise $\hat{\mathbf{x}}_{u;d;b}$ ile düzgelenmiş hatanın en düşük değeriyle elde edilen TEİ kestirimi, $\hat{\mathbf{x}}_{u;d;w}$ ile düzgelenmiş hatanın en yüksek değeriyle elde edilen TEİ değerleri ifade edilmektedir.

Çalışmanın devamında uzay ve zaman aradeğerleme yöntemleri bir araya getirilmiş ve sistemin başarımına bakılmıştır. Çalışma yapılırken öncelikle Eşitlik 2.15 ile verilen β değeri deneysel olarak kestirilmeye çalışılmıştır. Şekil 2.7 iyonkürenin sakin olarak adlandırıldığı 31 Mart 2011 ve iyonkürenin bozulmalı olarak adlandırıldığı 05 Ağustos 2011 tarihinde farklı β değerleriyle kestirim sonuçlarını göstermektedir. Çizelge 2.7'de ise bu tarihlerde $[39.18^0 K \quad 36.08^0 D]$ konumunda bulunan geme (Gemerek, Sivas, Türkiye) istasyonunun TEİ değeri ve farklı β değerleriyle kestirilmiş TEİ değeri arasındaki farkın düzgelenmiş hata ile hesaplanmış sonuçları verilmektedir. Çizelge 2.7'ye bakıldığında β değeri 0.35 olarak seçildiğinde en az hata ile



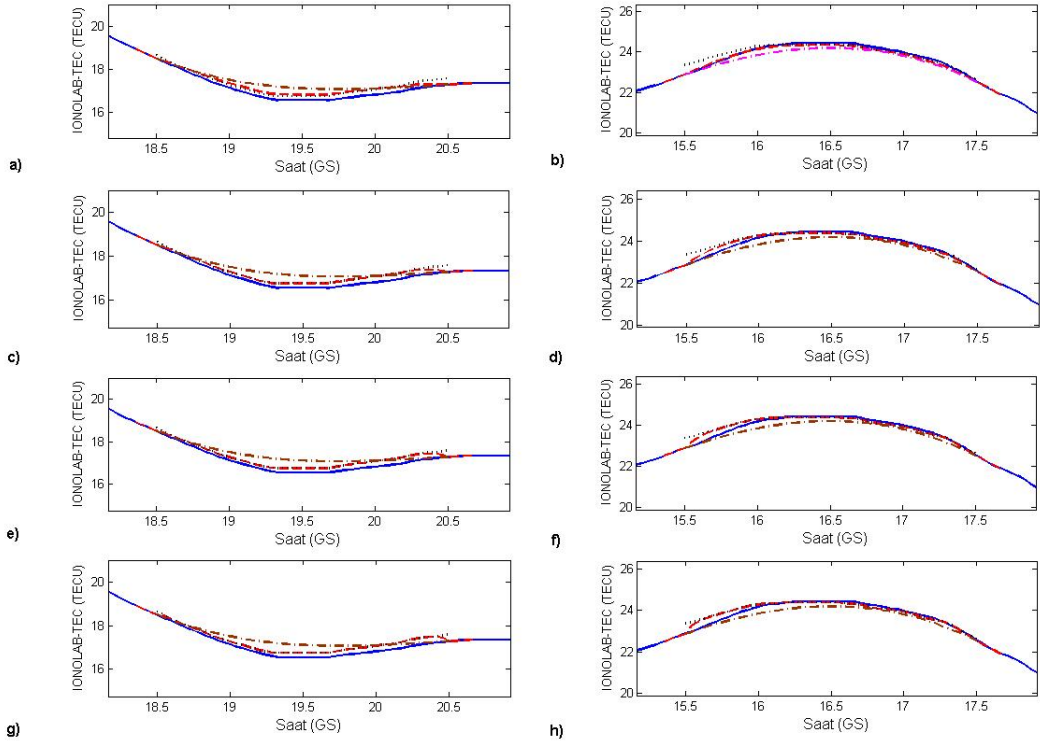
Şekil 2.6. a) Sistem başarımlar grafiği, b) ankr istasyonunun 06 Ekim 2010 tarihindeki TEİ değeri ile bir gün bir komşuluk kestirimlerinin karşılaştırılması.

kestirimler yapılmıştır. Aynı zamanda β değerinin 0.35 seçilmesi uzay aradeğerleme yöntemi ile zaman aradeğerleme yöntemi arasında yumuşak geçiş yapmasından ötürü çalışmanın devamında pratik olarak bu sabit kullanılarak kestirimler yapılmıştır.

tarih	$\beta = 0.1$	$\beta = 0.35$	$\beta = 0.5$	$\beta = 1$
31 Mart 2011	1.28×10^{-2}	1.12×10^{-2}	1.15×10^{-2}	1.18×10^{-2}
5 Ağustos 2011	3.75×10^{-3}	4.40×10^{-3}	5.23×10^{-3}	5.99×10^{-3}

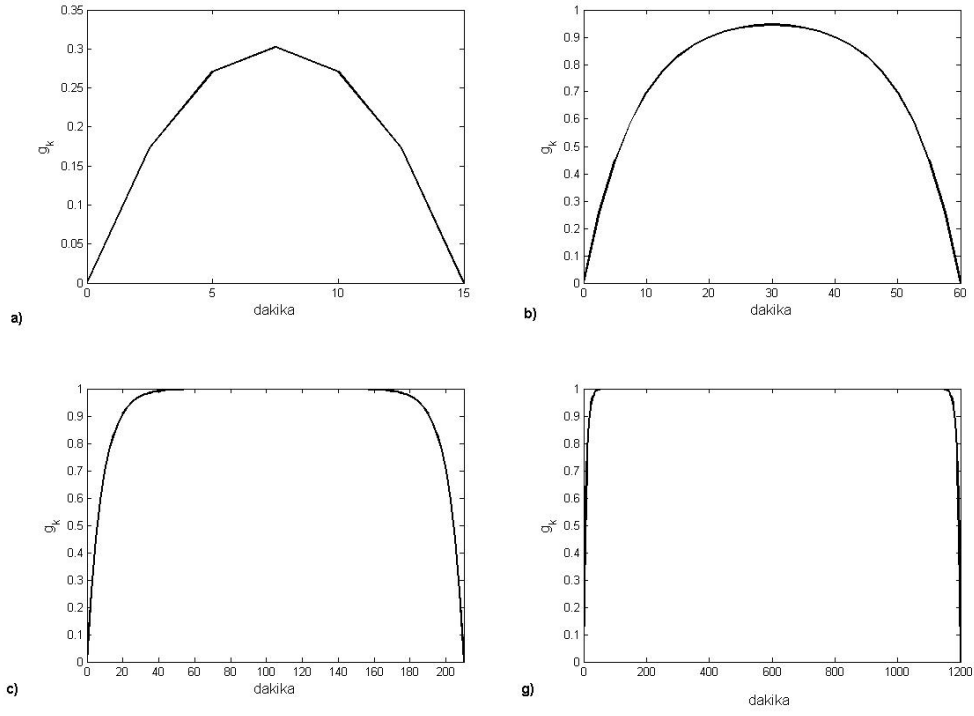
Çizelge 2.7. geme istasyonunun farklı β değerleriyle elde edilen TEİ kestirimleri düzeltilmiş hata tablosu

Şekil 2.8 dört farklı zaman aralığı için TEİ kestirimleri yapılırken $\beta = 0.35$ iken, Eşitlik 2.15 ile hesaplanmış g_k değerlerinin değişimini göstermektedir. Kopukluğun az olduğu zamanlarda g_k değerleri daha çok zamanda aradeğerleme yöntemine ağırlık verirken, kopukluk süresinin artmaya başlamasıyla uzayda aradeğerleme yöntemine yönelimin olduğu bu şekile bakılarak gözlemlenebilmektedir.



Şekil 2.7. gema istasyonunun farklı β değerleriyle elde edilen TEİ kestirimleri; 31 Mart 2011, a) $\beta=0.1$, c) $\beta=0.35$, e) $\beta=0.5$, g) $\beta=1$; 05 Ağustos 2011, b) $\beta=0.1$, d) $\beta=0.35$, f) $\beta=0.5$, h) $\beta=1$.

Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'da sırasıyla iyonkürenin sakin olarak adlandırıldığı 31 Mart 2011 tarihinde ve iyonkürenin bozulmalı olarak adlandırıldığı 05 Ağustos 2011 tarihinde, uzay ve zaman aradeğerleme yöntemlerinin bir araya getirilerek elde edilen TEİ kestirimleri gösterilmiştir. Şekil 2.9a ile Şekil 2.10a, 15 dakika için yapılan kestirimi gösterirken, Şekil 2.9b ile Şekil 2.10b, Şekil 2.9c ile Şekil 2.10c ve Şekil 2.9d ile Şekil 2.10d ise sırasıyla 1 saat, 3.5 saat ve 20 saatlik TEİ kestirimlerini göstermektedir. Her iki şekilde de $\hat{\mathbf{x}}_{U;d;c}$ uzay-zaman aradeğerleme kestirimini, $\hat{\mathbf{x}}_{U;d;R_r}$ uzaysal aradeğerleme kestirimini ve $\hat{\mathbf{x}}_{U;d;N_n}$, sadece zamanda aradeğerleme yöntemi ile elde edilen kestirimi ifade etmektedir. $\mathbf{x}_{U;d}$ ise gema istasyonunun o tarihte ölçümlerden elde edilen TEİ değerini göstermektedir. Her iki şekilde de görüldüğü üzere kestirim yapılacak zaman aralığı kısa ise zamanda aradeğerlemeye daha fazla ağırlık verilirken, kestirimin yapıldığı süre arttıkça kestirim uzayda aradeğerleme yöntemine yakınsamaktadır. Özellikle 20 saatlik kopukluğun olduğu şekilde zamanda aradeğerlemenin uç kısımların dışında TEİ değerinin değişiminden tamamen farklılaştığı görülürken, uzayda aradeğerlemenin başarımının çok yüksek olduğu görülmektedir.



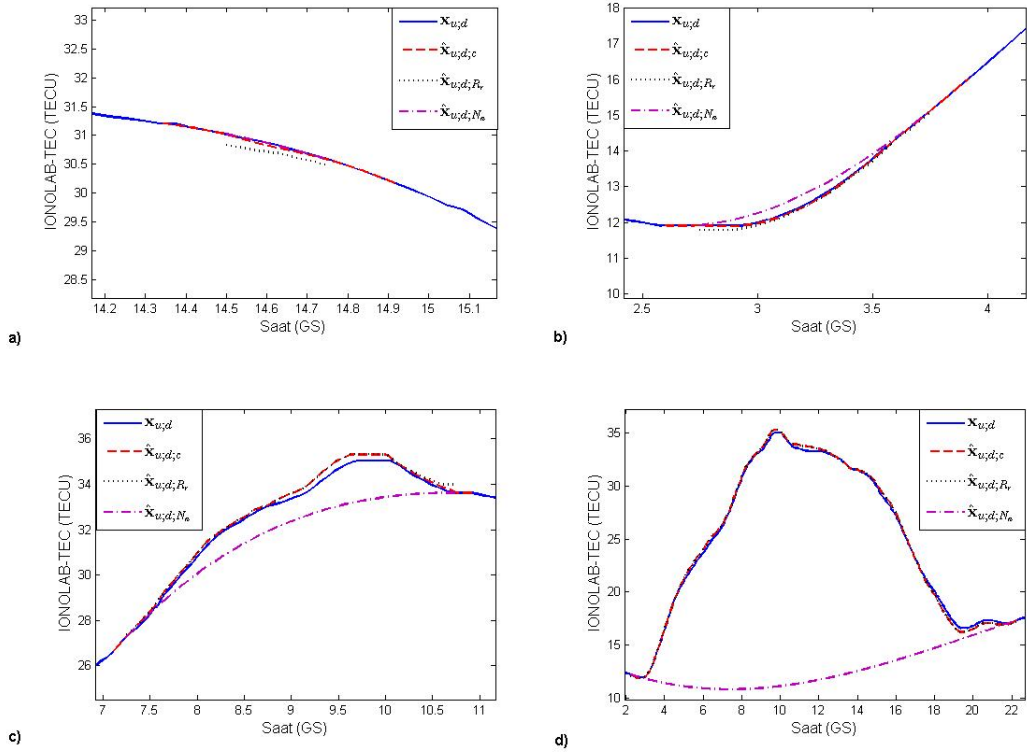
Şekil 2.8. Dört farklı zaman için uzay-zaman aradeğerleme yapılırken seçilen g_k değerlerinin değişimi, a) 15 dakika, b) 1 saat, c) 3.5 saat, d) 20 saat.

Kopukluk Süresi	$e_N(u; d)$	$e_{SKLD}(u; d)$
15 dakika	9.25×10^{-4}	1.71×10^{-7}
1 saat	2.00×10^{-3}	7.84×10^{-7}
3.5 saat	6.02×10^{-3}	4.20×10^{-6}
20 saat	9.30×10^{-3}	5.01×10^{-5}

Çizelge 2.8. gemi istasyonunun 31 Mart 2011 tarihinde TEİ kestirimleri hata normları

Kopukluk Süresi	$e_N(u; d)$	$e_{SKLD}(u; d)$
15 dakika	1.84×10^{-3}	2.84×10^{-7}
1 saat	1.22×10^{-2}	2.43×10^{-5}
3.5 saat	1.10×10^{-2}	3.36×10^{-5}
20 saat	1.80×10^{-2}	1.52×10^{-4}

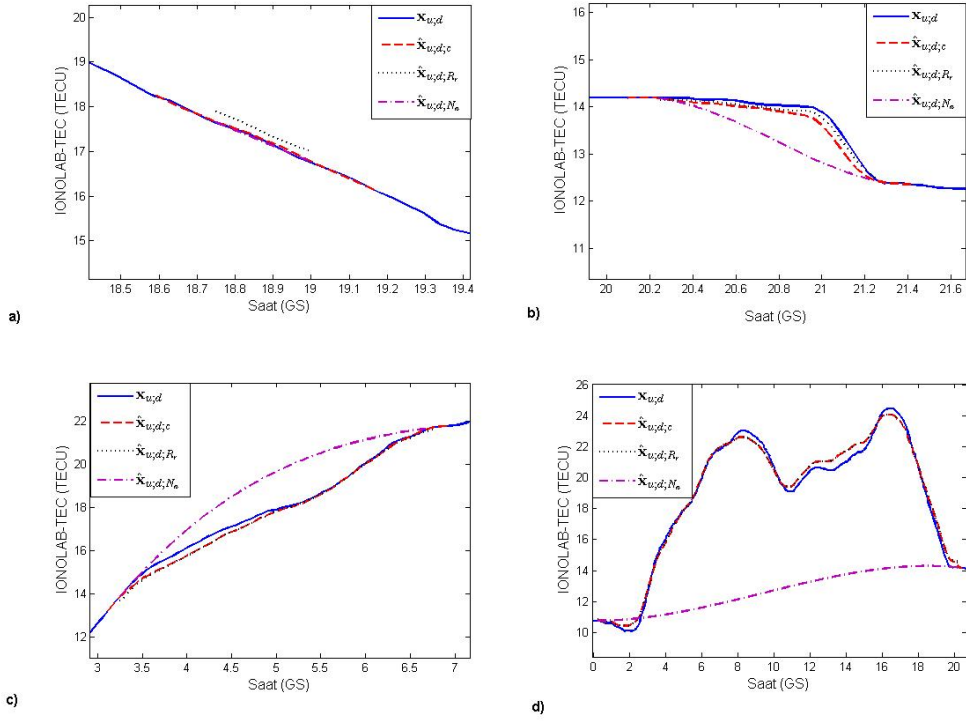
Çizelge 2.9. gemi istasyonunun 05 Ağustos 2011 tarihinde TEİ kestirimleri hata normları



Şekil 2.9. 31 Mart 2011 tarihinde gema istasyonunun TEİ değeri ve üç farklı fonksiyon ile TEİ kestirimleri, a) 15 dakika, b) 1 saat, c) 3.5 saat, d) 20 saat.

Çizelge 2.8 ve Çizelge 2.9'da ise sırasıyla 31 Mart 2011 ve 05 Ağustos 2011 tarihlerinde, uzay-zaman aradeğerleme yöntemi ile gema istasyonunun TEİ kestirimi ile gerçek değeri arasındaki farkın düzgelenmiş hata ve SKLD fonksiyonlarından elde edilen sonuçları verilmiştir. Tablolara bakıldığında zaman arttıkça yapılan hatanın her iki fonksiyon içinde arttığı görülmektedir. Çalışılan sistemlerin hassasiyetinin 3 TECU olduğu göz önüne alındığında, yapılan hataların ionkürenin sakin ve bozulmalı olduğu her iki durumda da hassasiyetten daha az olduğu görülmekte ve kestirimlerin her durumda başarılı yapıldığı gösterilmektedir [22].

Bu kısımda anlatılan çalışmalar 2001 ve 2011 yılları arasında TUSAGA ve TUSAGA-Aktif istasyonlarından alınan verilere uygulanmış ve sonuçları incelenmiştir. Bu sonuçlara örnek olarak bu çalışmadan çıkarılan makale EK 1'de sunulmuştur. Makalede yapılan çalışmalar orta enlem üzerinde bulunan istasyonlar için eksik veriye sahip olanların, eksikliklerinin tamamlanmasını sağlayarak veri kalitesinin artırılması sağlanmıştır. Böylelikle daha kaliteli ve yüksek çözünürlüklü yeni bir veri seti oluşturulmuş, çalışmaların daha güvenilir ve gürbüz olması amaçlanmıştır. Burada an-



Şekil 2.10. 05 Ağustos 2011 tarihinde gema istasyonunun TEİ değeri ve üç farklı fonksiyon ile TEİ kestirimleri, a) 15 dakika, b) 1 saat, c) 3.5 saat, d) 20 saat.

latılan yöntem ile orta enlem bölgesindeki herhangi bir istasyonun eksik verilerinin tamamlanarak, güvenilir bir veri seti üzerinden çalışmaların yapılmasına olanak sağlar.

3. TEİ KESTİRİMLERİNİN RASSAL FONKSİYON GÖSTERİMİ

İyonküre, dünyanın ve güneşin manyetik alanları; zamanda gün-tün döngüsü, mevsimlik ve yıllık değişimler; uzayda ise enlem ve boylam gibi birçok etmenle değişmektedir. Tüm bu etmenlerin tek tek etkilerinin gözlemlenmesi zor olduğundan, iyonküre katmanındaki değişimler istatistiksel yöntemlerle incelenir.

Konumda ve zamanda değişiklik gösteren birçok doğa olayı durağan olmayan uzay-zaman rassal fonksiyonları ile modellenmektedir [11, 16]. İyonküre katmanı geniş bir bölge ve zaman aralığında değişim gösterdiğinden ötürü durağan olmayan uzay-zaman rassal fonksiyonu ile modellenir. Durağan olmama durumu iyonküre katmanının beklentisinin konuma, zamana veya her ikisine birden bağlı olma durumu ile sınırlanır.

Kendisini oluşturan fiziksel olaylara göre rassal fonksiyon farklı uzay-zaman modelleri ile tanımlanabilir. Belli bir konumda ve belirli bir anda $Z(\mathbf{x}, t)$ rassal fonksiyonu ile verilen TEİ değerinin, bir yönseme fonksiyonu olan ve düşük frekans değişimlerini modelleyen $\mu(\mathbf{x}, t)$ ile beklentisi sıfır olan ve ani değişimleri modelleyen bir rassal kalıntı fonksiyonunun, $Y(\mathbf{x}, t)$ toplamı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir [11, 16].

$$Z(\mathbf{x}, t) = \mu(\mathbf{x}, t) + Y(\mathbf{x}, t) \quad (3.1)$$

Yukarıdaki eşitlikte $\mathbf{x} = [\theta \ \phi]^T$ konum vektörünü ifade ederken, θ enlemi (derece) ve ϕ boylamı (derece) göstermektedir. $[\cdot]^T$ ise matematiksel devriği operatörünü tanımlamaktadır. İyonküre tabakası konumda ve zamanda farklılık gösterdiğinden değişik yönseme fonksiyonları ile modellenebilir. TÜBİTAK 109E055 projesi kapsamında yapılan çalışmalarda Türkiye ve KKTC'yi kapsayan bölgede, iyonkürenin sakin ve bozulmalı günlerinde yönsemenin doğrusal olarak modellenebileceği gösterilmiştir [12, 13].

3.1 Doğrusal Yönseme Fonksiyonu

Orta enlem iyonküre modelini ifade eden doğrusal yönseme fonksiyonu uzayda herhangi bir noktada, \mathbf{x} ve herhangi bir anda, t , $\mu(\mathbf{x}, t)$ şeklinde gösterilir ve aşağıdaki

şekilde verilir:

$$\mu(\mathbf{x}, t) = a_1(t) + a_2(t)\theta + a_3(t)\phi \quad (3.2)$$

Burada $a_1(t)$ yönsemenin külçe değerini, $a_2(t)$ enlemin ve $a_3(t)$ boylamın katsayı değerlerini gösterir. Herhangi bir t_0 anında, yönseme modeli ölçüm noktalarından elde edilmiş TEİ kestirimleri kullanılarak aşağıdaki gibi matris formunda yazılabilir.

$$\mathbf{M}\mathbf{a}(t_0) = \mathbf{z}_s(t_0) \quad (3.3)$$

Burada \mathbf{M} doğrusal yönseme modelini ifade eder ve

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & \theta_1 & \phi_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \theta_{n_u} & \phi_{n_u} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \theta_{N_u} & \phi_{N_u} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

olarak gösterilir. N_u örnekleme noktalarının sayısıdır ve $1 \leq n_u \leq N_u$.

$\mathbf{a}(t_0)$, yönseme yüzeyinin t_0 anındaki parametrelerini gösterir ve Eşitlik 3.5 ile verilir.

$$\mathbf{a}(t_0) = [a_1(t_0) \quad a_2(t_0) \quad a_3(t_0)]^T \quad (3.5)$$

Eşitlik 3.3'te $\mathbf{z}_s(t_0)$, t_0 anında N_u ölçüm noktasından alınan TEİ değerlerini içeren vektörü tanımlar. Burada katsayı vektörünün enaz kareler yöntemi ile kestiriminin t_0 anında ölçüm değerinden kestirimi:

$$\hat{\mathbf{a}}(t_0) = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \mathbf{b}(t_0) \quad (3.6)$$

olarak elde edilir. Eşitlik 3.6 ile kestirilmiş doğrusal yönseme parametreleri kullanılarak, herhangi bir noktada, \mathbf{x} ve herhangi bir anda, t yönseme değeri:

$$\hat{\mu}(\mathbf{x}, t) = \hat{a}_1(t) + \hat{a}_2(t)\theta + \hat{a}_3(t)\phi \quad (3.7)$$

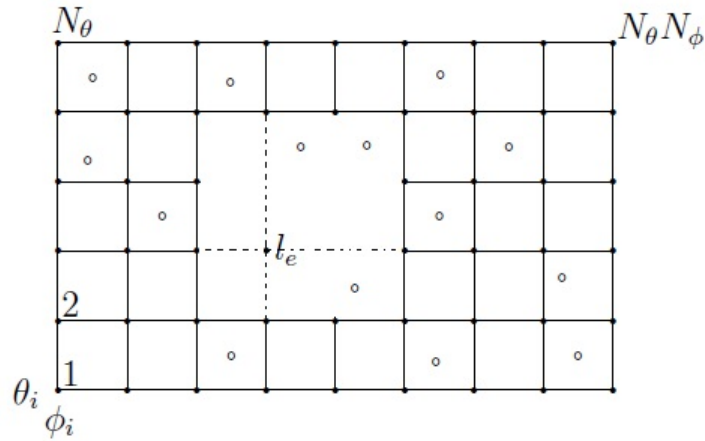
ile hesaplanır.

3.2 Veri Setinin Oluşturulması

Herbir alıcıdan fiziksel nedenlerden ötürü veri alınamadığından daha sık ve düzenli bir veri seti oluşturmak amacıyla ızgara tabanlı bir aradeğerleme yöntemi olan Uzaklığın Karesinin Tersi ile Ağırlıklandırma (UKTA) kullanılmıştır.

3.2.1 Izgara Yapısı ve İndeksleme

Yüksek çözünürlüklü TEİ haritaları oluşturmak için, uzayda ve zamanda belirli sıklıkla örneklenmiş noktalarda veri alınması gerekir. Uzayda ve zamanda her an her bir noktadan veri almak mümkün değildir. Bu yüzden yüksek çözünürlüklü haritaların oluşturulacağı alan üzerine istenilen sıklıkta bir ızgara yapısı yerleştirilir. Bu ızgara yapısı üzerindeki her bir noktanın TEİ kestirimi, örnekleme yapılan noktalardaki TEİ değerleri kullanılarak aradeğerleme yöntemleri ile hesaplanır.



Şekil 3.1. Izgara yapısı, (o) : Ölçüm noktaları, (·) : Izgara noktaları.

Herhangi bir θ enlemi ϕ boylamı ve t anında TEİ değerleri, $z(\theta, \phi, t)$ olarak gösterilebilir. Yüksek çözünürlüklü TEİ haritaları oluşturulmak istenen bölge θ yönünde N_θ , ϕ yönünde N_ϕ ve zamanda N_t sayıda pikselden oluşan bir ızgara ile ifade edilebilir. Noktalar piksel köşeleri olarak düşünüldüğünde p_θ ve p_ϕ sırasıyla uzayda θ ve ϕ yönlerindeki uzaklığı, p_t ise zaman aralığını göstermektedir. Bu durumda başlangıç noktası θ yönünde θ_i , ϕ yönünde ϕ_i ve zamanda t_i olan ızgara üzerindeki herhangi bir noktanın koordinatları n_θ , n_ϕ ve n_t cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [11].

$$\theta_{n_\theta} = \theta_i + p_\theta(n_\theta - 1), \quad 1 \leq n_\theta \leq N_\theta \quad (3.8)$$

$$\phi_{n_\phi} = \phi_i + p_\phi(n_\phi - 1), \quad 1 \leq n_\phi \leq N_\phi \quad (3.9)$$

$$t_{n_t} = t_i + p_t(n_t - 1), \quad 1 \leq n_t \leq N_t \quad (3.10)$$

Burada n_θ , n_ϕ ve n_t sırasıyla θ , ϕ yönlerinde ve zamandaki indisleri göstermektedir.

θ kuzey yarım kürede pozitif, güney yarımkürede negatif değerler alır. ϕ ise Greenwich meridyenin doğusunda pozitif, batısında negatif değerler alır.

Çok boyutlu uzayda tanımlanan noktalar leksikografik sıraya konarak tek bir boyutta ifade edilebilir ve leksikografik l_e indisi aşağıdaki gibi verilebilir.

$$l_e = n_\theta + (n_\phi - 1)N_\theta + (n_t - 1)N_\theta N_\phi, \quad 1 \leq l_e \leq N_\theta N_\phi N_t \quad (3.11)$$

Böylece üç boyutta tanımlanarak TEİ değeri yazılan $z(\theta_{n_\theta}, \phi_{n_\phi}, t_{n_t})$, l_e leksikografik indisi kullanılarak matematiksel hesaplama ve gösterim kolaylığı açısından tek boyutta yazılabilir.

$$z(l_e) = z(\theta_{n_\theta}, \phi_{n_\phi}, t_{n_t}) \quad (3.12)$$

$(\cdot)_N$ modülo N işlevini gösterirse n_θ , n_ϕ ve n_t indisleri l_e indisinden:

$$n_\theta = (l_e)_{N_\theta} \quad (3.13)$$

$$n_\phi = \left(\frac{l_e - n_\theta}{N_\theta} \right)_{N_\phi} + 1 \quad (3.14)$$

$$n_t = \frac{l_e - n_\theta - (n_\phi - 1)N_\theta}{N_\theta N_\phi} + 1 \quad (3.15)$$

yukarıda verilen eşitliklerle bulunabilir.

3.2.2 Uzaklığın Karesinin Tersine ile Ağırlıklandırma

Izgara tabanlı bir aradeğerleme yöntemi olan uzaklığın karesinin tersine ile ağırlıklandırma, istenilen bir noktadaki kestirim değerinin ölçülen değerlerin ağırlıklı ortalamasının alınmasıyla hesaplanır. Ağırlık katsayıları ise değeri hesaplanmak istenen izgara noktasının ölçüm noktalarına olan uzaklığının karesinin tersine ile orantılıdır. Kestirim değerleri aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanabilir [11].

$$\hat{z}_w(l_e) = \sum_{n_u=1}^{N_u} w_{l_e, n_u} z_s(\mathbf{x}_{n_u}) \quad (3.16)$$

$$w_{l_e, n_u} = \begin{cases} \frac{d_{l_e, n_u}^{-2}}{\sum_{n_u=1}^{N_u} d_{l_e, n_u}^{-2}}, & d_{l_e, n_u} \leq R \\ 0, & d_{l_e, n_u} \geq R \end{cases} \quad (3.17)$$

Yukarıdaki denklemde $\hat{z}_w(l_e)$, l_e . izgara noktasının kestirim değerini, $z_s(\mathbf{x}_{n_u})$, \mathbf{x}_{n_u} ölçüm noktasındaki TEİ değerini, N_u ölçüm noktasının sayısını gösterirken, d_{l_e, n_u} , \mathbf{x}_{n_u} ölçüm noktası ile l_e . izgara noktası arasındaki uzaklığı ifade eder. R ise aradeğerleme için kullanılacak istasyonlardan en uzağının alabileceği en büyük mesafedir.

Herhangi bir t_0 anında örnekleme noktalarından alınan veriler ve her bir örnekleme noktasının ağırlıklandırılacağı katsayılar vektör haline getirilerek denklemler kapalı forma dönüştürülebilir:

$$\mathbf{z}_s = [z_s(1) \cdots z_s(n_u) \cdots z_s(N_u)]^T, \quad 1 \leq n_u \leq N_u \quad (3.18)$$

$$\mathbf{w}_{l_e} = [w_{l_e, 1} \cdots w_{l_e, n_u} \cdots w_{l_e, N_u}]^T \quad (3.19)$$

$$\hat{z}_w(l_e) = \mathbf{w}_{l_e}^T \mathbf{z}_s \quad (3.20)$$

Herhangi bir t_0 anında izgara noktaları üzerindeki TEİ kestirim değerleri tek bir boyuta indirildiğinde aşağıda gösterildiği gibi vektör halinde yazılabilir.

$$\hat{\mathbf{z}}_w = [\hat{z}_w(1) \cdots \hat{z}_w(l_e) \cdots \hat{z}_w(N_\theta N_\phi)]^T \quad (3.21)$$

Burada anlatılan yöntemler kullanılarak Türkiye ve KKTC'yi kapsayan bölge üzerinde yapılan çalışmalar bulgular kısmında anlatılmıştır.

3.3 Bulgular

Bu çalışmada Türkiye iyonküre doğrusal yönseme modeli parametreleri kestirilerek yönseme haritaları oluşturulmuştur. Çalışma yapılırken Türkiye ve Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti'ni (KKTC) kapsayan bölge için TUSAGA-Aktif YKS alıcılarından Mayıs 2009'dan bu yana IONOLAB grubu tarafından özgün yöntemle kestirilen gürbüz ve yüksek çözünürlüklü TEİ değerleri kullanılmıştır. Daha sık ve düzenli veri seti oluşturmak amacıyla Türkiye ve KKTC'yi kapsayan $36^\circ - 42^\circ$ Kuzey enlemleri ve $26^\circ - 45^\circ$ Doğu boylamları arası aradeğerleme yapılmış ve aradeğerleme sonucu kestirilen TEİ değerleri kullanılarak orta enlem doğrusal yönseme model parametreleri kestirilmiştir.

TÜBİTAK 109E055 projesi kapsamında yapılan çalışmalarda orta enlem iyonküre yönsemesinin doğrusal olarak modellenebileceği gösterilmiştir. Bu çalışmanın ilk aşamasında Mayıs 2009 - Mayıs 2012 yılları arasında TUSAGA-Aktif YKS alıcı ağı üzerinde bulunan istasyonlardan alınan veriler kullanılmış ve Türkiye ve KKTC'yi kapsayan iyonkürenin doğrusal yönseme parametreleri kestirilmiştir. Daha sonra TUSAGA-Aktif istasyonlarının yönseme değerleri hesaplanarak, istasyonların TEİ değerleri ve yönseme değerleri arasındaki hataya Eşitlik 3.22 ile verilen düzgelenmiş yüzde hata ile bakılmıştır.

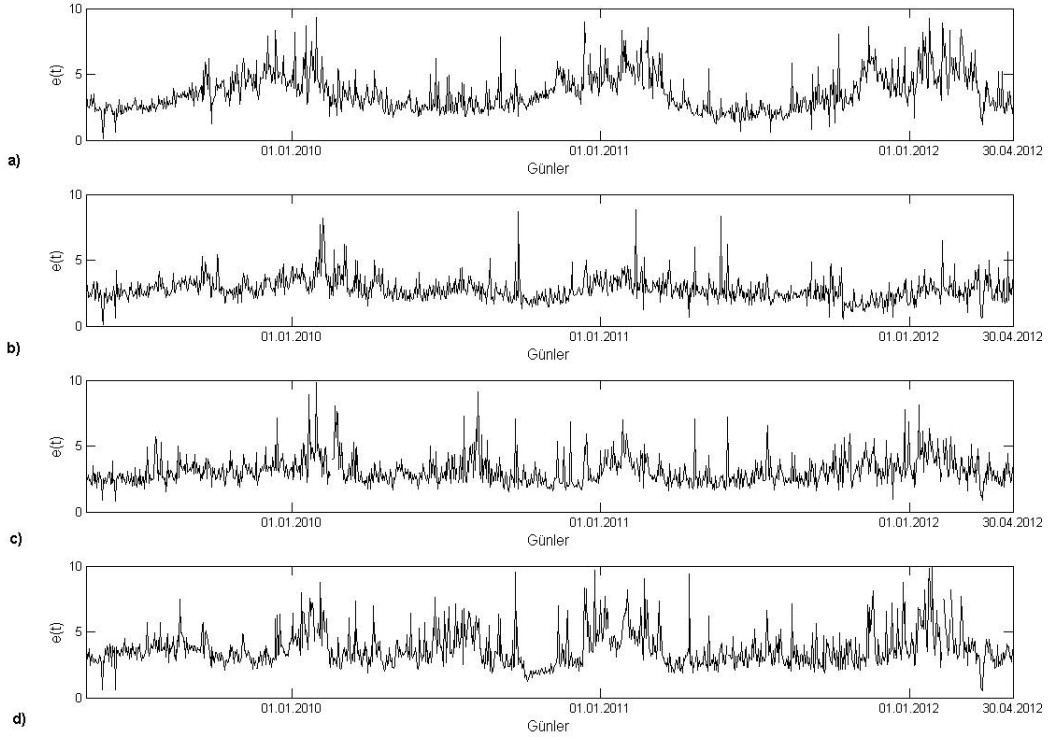
$$e(t) = \frac{\| \mathbf{z}_s(t) - \hat{\boldsymbol{\mu}}_s(t) \|_2}{\| \mathbf{z}_s(t) \|_2} \times 100 \quad (3.22)$$

Yukarıdaki eşitlikte $\boldsymbol{\mu}_s(t)$, herhangi bir t anında ölçüm noktalarında hesaplanan yönseme kestirimini ifade eder ve;

$$\hat{\boldsymbol{\mu}}_s(t) = [\hat{\mu}_s(1) \cdots \hat{\mu}_s(n_u) \cdots \hat{\mu}_s(N_u)]^T, \quad 1 \leq n_u \leq N_u \quad (3.23)$$

ile gösterilir.

Şekil 3.2'de Mayıs 2009 - Mayıs 2012 yılları arasında dört farklı saat için Eşitlik 3.22 ile hesaplanmış düzgelenmiş yüzde hata grafikleri gösterilmektedir. Şekil 3.2a, Şekil 3.2b, Şekil 3.2c ve Şekil 3.2d sırasıyla 0400 Greenwich Saati (GS), 1000 GS,

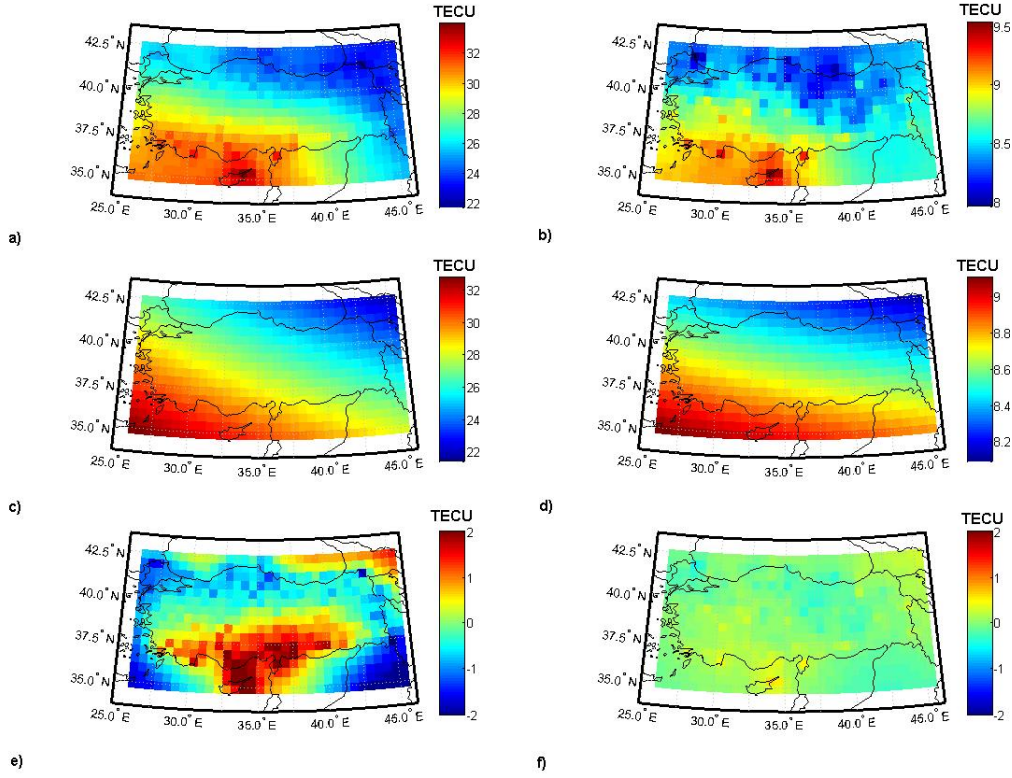


Şekil 3.2. Mayıs 2009 - Mayıs 2012 tarihleri arasında Türkiye iyonküresi ve yönse-mesi arasındaki düzgelenmiş yüzde hata grafikleri, a) 0400 GS, b) 1000 GS, c) 1600 GS, d) 2200 GS.

1600 GS ve 2200 GS için 3 yıllık hata grafikleridir. Her dört şekilde de hatalar yüzde 10'un altında olmakla beraber ortalamada sırasıyla yüzde 3.59, 2.79, 3.12 ve 3.70 hata oranlarına sahiptir. Orta enlem bölgesinde yer alan Türkiye üzerinde yapılan bu çalışma ile TÜBİTAK 109E055 projesi kapsamında elde edilen orta enlem iyonküresinin doğrusal olarak modellenebileceği sonucu desteklenmektedir.

Çalışma yapılırken daha düzgün ve sık veri seti elde etmek amacıyla ızgara tabanlı bir aradeğerleme yöntemi olan Uzaklığın Karesinin Tersine ile Ağırlıklandırma (UKTA) kullanılmıştır. UKTA yöntemi uygulanırken öncelikle Türkiye ve KKTC'yi kapsayan alan üzerine $0.5^0 \times 0.6^0$ çözünürlükte ızgara yerleştirilmiş ve daha sonra Eşitlik 3.16 ile her bir ızgara noktasının TEİ değeri kestirilmiştir. UKTA yöntemi ile kestirilen TEİ değerleri kullanılarak Türkiye ve KKTC üzerinde iyonküre haritaları oluşturulmuştur.

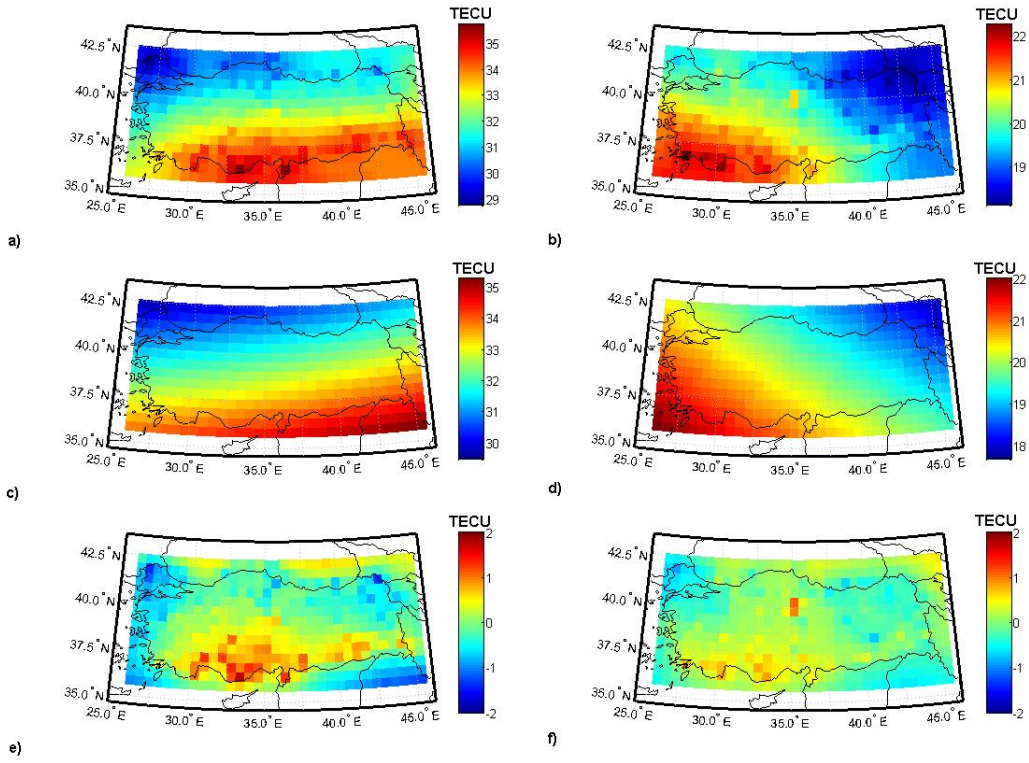
Şekil 3.3a ve Şekil 3.3b, 21 Mart 2011 (ilkbahar ekinoksu) tarihinde sırasıyla güneşin etkisinin Türkiye üzerinde en fazla olduğu saat 1000 GS'de ve güneşin etkisinin Türkiye üzerinde en az olduğu saat 2200 GS'de UKTA yöntemi ile hesaplanmış TEİ



Şekil 3.3. 21 Mart 2011 tarihinde Türkiye TEİ haritaları, a) UKTA 1000 GS, b) UKTA 2200 GS, c) yönseme haritası 1000 GS, d) yönseme haritası 2200 GS, e) rassal kalıntı haritası 1000 GS, f) rassal kalıntı haritası 2200 GS.

haritalarını göstermektedir. Şekil 3.4a ve Şekil 3.4b, 28 Nisan 2011 tarihinde yani iyonkürenin sakin olarak adlandırıldığı bir günde sırasıyla saat 1000 GS ve 2200 GS'de TEİ haritalarını gösterirken, Şekil 3.5a ve Şekil 3.5b, 05 Haziran 2011 tarihinde yani iyonkürenin bozulmalı olduğu bir günde sırasıyla saat 1000 GS ve 2200 GS'de TEİ haritalarını göstermektedir. Her üç şekilde de TEİ haritaları arasındaki farka bakıldığında gündüz saatlerinde güneşin etkinliğinin yüksek olmasından ötürü gece saatlerine göre elektron yoğunluğunun daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Aynı şekilde kış aylarından yaz aylarına doğru gidildikçe de güneşin etkinliğini kuzey yarım kürede arttırmışından ötürü elektron yoğunluğundaki artış üç şekile bakılarak gözlemlenebilmektedir.

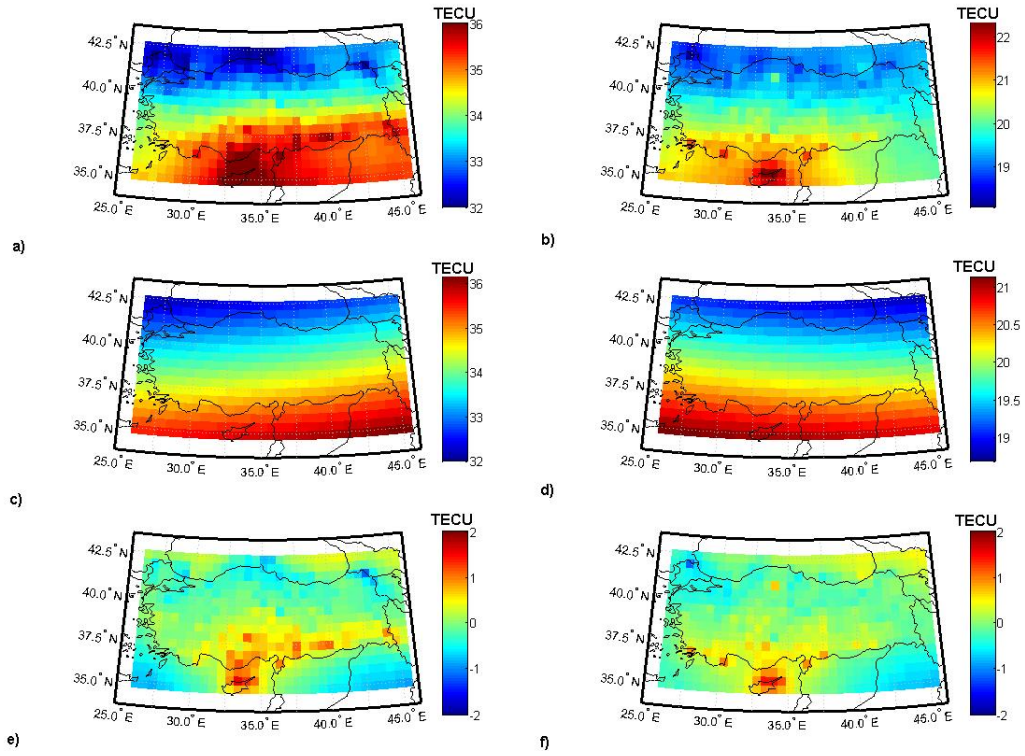
Çalışmanın devamında her bir ızgara noktasının TEİ değerleri kullanılarak, Eşitlik 3.6 ile Mayıs 2009 ve Mayıs 2012 arasında zamanda beş dakika çözünürlükte Türkiye iyonküre doğrusal yönsemesinin katsayıları kestirilmiştir. Kestirilen doğrusal yönseme katsayıları kullanılarak beş dakikada bir Türkiye ve KKTC'yi kapsayan iyon-



Şekil 3.4. 28 Nisan 2011 tarihinde Türkiye TEİ haritaları, a) UKTA 1000 GS, b) UKTA 2200 GS, c) yönseme haritası 1000 GS, d) yönseme haritası 2200 GS, e) rassal kalıntı haritası 1000 GS, f) rassal kalıntı haritası 2200 GS.

küre yönseme haritaları oluşturulmuştur.

Şekil 3.3c ve Şekil 3.3d, 21 Mart 2011 (ilkbahar ekinoksu) tarihinde sırasıyla güneşin etkisinin Türkiye üzerinde en fazla olduğu saat 1000 GS'de ve güneşin etkisinin Türkiye üzerinde en az olduğu saat 2200 GS'de Türkiye üzerinde ionküre yönseme haritalarını göstermektedir. Yönseme haritaları oluşturulurken öncelikle o anda TUSAGA-Aktif YKS alıcı ağı üzerinde çalışan istasyonlar kullanılarak UKTA yöntemi ile ızgara noktalarının TEİ değerleri hesaplanmış ve daha sonra hesaplanan TEİ değerleri kullanılarak Eşitlik 3.6 ile doğrusal yönseme katsayıları kestirilmiştir. Şekil 3.4c ve Şekil 3.4d, 28 Nisan 2011 tarihinde yani ionkürenin sakin olarak adlandırıldığı bir günde sırasıyla saat 1000 GS ve 2200 GS'de Türkiye ionküre yönseme haritalarını gösterirken, Şekil 3.5c ve Şekil 3.5d, 05 Haziran 2011 tarihinde yani ionkürenin bozulmalı olduğu bir günde sırasıyla saat 1000 GS ve 2200 GS'de Türkiye ionküre yönseme haritalarını göstermektedir. Şekil 3.3e ile Şekil 3.3f, Şekil 3.4e ile Şekil 3.4f ve Şekil 3.5e ile Şekil 3.5f ise sırasıyla 21 Mart 2011, 28 Nisan

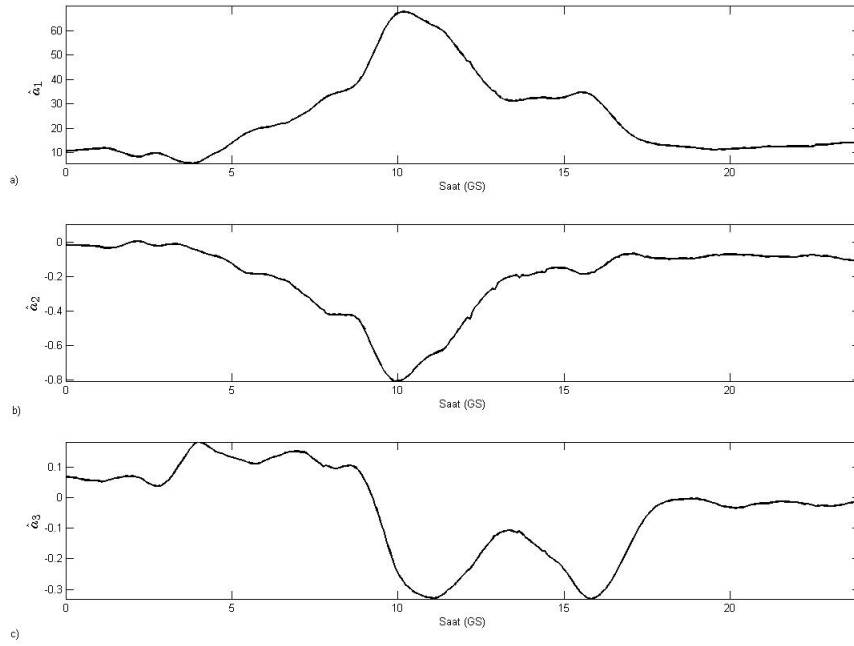


Şekil 3.5. 05 Haziran 2011 tarihinde Türkiye TEİ haritaları, a) UKTA 1000 GS, b) UKTA 2200 GS, c) yönseme haritası 1000 GS, d) yönseme haritası 2200 GS, e) rassal kalıntı haritası 1000 GS, f) rassal kalıntı haritası 2200 GS.

2011 ve 05 Haziran 2011 tarihlerinde, 1000 GS ve 2200 GS'de TEİ rassal fonksiyonundan yönseme değerleri çıkartılarak elde edilen rassal kalıntı fonksiyonunun Türkiye üzerinde konuma göre değişimini göstermektedir. Gündüz vakitlerinde güneşin etkisinin çok olmasından ötürü özellikle ülkemizin güney bölgesinde kalıntı fonksiyonu yüksek değerler göstermektedir. Gece saatlerinde ise TEİ değişimleri az olduğundan rassal kalıntı fonksiyonunun değışintisi de az olmaktadır. İyonkürenin 05 Haziran 2011 tarihinde özellikle gece saatlerinde bozulmalı olduğu ise rassal kalıntı fonksiyonunun değışintisinden, değışintinin gece saatlerinde bazı bölgelerde yüksek olmasından ötürü gözlemlenebilmektedir. Sonuç olarak her durumda yönseme haritalarının TEİ değerlerinden çok farketmediği, fırtınalı günlerde ise rassal kalıntı fonksiyonunun değışintisinin sakin günlere oranla daha fazla olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Zamanda beş dakika çözünürlükle hesaplanan doğrusal yönseme parametrelerine bakılarak günlük, yıllık ve üç yıllık değışimler incelenmiştir. Şekil 3.6'da Türkiye ve

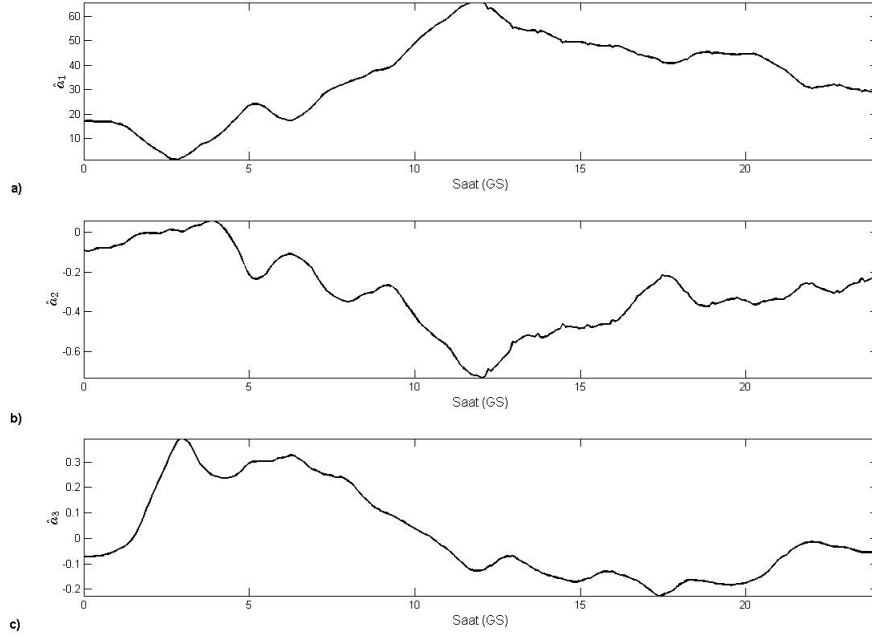
KKTC üzerinde 21 Mart 2011 tarihinde her beş dakika için hesaplanan parametre kestirimleri gösterilmiştir. Şekil 3.6a doğrusal yönseme modelinin külçe değerini gösterirken, Şekil 3.6b ve Şekil 3.6c sırasıyla enlemin ve boylamın katsayı değerlerini gösterir. Burada açıkça görüldüğü gibi külçe değeri gün içerisindeki TEİ değeriyle doğrusal olarak değişir. Enlemin katsayısı, güneşin etkisinin en yüksek olduğu saatlerde Türkiye'nin konumuna bağlı olarak güneyine daha fazla ağırlık verecek şekilde artarken, gece saatlerinde ise enleme bağlılığın azaldığını gösterecek şekilde değişmektedir. Boylamın katsayısı ise güneşin doğudan batıya doğru olan hareketine göre değişim göstermektedir. Özellikle enlemin ve boylamın katsayılarının değişimlerine bakılarak geceleri elektronların iyonlar ile birleşmesinin, iyonlaşmadan daha farklı şekilde olduğu ve aynı oranda olmadığı gözlemlenmektedir.



Şekil 3.6. 21 Mart 2011 tarihinde Türkiye doğrusal yönseme yüzeyi parametre kestirimleri a) \hat{a}_1 , b) \hat{a}_2 , c) \hat{a}_3 .

Şekil 3.7'de ise Türkiye ve KKTC üzerinde 05 Haziran 2011 tarihinde yani iyonkürenin bozulmalı olduğu bir günde her beş dakika için hesaplanan parametre kestirimleri gösterilmiştir. Şekil 3.7a doğrusal yönseme modelinin külçe değerini gösterirken, Şekil 3.7b ve Şekil 3.7c sırasıyla enlemin ve boylamın katsayı değerlerini gösterir. Burada açıkça görüldüğü gibi külçe değeri gün içerisindeki TEİ değeriyle doğrusal olarak değişir. Enlemin katsayısı, güneşin etkisinin en yüksek olduğu saatlerde Türkiye'nin konumuna bağlı olarak güneyine daha fazla ağırlık verecek şekilde artarken,

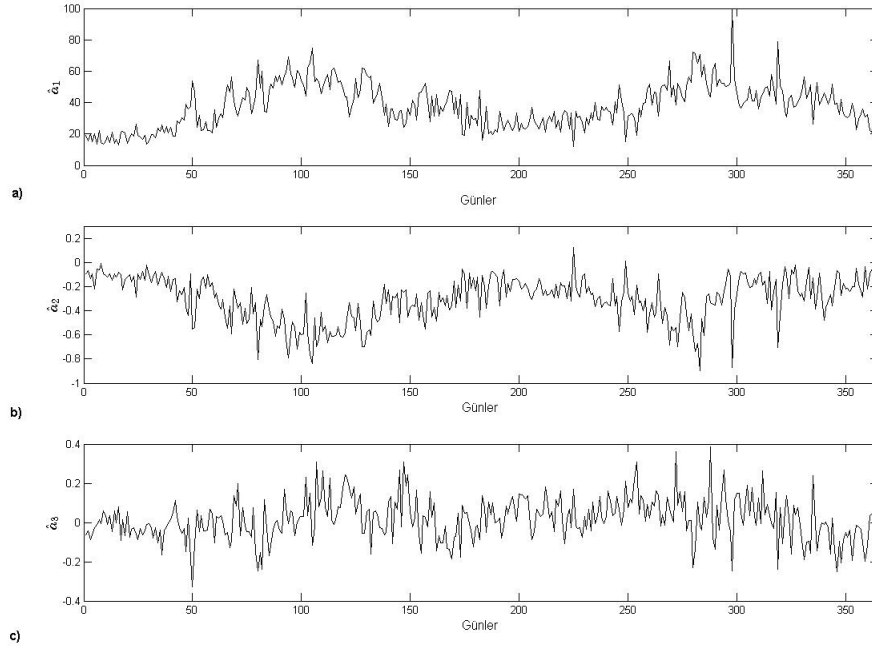
gece saatlerinde ise enleme bağıllığın azaldığını gösterecek şekilde değişmektedir. Boylamın katsayısı ise güneşin doğudan batıya doğru olan hareketine göre değişim göstermektedir. Günün erken saatlerinden başlayarak özellikle akşam vakitlerinde iyonküredeki bozulmanın etkileri her üç parametrenin günlük değişimine bakılarak gözlemlenebilmektedir.



Şekil 3.7. 05 Haziran 2011 tarihinde Türkiye doğrusal yönseme yüzeyi parametre kestirimleri a) \hat{a}_1 , b) \hat{a}_2 , c) \hat{a}_3 .

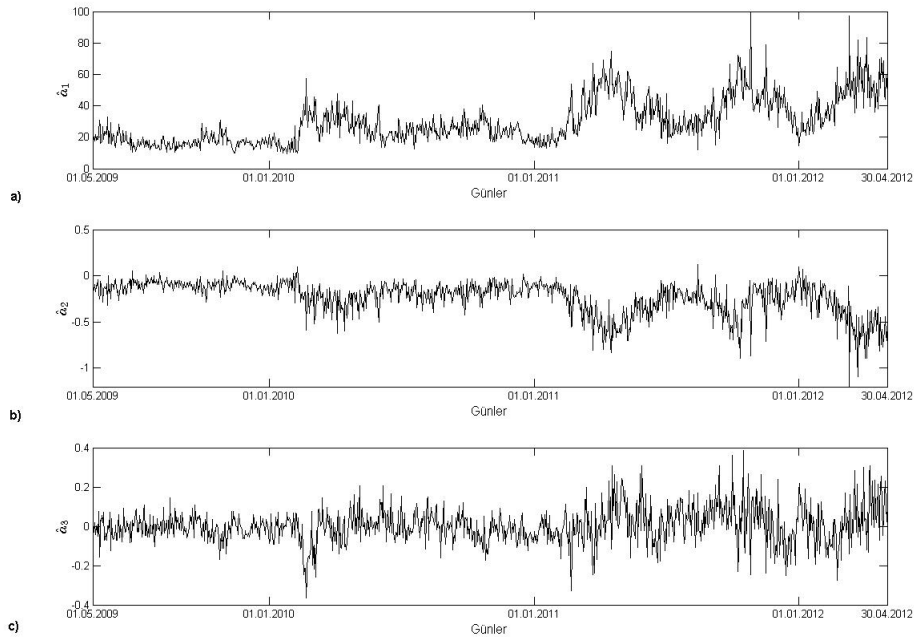
Şekil 3.8, Türkiye ve KKTC üzerinde 2011 yılında 1000 GS'de hesaplanan parametre kestirimleri gösterilmiştir. Şekil 3.8a, doğrusal yönseme modelinin külçe değerini gösterirken, Şekil 3.8b ve Şekil 3.8c sırasıyla enlemin ve boylamın katsayı değerlerini gösterir. Burada her üç parametreye de bakılarak iyonkürenin mevsimsel değişimleri gözlemlenebilmektedir. Özellikle ilkbahar ekinoksu ve yaz gündönümü ile sonbahar ekinoksu ve kış gündönümü arasında güneşin etkisinin anlık değişimi, güneşin Türkiye üzerinde en etkili olduğu 1000 GS'deki değişimle gözlemlenmektedir.

Şekil 3.9'da ise Türkiye ve KKTC üzerinde Mayıs 2009 - Mayıs 2012 tarihleri arasında 1000 GS'de hesaplanan parametre kestirimleri gösterilmiştir. Şekil 3.9a doğrusal yönseme modelinin külçe değerini gösterirken, Şekil 3.9b ve Şekil 3.9c sırasıyla enlemin ve boylamın katsayı değerlerini gösterir. 2009 ve 2010 yıllarında gü-



Şekil 3.8. 2011 yılının her günü için 1000 GS'de Türkiye doğrusal yönseme yüzeyi parametre kestirimleri a) \hat{a}_1 , b) \hat{a}_2 , c) \hat{a}_3 .

neş lekesi sayısının düşük olması ve 2011 yılındaki artış ile birlikte üç parametrede değişiminin artmasına neden olmaktadır. Güneş lekesi sayısındaki bu artış aynı zamanda Şekil 3.9a'da görülen doğrusal yönseme katsayılarının ilk parametresi olan külçe etkisinde seviye farkını oluşturmuştur.



Şekil 3.9. Mayıs 2009 - Mayıs 2012 tarihleri arasında her gün için 1000 GS'de Türkiye doğrusal yönseme yüzeyi parametre kestirimleri a) $\hat{\alpha}_1$, b) $\hat{\alpha}_2$, c) $\hat{\alpha}_3$.

4. KRİGLEME

Krigleme jeoistatistik bir kestirim yöntemidir. Maden, jeoloji, hidrojeoloji ve geomatik gibi birçok alanda bu kestirim yönteminden yararlanılır. Bu yöntem ölçüm noktalarından alınan değerler ile doğrusal olarak ve kestirim hatasının değişimini yansızlığını en aza indirerek bulunduğu için en iyi doğrusal yansız kestirici (BLUE) olarak bilinir. Ortalamalı, Ortalamasız, Evrensel ve Eş Krigleme gibi birçok türü vardır [11, 14, 15, 16].

Krigleme yönteminin temelinde rassal fonksiyonun konuma bağlılığının belirlenmesi gereklidir. Ölçüm noktalarının konumsal bağlılığı bilirse en iyi kestirim yapılabilir. Bu yüzden konumda bağlılığı tanımlamak amacıyla Yarı Değişinti Serimi (YDS) kullanılabilir [11].

4.1 Yarı Değişinti Serimi (YDS)

YDS, verilerin ortalama değerlerinin sabit olduğu koşulu altında, herbir ölçüm noktasından belirli uzaklıktaki olası tüm diğer ölçüm noktaları arasındaki farkın varyanslarının toplamının yarısı olarak hesaplanır ve aşağıdaki gibi gösterilir:

$$\gamma(\mathbf{h}, t) = \frac{1}{2} \text{var}\{Z(\mathbf{x}, t) - Z(\mathbf{x} + \mathbf{h}, t)\} \quad (4.1)$$

Burada $Z(\mathbf{x}, t)$ rassal fonksiyonu, belirli bir $\mathbf{x} = [\theta \ \phi]^T$ konumunda ve t anında TEİ değerini gösterirken, $Z(\mathbf{x} + \mathbf{h}, t)$, t anında \mathbf{x} konumundan \mathbf{h} kadar uzakta olan noktanın TEİ değerini ve $\text{var}(\cdot)$ ise değişinti fonksiyonunu ifade etmektedir. $Z(\mathbf{x})$ rassal fonksiyonunun YDS fonksiyonu yönünden bağımsız olarak hesaplanıyorsa, rassal fonksiyon yön bağımsız olarak adlandırılır [11]. Eşitlik 4.1'den yararlanılarak örnekleme noktalarından alınan değerlerin YDS fonksiyonu yansız kestirici ile aşağıdaki forma dönüştürülebilir:

$$\hat{\gamma}(\mathbf{h}, t) = \frac{1}{2N(\mathbf{h}, t)} \sum_{n_u=1}^{N(\mathbf{h}, t)} (z_s(\mathbf{x}_{n_u}, t) - z_s(\mathbf{x}_{n_u} + \mathbf{h}, t))^2 \quad (4.2)$$

Burada $z_s(\mathbf{x}_{n_u}, t)$, \mathbf{x}_{n_u} konumunda ($\mathbf{x}_{n_u} = [\theta_{n_u} \ \phi_{n_u}]^T$), t anında rassal ölçümü; $N(\mathbf{h}, t)$ uzayda birbirinden \mathbf{h} vektörü kadar konum farkı nokta çiftlerinin sayısını verir. Her an her noktadan örnek alınamadığından ötürü \mathbf{h} kesin bir uzunluk ifade etmekten

ziyade, belli bir aralık ($\mathbf{h} - \Delta\mathbf{h} < \mathbf{h} < \mathbf{h} + \Delta\mathbf{h}$) içerisinde kalan uzunluğu ifade etmektedir. Eşitlik 4.2 ile verilen semiveriogram kestirim denklemi aynı zamanda deneysel YDS olarak da adlandırılır.

Yaygın olarak kullanılan teorik YDS fonksiyon modelleri üssel, Gauss, küresel ve hepsini kapsayan Matern YDS fonksiyonları belirli bir t anı için sırası ile aşağıda verilmiştir [11, 15].

$$\gamma_e(h) = \begin{cases} 0 & , h = 0 \\ a_e + \sigma_e^2(1 - \exp(-\frac{h}{d})) & , h > 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

$$\gamma_g(h) = \begin{cases} 0 & , h = 0 \\ a_g + \sigma_g^2(1 - \exp(-\frac{h^2}{d^2})) & , h > 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\gamma_{sp}(h) = \begin{cases} 0 & , h = 0 \\ a_{sp} + \sigma_{sp}^2(\frac{3h}{2d} - \frac{h^3}{2d^2}) & , 0 < h \leq d \\ a_{sp} + \sigma_{sp}^2 & , h > d \end{cases} \quad (4.5)$$

$$\gamma_m(h) = \begin{cases} 0 & , h = 0 \\ a_m + \sigma_m^2 \left(\frac{2h^\nu}{(2d)^\nu \Gamma(\nu)} K_\nu \left(\frac{h}{d} \right) \right) & , h > 0 \end{cases} \quad (4.6)$$

Yukarıdaki eşitliklerde a_e , a_g , a_{sp} ve a_m sırasıyla üssel, Gauss, küresel ve Matern fonksiyonları için külçe etkileri, σ_e , σ_g , σ_{sp} ve σ_m sırasıyla kısmi eşik değerleri, h ölçüm noktaları arasındaki uzaklık, d ise yapısal uzaklık olarak tanımlanır. Yapısal uzaklık farklı iki noktadaki rassal değişkenler arasındaki ilişkinin kaybolduğu uzaklıktır. $K_\nu(\cdot)$ ise ikinci dereceden ν mertebesinde düzenlenmiş Bessel fonksiyonunu ifade ederken, $\Gamma(\cdot)$ gamma fonksiyonu tanımlar.

Belirli bir t_0 anında \mathbf{x} noktasındaki TEİ kestirimi Krigleme yöntemi ile ölçüm noktalarının doğrusal bileşimi olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\hat{z}_k(\mathbf{x}) = \sum_{n_u=1}^{N_u} w_{n_u} z_s(\mathbf{x}_{n_u}) \quad (4.7)$$

Burada $\hat{z}_k(\mathbf{x})$, \mathbf{x} noktasındaki TEİ değerinin Krigleme kestirimi, $z_s(\mathbf{x}_{n_u})$ n_u . ölçüm noktasının TEİ kestirimi ve w_{n_u} ise n_u . ölçüm noktasının ağırlıklandırılacağı katsayıdır. Herhangi bir t_0 anında bir ızgara üzerine yerleştirilmiş, Krigleme yöntemi ile elde edilmiş TEİ kestirimleri leksikografik sırada dizilerek aşağıda gösterildiği gibi vektör halinde yazılabilir.

$$\hat{\mathbf{z}}_k = [\hat{z}_k(1) \cdots \hat{z}_k(l_e) \cdots \hat{z}_k(N_\theta N_\phi)]^T \quad (4.8)$$

Aşağıdaki bölümde Ortalamalı, Ortalamasız ve Evrensel Krigleme yöntemleri anlatılmış ve Evrensel Krigleme yöntemi için hatanın varyansını yansız kestirim elde edilecek şekilde enküçükleme yöntemi ile Krigleme ağırlıklarının hesaplanması gösterilmiştir.

4.2 Ortalamalı Krigleme

Ortalomalı Krigleme yönteminde, $Z(\mathbf{x})$ rassal fonksiyonunun, ikinci dereceden durağanlık özelliği gösterdiği ve beklentisinin $E\{Z(\mathbf{x})\} = \mu$ bilindiği kabul edilir. $Z(\mathbf{x})$ rassal fonksiyonunun ikinci dereceden durağan olması için ise aşağıdaki eşitlikler sağlanmalıdır.

$$E\{Z(\mathbf{x})\} = \mu \quad (4.9)$$

$$E\{(Z(\mathbf{x} - \mu)(Z(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - \mu)\} = cov(\mathbf{h}) \quad (4.10)$$

burada $cov(\cdot)$ eşdeğişinti işlevini göstermektedir.

Ortalamasız ve Evrensel Krigleme yöntemlerinde kullanılan Eşitlik 4.7'deki kestirim ifadesinden farklı olarak, Ortalamalı Krigleme yönteminde,

$$\hat{z}_k(\mathbf{x}) = \sum_{n_u=1}^{N_u} w_{n_u} (z_s(\mathbf{x}_{n_u}) - \mu) + \mu \quad (4.11)$$

kestirim fonksiyonu kullanılır.

4.3 Ortalamasız Krigleme

Ortalamasız Krigleme yönteminde, beklentinin, $E\{Z(\mathbf{x})\} = \mu$, sabit olduğu fakat bilinmediği ve rassal fonksiyonun özünü duraganlık özelliği gösterdiği kabul edilir. $\mu(\mathbf{x}) = \mu$ için, özünü duraganlık rassal fonksiyonun aşağıdaki eşitlikleri sağlaması ile tanımlanır:

$$E\{Z(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})\} = 0 \quad (4.12)$$

$$\text{var}\{Z(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})\} = 2\gamma(\mathbf{h}) \quad (4.13)$$

Yukarıdaki eşitlikte $\gamma(\mathbf{h})$ semivariogram fonksiyonudur. Ortalamasız Krigleme kestirimi Eşitlik 4.7'de verilmektedir.

4.4 Evrensel Krigleme

Evrensel krigleme yöntemi rassal fonksiyonun beklentisinin bilinmediği ve konumla değiştiği varsayımı altında uygulanır. Bu yöntemde rassal fonksiyonun beklentisinin bilinen fonksiyonların doğrusal bileşimi olduğu kabul edilir.

$$\mu(x) = E\{Z(x)\} = \sum_{n_k=1}^{N_k-1} w_{n_k} f_{n_k}(\mathbf{x}), \quad f_0(\mathbf{x}) = 1 \quad (4.14)$$

Burada N_k beklentinin içerdiği fonksiyon sayısını, w_{n_k} , n_k . fonksiyonun ağırlıklandırılacağı katsayıyı, $f_{n_k}(\cdot)$ ise bilinen fonksiyonları tanımlamaktadır. Bu yöntem uygulanırken rassal fonksiyondan beklentinin çıkarılmasıyla bulunan kalıntı fonksiyonunu duragan olarak kabul edilir.

$$Y(\mathbf{x}) = Z(\mathbf{x}) - \mu(\mathbf{x}) \quad (4.15)$$

$$\text{var}\{Y(\mathbf{x}) - Y(\mathbf{x} + \mathbf{h})\} = 2\gamma(\mathbf{h}) \quad (4.16)$$

Daha öncede belirtildiği gibi Krigleme kestirimi yansız bir kestirimdir. Bu koşulun sağlanması için Eşitlik 4.7 ile verilen Krigleme kestiriminden yararlanılarak aşağıdaki eşitlik ile yansızlık koşulu sağlanır.

$$\sum_{n_u=1}^{N_u} w_{n_u} f_{n_k}(\mathbf{x}_{n_u}) = f_{n_k}(\mathbf{x}), \quad n_k = 1, \dots, N_k \quad (4.17)$$

Buradan kestirim hatası,

$$\hat{Z}_k(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x}) = \sum_{n_u=1}^{N_u} w_{n_u} Y_s(\mathbf{x}_{n_u}) - Y(\mathbf{x}) \quad (4.18)$$

eşitliği ile bulunurken, hata varyansı,

$$\begin{aligned} \sigma_k^2 &= \text{var} \left\{ \sum_{n_u=1}^{N_u} w_{n_u} Y_s(\mathbf{x}_{n_u}) - Y(\mathbf{x}) \right\} \\ &= \sum_{n_u=1}^{N_u} \sum_{n_a=1}^{N_u} w_{n_u} w_{n_a} \text{cov} \{ Y_s(\mathbf{x}_{n_u}) - Y(\mathbf{x}), Y_s(\mathbf{x}_{n_a}) - Y(\mathbf{x}) \} \\ &= \sum_{n_u=1}^{N_u} \sum_{n_a=1}^{N_u} w_{n_u} w_{n_a} [\gamma_Y(\mathbf{x}_{n_u}, \mathbf{x}) + \gamma_Y(\mathbf{x}_{n_a}, \mathbf{x}) - \gamma_Y(\mathbf{x}_{n_u} - \mathbf{x}_{n_a})] \\ &= 2 \sum_{n_u=1}^{N_u} w_{n_u} \gamma_Y(\mathbf{x}_{n_u} - \mathbf{x}) - \sum_{n_u=1}^{N_u} \sum_{n_a=1}^{N_u} w_{n_u} w_{n_a} \gamma_Y(\mathbf{x}_{n_u} - \mathbf{x}_{n_a}) \end{aligned} \quad (4.19)$$

eşitlikleri ile hesaplanır.

Yansızlık koşullarından yararlanılarak çıkarılan Lagrange fonksiyonunun,

$$L(w_{n_u}, \lambda) = \sigma_k^2 + 2\lambda_0 \left(\sum_{n_u=1}^{N_u} w_{n_u} - 1 \right) + 2 \sum_{n_k=1}^{N_k-1} \lambda_{n_k} \left(\sum_{n_u=1}^{N_u} w_{n_u} f_{n_k}(\mathbf{x}_{n_u}) - f_{n_k}(\mathbf{x}) \right) \quad (4.20)$$

ağırlık katsayıları w_{n_u} , $n_u = 1, \dots, N_u$ ve Lagrange çarpanlarına λ_{n_k} , $n_k = 0, \dots, N_k - 1$ göre alınan ve aşağıdaki eşitliklerle verilen kısmi türevler sıfıra eşitlenerek Krigleme

denklemleri çıkartılır.

$$\frac{\partial L}{\partial w_{n_u}} = 2\gamma_Y(\mathbf{x}, \mathbf{x}_{n_u}) - 2 \sum_{n_a=1}^{N_u} w_{n_a} \gamma_Y(\mathbf{x}_{n_u}, \mathbf{x}_{n_a}) + 2\lambda_0 + 2 \sum_{n_k=1}^{N_k-1} \lambda_{n_k} f_{n_k}(\mathbf{x}_{n_u}) \quad (4.21)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_0} = 2 \left(\sum_{n_u=1}^{N_u} w_{n_u} - 1 \right) \quad (4.22)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_{n_k}} = 2 \left(\sum_{n_u=1}^{N_u} w_{n_u} f_{n_k}(\mathbf{x}_{n_u}) - f_{n_k}(\mathbf{x}) \right), \quad n_k = 1, \dots, N_k - 1 \quad (4.23)$$

Yukarıdaki denklemler sıfıra eşitlenerek matris formatına dönüştürülür ise, katsayı vektörü:

$$\boldsymbol{\Omega} = \boldsymbol{\Delta}^{-1} \mathbf{y}_l \quad (4.24)$$

şeklinde bulunabilir. Yukarıdaki denklemde

$$\boldsymbol{\Omega} = [w_1 \cdots w_{N_u} \lambda_0 \cdots \lambda_{N_k-1}]^T$$

$$\boldsymbol{\Delta} = \begin{bmatrix} \gamma_Y(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_1) & \cdots & \gamma_Y(\mathbf{x}_{N_u}, \mathbf{x}_1) & 1 & f_1(\mathbf{x}_1) & \cdots & f_{N_k-1}(\mathbf{x}_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_Y(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_{N_u}) & \cdots & \gamma_Y(\mathbf{x}_{N_u}, \mathbf{x}_{N_u}) & 1 & f_1(\mathbf{x}_{N_u}) & \cdots & f_{N_k-1}(\mathbf{x}_{N_u}) \\ 1 & \cdots & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ f_1(\mathbf{x}_1) & \cdots & f_1(\mathbf{x}_{N_u}) & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{N_k-1}(\mathbf{x}_1) & \cdots & f_{N_k-1}(\mathbf{x}_{N_u}) & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{y}_l = [\gamma_Y(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_1) \cdots \gamma_Y(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_{N_u}) \quad 1 \quad f_1(\mathbf{x}_l) \cdots f_{N_k-1}(\mathbf{x}_l)]^T$$

olarak tanımlanmıştır. Katsayı vektörünün hesaplanmasıyla elde edilen w_{n_u} ağırlık katsayılarıyla Krigleme kestirimleri yapılır.

4.5 Bulgular

Bu kısımda Krigleme katsayıları hesaplanarak Türkiye iyonküre haritaları oluşturulmuştur. Çalışma yapılırken öncelikle Bölüm 3'te elde edilen orta enlem doğrusal yönseme parametreleri kullanılarak ızgara noktaları için yönseme değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra Evrensel Krigleme yapılması amacıyla Bölüm 3'te daha sık ve düzenli veri seti oluşturmak amacıyla uzaklığın karesinin tersi yöntemiyle kestirilen TEİ değerlerinden, bu noktalardaki yönseme değerleri çıkartılarak, Eşitlik 4.25 ile verilen ızgara noktalarının kalıntı değerleri elde edilmiştir. Hesaplanan kalıntı fonksiyonu ile deneysel YDS fonksiyonları hesaplanmış ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ile bu deneysel YDS fonksiyonuna en iyi uyarlanmış Matern fonksiyonunun dört parametresi kestirilmiştir. Elde edilen dört parametre kullanılarak kestirilmiş teorik YDS fonksiyonu ve gerçek ölçüm noktalarından alınmış örnekleme değerleri kullanılarak Evrensel Krigleme yöntemi ile haritalar elde edilmiştir.

$$\hat{y}_w(l_e, t) = z_w(l_e, t) - \hat{\mu}_w(l_e, t) \quad (4.25)$$

Çalışmanın ilk aşamasında hesaplanan deneysel YDS fonksiyonları, kalıntı fonksiyonlarından yön bağımsız olarak hesaplanmıştır. Böylece herbir istasyon merkezli r yarıçaplı çemberler oluşturulmuş, çember üzerindeki istasyonlar kullanılarak r uzaklığı için deneysel YDS değeri hesaplanmıştır. Çalışma yapılırken her an her noktadan veri alınamadığından ötürü r yarıçap uzaklığında belirli bir aralık içinde ($r - \Delta r < r < r + \Delta r$) kalan istasyon çiftleri arasındaki deneysel YDS fonksiyonu aşağıda verilen şekilde hesaplanmıştır.

$$\hat{\gamma}_s(r, t) = \frac{1}{2N(r, t)} \sum_{n_u=1}^{N(r, t)} (\hat{y}_w(l_e, t) - \hat{y}_w(l_e + r, t))^2 \quad (4.26)$$

Burada $\hat{y}_w(l_e + r, t)$, l_e konumunun etrafında $r - \Delta r < r < r + \Delta r$ yarıçapı içerisinde kalan noktaların rassal kalıntı değerini tanımlarken, $N(r, t)$ ise bu yarıçap içerisinde kalan nokta çiftlerinin sayısını vermektedir.

Daha sonra PSO yöntemi ile 100 farklı parçacığın 100 yineleme ile ulaştığı enaz maliyet fonksiyonları hesaplanmış ve PSO'nun 10 kere çalıştırılması sonucunda bulunan en düşük maliyet fonksiyonunu veren Matern fonksiyonu parametreleri kulla-

nılarak teorik YDS fonksiyonu kestirilmiştir. Eşitlik 4.27, PSO yapılırken kullanılan maliyet fonksiyonunu göstermektedir.

$$J_1 = \frac{\|\bar{\gamma}_s - \bar{\gamma}_m\|_2^2}{\|\bar{\gamma}_s\|_2^2}, \quad (4.27)$$

burada $\bar{\gamma}_s$, deneysel YDS fonksiyonunun belirli uzaklıklardaki değerlerini içeren vektörü, $\bar{\gamma}_m$ ise Matern fonksiyonunun belirli uzaklıklardaki değerlerini içeren vektörü ifade eder.

PSO ile teorik YDS fonksiyonun katsayıları hesaplanırken iyonkürede yakın istasyonlar arasındaki ilintinin daha fazla olduğu bilgisi altında, yakın istasyonlara daha fazla ağırlık verecek şekilde Eşitlik 4.28'de gösterilen yeni bir maliyet fonksiyonu kullanılarak kestirimler yapılmıştır.

$$\begin{aligned} J_2 &= 0.7 \times \frac{\|\bar{\gamma}_{s,h<150} - \bar{\gamma}_{m,h<150}\|_2^2}{\|\bar{\gamma}_{s,h<150}\|_2^2} + 0.3 \times \frac{\|\bar{\gamma}_{s,h>150} - \bar{\gamma}_{m,h>150}\|_2^2}{\|\bar{\gamma}_{s,h>150}\|_2^2} \\ &= 0.7 \times J_{h<150} + 0.3 \times J_{h>150}, \end{aligned} \quad (4.28)$$

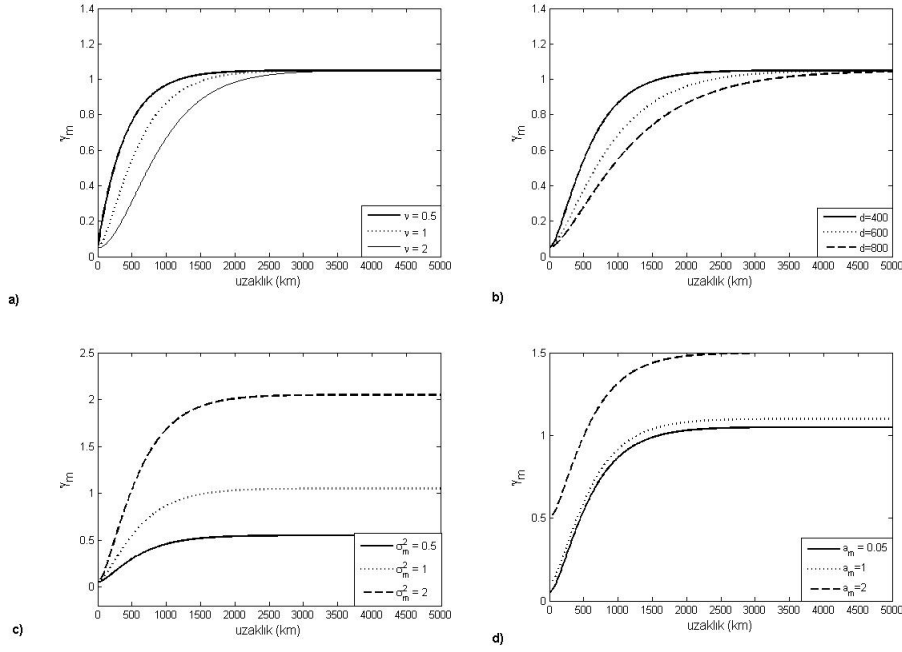
Eşitlik 4.28 ile verilen $\bar{\gamma}_{s,h<150}$, 150 km'den yakın olan nokta çiftlerinden, $\bar{\gamma}_{s,h<150}$ ise 150 km'den uzak olan nokta çiftlerinden hesaplanmış deneysel YDS değerlerini içeren vektörlerdir. Aynı şekilde $\bar{\gamma}_{m,h<150}$, 150 km'den yakın olan uzaklıklar için, $\bar{\gamma}_{m,h<150}$ ise 150 km'den uzak olan uzaklıklar için hesaplanmış Matern fonksiyonu değerlerini içeren vektörlerdir.

Şekil 4.1'de farklı Matern parametrelerine karşılık elde edilen YDS fonksiyonları gösterilmektedir. Şekil 4.1'de görüldüğü üzere:

$$\lim_{d \rightarrow \infty} \gamma_m = a_m + \sigma_m^2 \quad (4.29)$$

olmaktadır. Ayrıca farklı ν değerlerine göre, Matern fonksiyonu üssel, Gauss ve küresel YDS fonksiyonlarına dönüşmektedir.

Her iki maliyet fonksiyonu da deneysel YDS fonksiyonuna uygulanmış ve ağırlıklandırılmış maliyet fonksiyonunun yakın istasyonları daha iyi temsil ettiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.2'de 25 Ekim 2011 tarihinde iki farklı saat için her iki maliyet fonksiyonu



Şekil 4.1. Matern fonksiyonunun parametreleri değiştirilerek elde edilen YDS fonksiyonları, a) $a_m = 0.05$, $\sigma_m^2 = 1$, $d = 400$, b) $a_m = 0.05$, $\sigma_m^2 = 1$, $\nu = 1$, c) $a_m = 0.05$, $\nu = 1$, $d = 400$, d) $\sigma_m^2 = 1$, $\nu = 1$, $d = 400$.

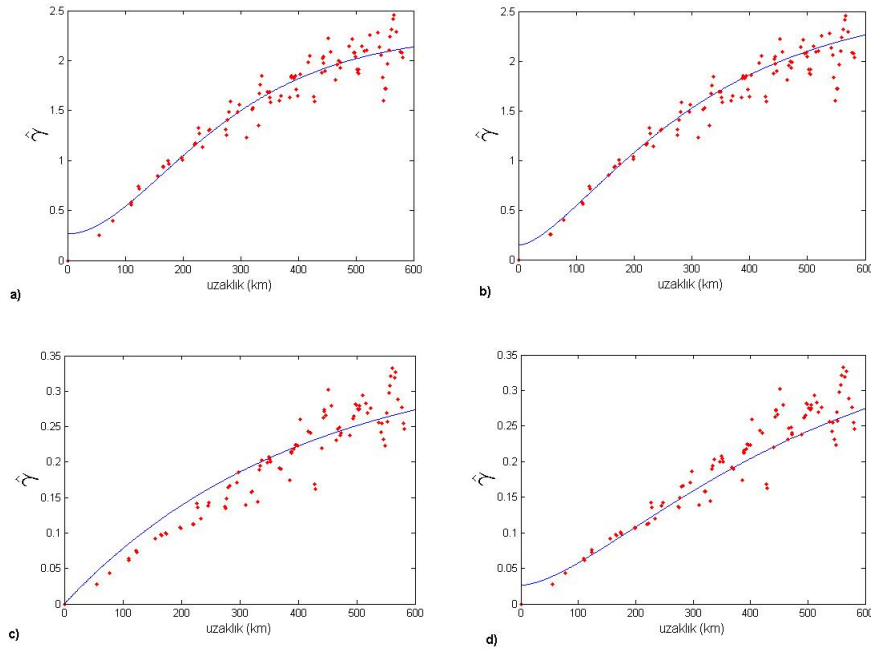
ile elde edilmiş teorik YDS fonksiyonu gösterilmiştir. Şekil 4.2a ve Şekil 4.2b, saat 1000 GS'de sırasıyla normal ve ağırlıklandırılmış maliyet fonksiyonları ile deneysel YDS fonksiyonuna uyarlanmış Matern fonksiyonunu gösterirken, Şekil 4.2c ve Şekil 4.2d, saat 2200 GS'de sırasıyla normal ve ağırlıklandırılmış maliyet fonksiyonları ile deneysel YDS fonksiyonuna uyarlanmış Matern fonksiyonunu göstermektedir. Beklenildiği gibi 150 km'ye kadar olan uzaklık için ağırlıklandırılmış maliyet fonksiyonu normaline oranla yakın istasyonlar için daha iyi sonuç vermiştir. Çizelge 4.1'de 25 Ekim 2011 tarihinde saat 1000 GS ve 1800 GS için düzgelenmiş hata fonksiyonu ile hesaplanmış hata değerleri verilmiştir. Çizelge 4.2'de ise 25 Ekim 2011 tarihinde saat 1000 GS ve 1800 GS için 150 km'den yakın ve uzak olan istasyonlar için Eşitlik 4.28 ile verildiği gibi hesaplanmış düzgelenmiş hata değerleri gösterilmektedir. Çizelge 4.1'e bakıldığında beklenildiği gibi normal maliyet ile hesaplanan değerler ağırlıklandırılmış maliyet fonksiyonuna göre daha düşük iken, Çizelge 4.2'de yakın istasyonlar için hesaplanan hata değerinin ağırlıklandırılmış maliyet fonksiyonu için düşük, 150 km'den uzak noktaların maliyet fonksiyonu ise ağırlıklandırılmış maliyet fonksiyonu için daha yüksek hata değerleri vermiştir.

Saat	J_1	J_2
1000 GS	1.52×10^{-2}	4.28×10^{-2}
1800 GS	1.51×10^{-2}	1.56×10^{-2}

Çizelge 4.1. 25 Ekim 2011 tarihinde iki farklı maliyet fonksiyonu ile deneysel ve teorik YDS fonksiyonlarının ayrı ayrı karşılaştırılması

Saat	J_1		J_2	
	$J_{h<150}$	$J_{h>150}$	$J_{h<150}$	$J_{h>150}$
1000 GS	1.11×10^{-2}	1.34×10^{-2}	5.45×10^{-2}	1.55×10^{-2}
1800 GS	1.46×10^{-2}	1.51×10^{-2}	1.12×10^{-2}	2.59×10^{-2}

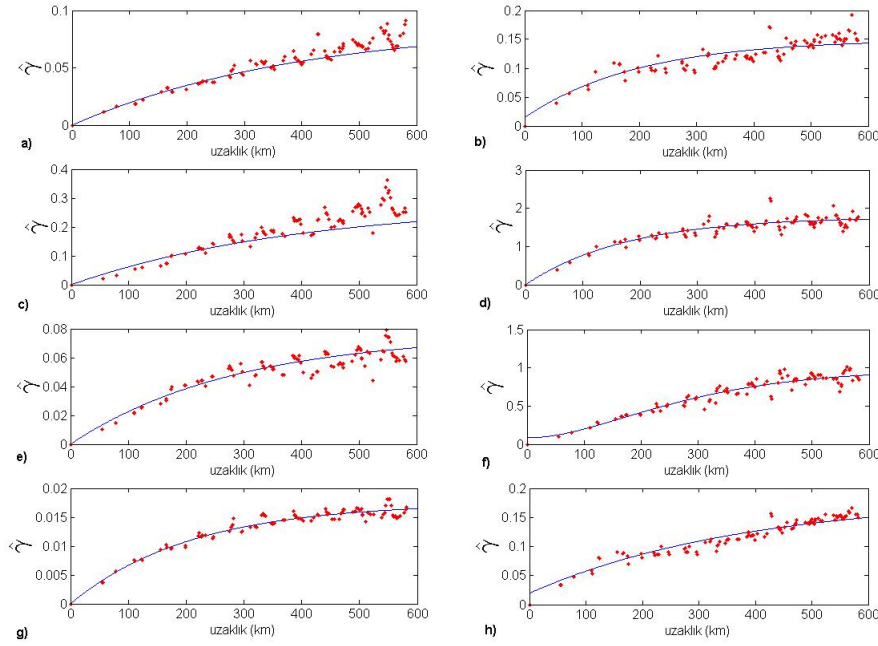
Çizelge 4.2. 25 Ekim 2011 tarihinde iki farklı maliyet fonksiyonu ile 150 km'den yakın ve uzak olan uzaklıkların deneysel ve teorik YDS fonksiyonlarının ayrı ayrı karşılaştırılması



Şekil 4.2. 25 Ekim 2011 tarihinde deneysel YDS ve Matern uyarlama, a) J_1 maliyet fonksiyonu, 1000 GS, b) J_2 maliyet fonksiyonu, 1000 GS, c) J_1 maliyet fonksiyonu, 2200 GS, d) J_2 maliyet fonksiyonu, 2200 GS.

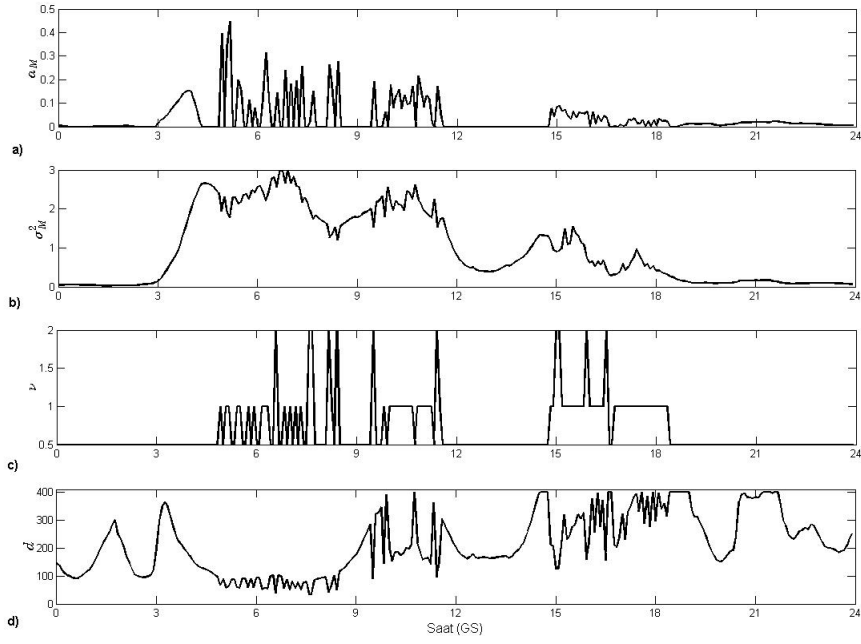
Şekil 4.3'de iyonkürenin sakin olarak adlandırıldığı bir gün olan 27 Mart 2011 tarihinde ve iyonkürenin bozulmalı olduğu 25 Ekim 2011 tarihinde 0300 GS, 0900 GS, 1500 GS ve 2100 GS saatlerinde Eşitlik 4.28 kullanılarak deneysel YDS fonksiyonlarına uyarlanmış Matern fonksiyonları gösterilmiştir. Şekil 4.3'de de görüldüğü gibi

farklı saatlerde deneysel YDS fonksiyonları farklı özellikler göstermekte ve bunun yanı sıra bozulmalı günlerde ise sakin günlere göre çok farklı olabilmektedir. Ağırlıklandırılmış maliyet fonksiyonu kullanılarak elde edilen teorik YDS fonksiyonları özellikle 300 km'den yakın olan değerlere oldukça iyi uyarlanmıştır. Aynı zamanda Şekil 4.3'e bakılarak veri çiftleri arasındaki uzaklık arttıkça iyonkürenin yönbağımlılık özelliği görülmektedir.



Şekil 4.3. 27 Mart 2011 tarihinde deneysel YDS ve Matern uyarlama, a) 0300 GS, c) 0900 GS, e) 1500 GS, g) 2100 GS, ve 25 Ekim 2011 tarihinde deneysel YDS ve Matern uyarlama, b) 0300 GS, d) 0900 GS, f) 1500 GS, h) 2100 GS.

Şekil 4.4'te ise iyonkürenin bozulmalı olduğu 25 Ekim 2011 tarihinde Matern fonksiyonunun ağırlıklandırılmış maliyet fonksiyonu kullanılarak kestirilmiş parametrelerinin günlük değişimleri görülmektedir. Matern fonksiyonunun parametreleri her beş dakikada bir kestirilmiştir. Şekil 4.4a'da açıkça görüldüğü gibi külçe etkisi, a_m özellikle güneşin doğuşundan öğle vaktine kadar değişmektedir. Aynı şekilde Şekil 4.4b'de verilen kısmi eşik değeri, σ_m de gündeğümünden öğle vaktine kadar olan aralıkta en yüksek değerlere ulaşmaktadır. Şekil 4.4c'de Matern fonksiyonunun mertebesinin, μ zamana göre değiştiği gözlemlenmektedir. Şekil 4.4d ise yapısal uzaklığın, d , grafiği verilmiştir.



Şekil 4.4. 25 Ekim 2011 tarihinde Matern parametrelerinin günlük değişimi, a) a_m , b) σ_m^2 , c) ν , d) d .

Şekil 4.5, Şekil 4.7 ve Şekil 4.9 sırasıyla 21 Mart 2011 (ilkbahar ekinoksu) tarihinde, 28 Nisan 2011 tarihinde yani iyonkürenin sakin olarak adlandırıldığı bir günde ve 05 Haziran 2011 tarihinde yani iyonkürenin bozulmalı olduğu bir günde deneysel ve teorik YDS fonksiyonunun grafikleri gösterilmektedir. Her üç tarih için de Şekil a güneşin etkisinin Türkiye üzerinde en fazla olduğu saat 1000 GS'de ve Şekil b güneşin etkisinin Türkiye üzerinde en az olduğu saat 2200 GS'de Eşitlik 4.25 kullanılarak hesaplanmış kalıntı fonksiyonu ile elde edilmiş deneysel YDS fonksiyonu ve bu fonksiyona PSO ile uyarlanan Matern fonksiyonu gösterilmiştir. Çizilen YDS fonksiyonlarına bakılarak saat 1000 GS'de kalıntı fonksiyonun değışintisinin saat 2200 GS'e göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

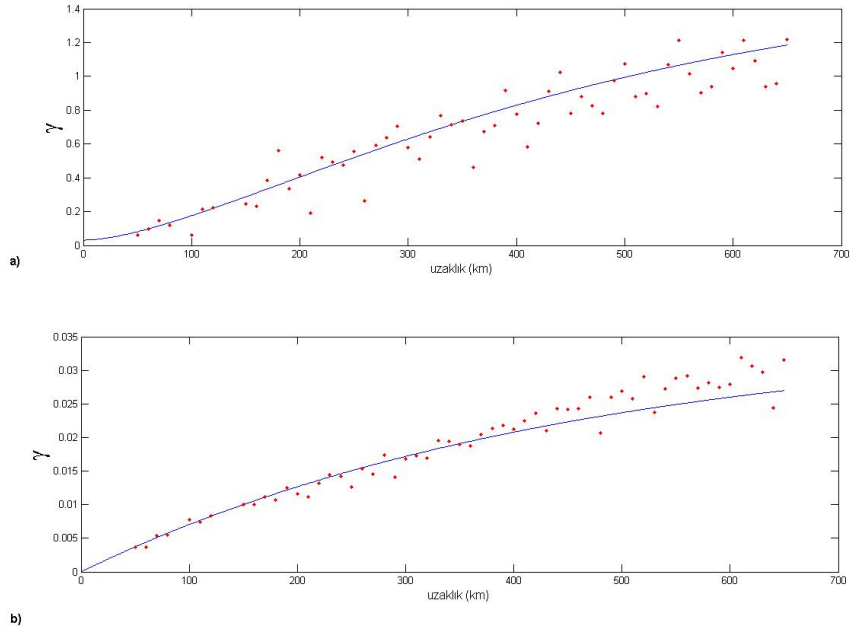
Tarih	1000 GS	2200 GS
21 Mart 2011	5.46×10^{-2}	5.62×10^{-3}
28 Nisan 2011	3.85×10^{-2}	6.13×10^{-3}
05 Haziran 2011	3.79×10^{-2}	5.36×10^{-2}

Çizelge 4.3. Teorik ve deneysel YDS fonksiyonlarının düzgelenmiş hata fonksiyonu ile karşılaştırılması

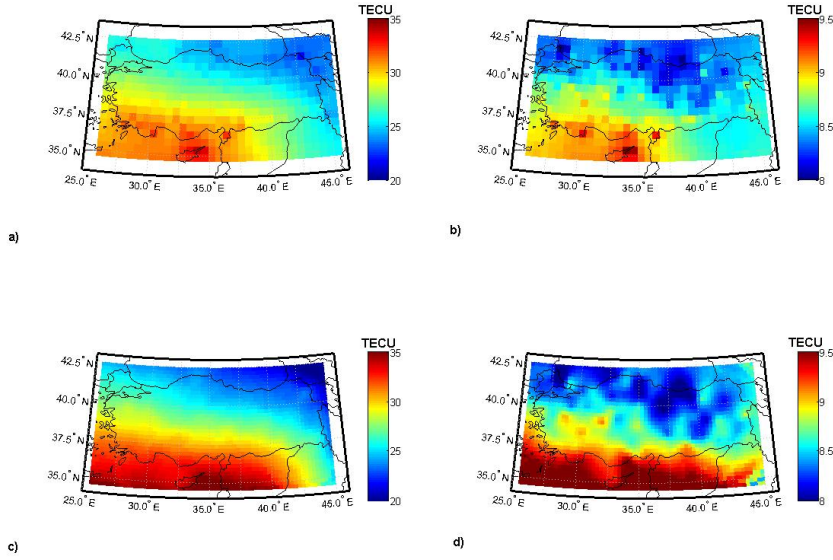
Çizelge 4.3'te görüldüğü üzere gündüz saatlerinde TEİ değerlerinde güneşin etkisinden dolayı değişiminin fazla olmasından ötürü, gece saatlerine göre hata değeri daha fazla çıkmıştır. Özellikle ilkbahar ekinoksu tarihinde yani gün-tün eşitliğinden ötürü, hata saat 1000 GS'de en yüksek değerine ulaşmıştır. Gece saatlerine bakıldığında 05 Haziran 2011 tarihinde iyonkürenin bozulmalı olduğu gece saatinde kalıntı fonksiyonundaki değişiminin yüksek olması hata fonksiyonunun yüksek çıkmasına neden olmuştur.

Şekil 4.6, Şekil 4.8 ve Şekil 4.10 sırasıyla 21 Mart 2011 (ilkbahar ekinoksu) tarihinde, 28 Nisan 2011 tarihinde yani iyonkürenin sakin olarak adlandırıldığı bir günde ve 05 Haziran 2011 tarihinde yani iyonkürenin bozulmalı olduğu bir günde Krigleme haritaları gösterilmiştir. Her üç tarih için de Şekil a güneşin etkisinin Türkiye üzerinde en fazla olduğu saat 1000 GS'de UKTA yöntemi ile oluşturulmuş Türkiye TEİ haritasını, Şekil b güneşin etkisinin Türkiye üzerinde en az olduğu saat 2200 GS'de UKTA yöntemi ile oluşturulmuş Türkiye TEİ haritasını, Şekil c saat 1000 GS'de Krigleme haritasını ve Şekil d saat 2200 GS'de Krigleme haritasını göstermektedir. Güney bölgelerinde özellikle KKTC üzerinde veri alınamadığından dolayı bu kısımlarda kestirim hataları yüksek çıkmıştır. Krigleme yöntemi ile örnekleme noktalarının ara kısımlarında yapılan kestirimlerin başarımı daha yüksek olduğundan, verilerin az olduğu zamanlarda hata değerlerinde artış gözlemlenmektedir [11, 16]. Bu da haritalama yapılmadan önce uzay-zaman aradeğerleme yönteminin önemini göstermektedir.

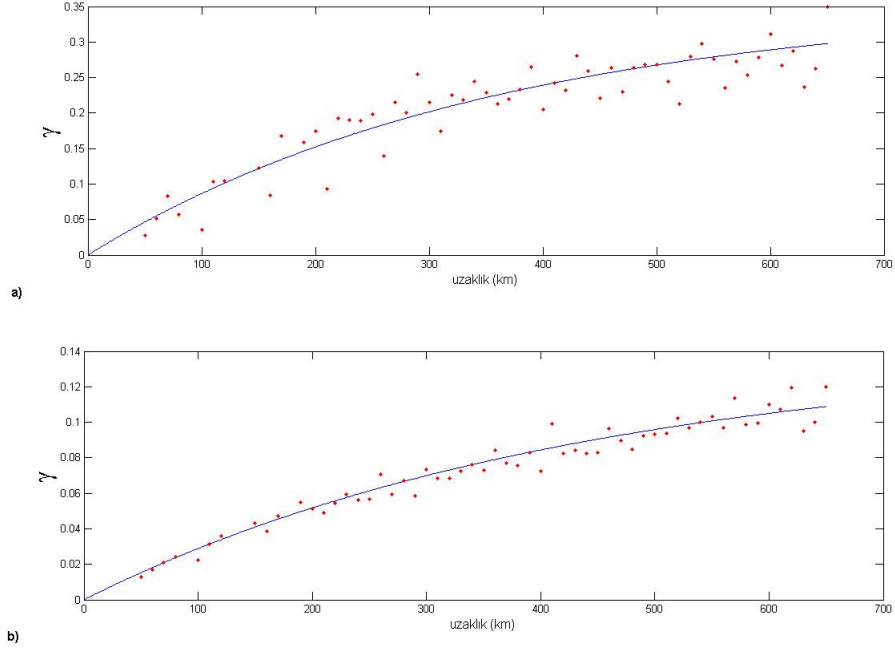
Sonuç olarak Türkiye ve KKTC üzerinde konumda $0.5^0 \times 0.6^0$ ve zamanda beş dakika çözünürlükte TEİ haritaları otomatik olarak elde edilmiştir. Krigleme haritaları ile Türkiye ve KKTC üzerinde TEİ değişimlerinin uzayda ve zamanda etkilerini gösteren hassas haritalar elde edilmiştir.



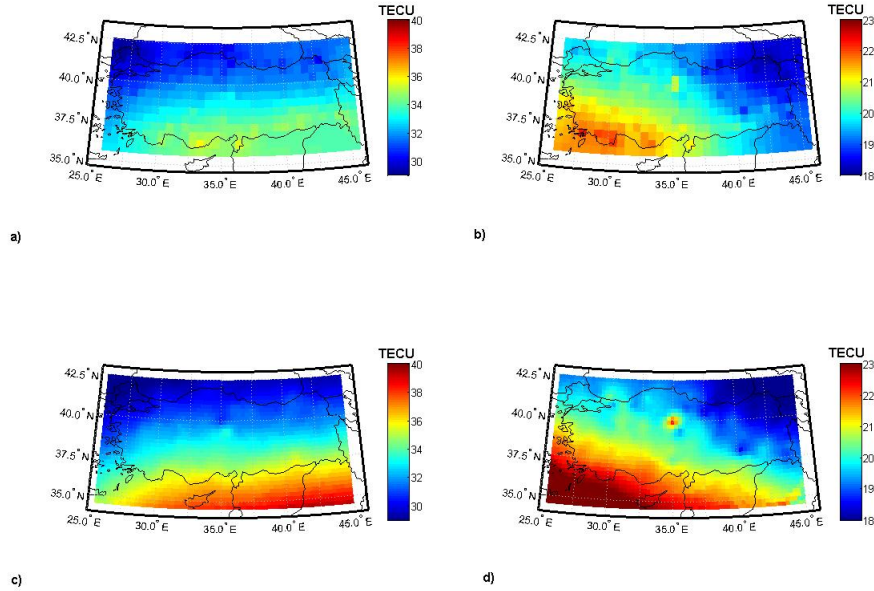
Şekil 4.5. 21 Mart 2011 tarihinde deneysel YDS ve Matern uyarlama, a) 1000 GS, b) 2200 GS.



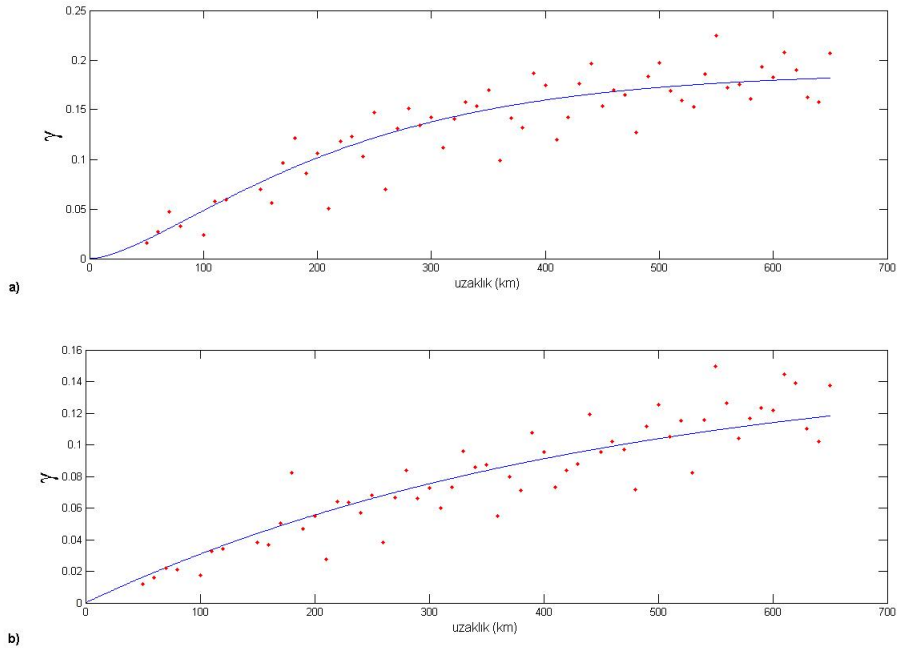
Şekil 4.6. 21 Mart 2011 tarihinde Türkiye TEİ haritaları, a) UKTA 1000 GS, b) UKTA 2200 GS, c) Krigleme haritası 1000 GS, d) Krigleme haritası 2200 GS.



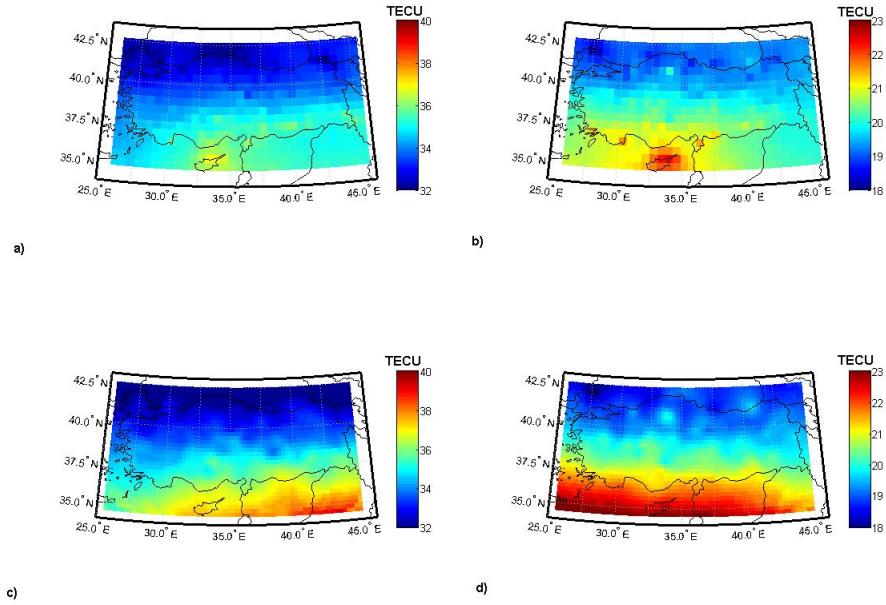
Şekil 4.7. 28 Nisan 2011 tarihinde deneysel YDS ve Matern uyarlama, a) 1000 GS, b) 2200 GS.



Şekil 4.8. 28 Nisan 2011 tarihinde Türkiye TEİ haritaları, a) UKTA 1000 GS, b) UKTA 2200 GS, c) Krigleme haritası 1000 GS, d) Krigleme haritası 2200 GS.



Şekil 4.9. 05 Haziran 2011 tarihinde deneysel YDS ve Matern uyarlama, a) 1000 GS, b) 2200 GS.



Şekil 4.10. 05 Haziran 2011 tarihinde Türkiye TEİ haritaları, a) UKTA 1000 GS, b) UKTA 2200 GS, c) Krigleme haritası 1000 GS, d) Krigleme haritası 2200 GS.

5. TDA YÖNTEMİ İLE TEİ ANALİZİ

TDA yöntemi, TEİ rassal fonksiyonunu tanımlamak ve rassal fonksiyonun değişimini incelemek için kullanılan bir yöntemdir. Böylelikle TEİ rassal fonksiyonunun enerjisinin dağılımının yoğunluğuna bakılarak istatistiksel analiz yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bunun sonucunda TEİ rassal fonksiyonunun değişimleri enerjinin yoğun olduğu bölgeler ile ilişkilendirilmesi amaçlanmıştır.

TEİ, zamanda gece-gündüz döngüsü, mevsimlik ve yıllık değişimlerle farklılık göstermektedir. TEİ'nin zamanda değişimini en aza indirmek amacıyla bu çalışmada öncelikle EK 2 ile verilen, jeodezik koordinatlardan güneş eksenli koordinat sistemine dönüşüm yapılmış ve yeni koordinat eksenleri üzerindeki verilerin Tekil Değer Ayrıştırma (TDA) yöntemi ile zamanda değişimin en az olduğu durumda analizler yapılmıştır.

TDA analiz yöntemi bir matrisi çarpanlarına ayırma yöntemidir. Bu yöntem özellikle sinyal işleme ve istatistik gibi çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. TDA yöntemi gerçel ve karmaşık matrisler üzerinde ayrıştırma yapılmasını sağlar. Basitçe bu yöntem kullanılarak bir matris üç temel parçaya bölünür. $m \times n$ ($m > n$) boyunda bir matris olarak tanımlanan **A**, TDA yöntemi kullanılarak:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \quad (5.1)$$

şeklinde yazılabilir. Eşitlik 5.1'de **U** ve **V** matrisleri sırasıyla $m \times m$ ve $n \times n$ boyunda gerçel veya karmaşık uniter matrislerdir ve,

$$\mathbf{U}^T \mathbf{U} = \mathbf{I} \quad (5.2)$$

$$\mathbf{V}^T \mathbf{V} = \mathbf{I} \quad (5.3)$$

eşitlikleriyle de ifade edildiği gibi dik matrislerdir. $\mathbf{\Sigma}$ ise köşegen değerleri Eşitlik 5.4 ile verilen $m \times n$ boyunda köşegen bir matrisi gösterir.

$$\sigma_{mn} = \begin{cases} 0, & m \neq n \\ \sigma_m \geq 0, & m = n \end{cases} \quad (5.4)$$

Köşegen değerleri σ_m 'ler \mathbf{A} matrisinin tekil değerleri olarak adlandırılır ve $\sigma_{m-1} \geq \sigma_m$, $m = 2, \dots, \min(m, n)$ şeklinde sıralanır. Burada $\min(\cdot, \cdot)$ matematiksel olarak iki sayıdan en küçüğünü seçen operatörü tanımlamaktadır. \mathbf{U} ve \mathbf{V} matrislerinin kolonları olan \mathbf{u}_m ve \mathbf{v}_m ise sırasıyla sol ve sağ tekil vektörler adını alır.

TDA yöntemi uygulanmadan önce beşer dakika aralıklarla alınmış ardışık yedi farklı zaman dilimi, güneş eksenli koordinat sistemine taşınmıştır. Ardışık yedi farklı zaman diliminin yeni koordinat düzleminde ortak koordinat bölgesi bulunmuş ve zamanda değişinti en aza indirgenerek \mathbf{A} , TDA yöntemi ile incelenmiştir. $\hat{\mathbf{z}}_k(t)$, t . zaman dilimi için ardışık yedi farklı zamanın ortak koordinat bölgesinde Krigleme yöntemiyle elde edilmiş TEİ kestirimlerinden leksikografik sırada dizilerek oluşturulmuş vektörü ifade ederse, \mathbf{A} yedi farklı zaman dilimi için elde edilen TEİ vektörlerinden yanyana dizilerek oluşturulmuş matris olarak tanımlanır ve aşağıdaki şekilde gösterilir:

$$\mathbf{A} = [\hat{\mathbf{z}}_k(t-15) \quad \hat{\mathbf{z}}_k(t-10) \quad \hat{\mathbf{z}}_k(t-5) \quad \hat{\mathbf{z}}_k(t) \quad \hat{\mathbf{z}}_k(t+5) \quad \hat{\mathbf{z}}_k(t+10) \quad \hat{\mathbf{z}}_k(t+15)]^T. \quad (5.5)$$

\mathbf{A} matrisinin mertebesi n olarak kabul edilirse, TDA analiz yöntemi yapılırken Eşitlik 5.1 aşağıdaki gibi daha basit forma dönüştürülebilir:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^T = [\mathbf{U}_1 \quad \mathbf{U}_2] \begin{bmatrix} \Sigma_n \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{V}^T \quad (5.6)$$

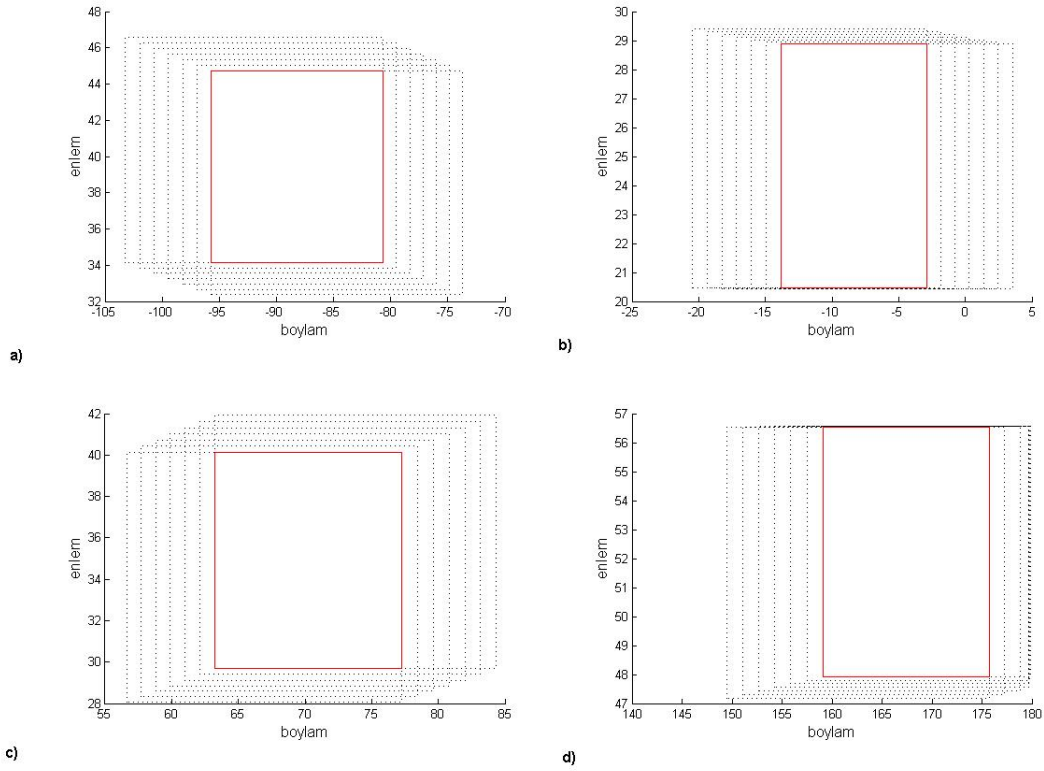
$$\mathbf{A} = \mathbf{U}_1 \Sigma_n \mathbf{V}^T \quad (5.7)$$

Burada \mathbf{U}_1 , $m \times n$ boyunda bir matris iken Σ_n ise $n \times n$ boyunda tekil olmayan köşegen bir matristir.

5.1 Bulgular

Bu çalışmada Türkiye iyonküre TEİ değerlerinin zamanda değişintisi en aza indirgenmiş ve daha sonra ise TDA analiz yöntemiyle incelenmiştir. Çalışma yapılırken Bölüm 4'te anlatılan Krigleme yöntemiyle elde edilen TEİ kestirimleri kullanılmıştır. Her beş dakikada bir yarım saat boyunca TEİ kestirimi yapılmış ve herbir örnekleme noktasının koordinatları güneş eksenli koordinat sistemine dönüştürülmüştür. Daha sonra elde edilen yedi farklı veri setinin ortak koordinatları bulunarak bu noktalarda

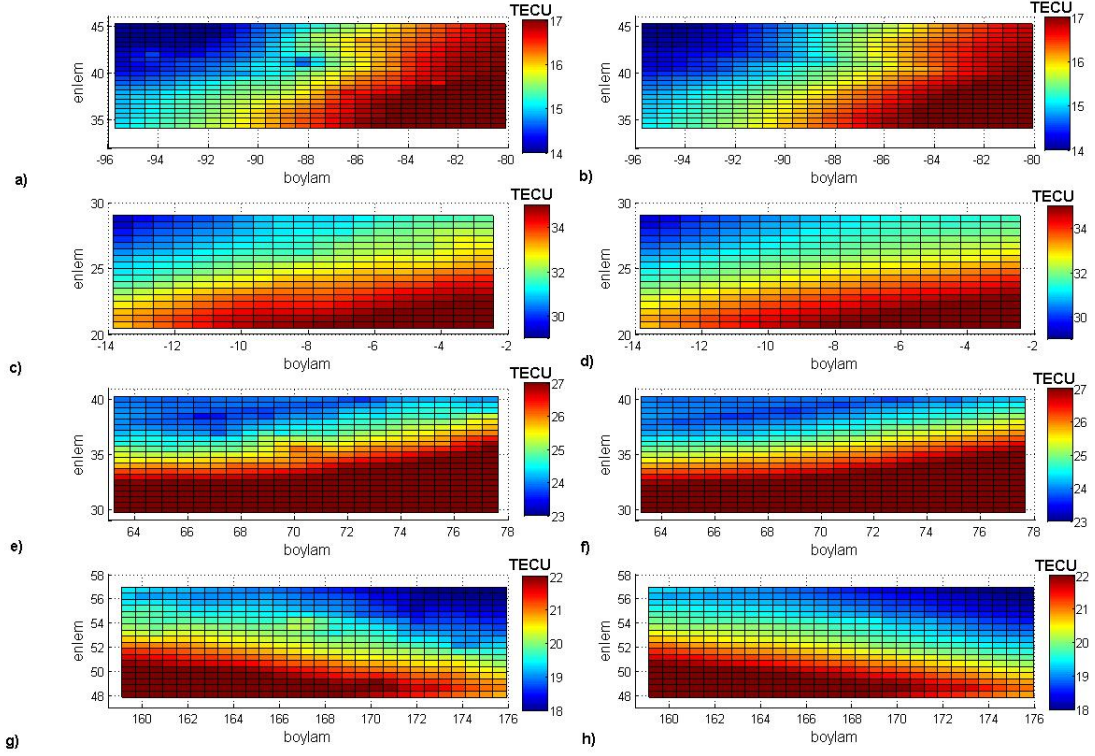
herbir zaman aralığı için daha düzenli ve sık veri seti oluşturmak amacıyla UKTA yöntemiyle aradeğerleme yapılmıştır. Son olarak elde edilen bu yedi farklı veri seti üzerinden TDA analizi yapılmış ve sonuçlar incelenmiştir.



Şekil 5.1. 28 Nisan 2011 tarihinde kartezyen koordinatlardan güneş eksenli koordinat sistemine dönüşüm, a) 0300 GS, b) 0900 GS, c) 1500 GS, d) 2100 GS.

Şekil 5.1'de beşer dakika aralıklarla alınmış ardışık yedi farklı zaman dilimi için güneş eksenli koordinat dönüşümü yapılarak elde edilmiş yeni koordinatları ile bu yedi farklı koordinat değerlerinin ortak koordinat noktaları gösterilmektedir. Şekil 5.1a'da 28 Nisan 2011 tarihinde sırasıyla 0245 GS, 0250 GS, 0255 GS, 0300 GS, 0305 GS, 0310 GS, 0315 GS saatleri için Türkiye'nin coğrafi koordinatlarının, güneş eksenli koordinat düzlemine dönüştürüldüğünde yeni koordinatları ile bu yedi farklı koordinatın kesiştiği ortak koordinat bölgesi gösterilmiştir. Şekil 5.1b, Şekil 5.1c ve Şekil 5.1d de ise 28 Nisan 2011 tarihinde sırasıyla 0900 GS, 1500 GS ve 2100 GS için Şekil 5.1a'daki gibi yeni koordinat düzleminin koordinatları ve bu yedi farklı koordinat düzleminin kesiştiği koordinat bölgesi gösterilmiştir. Her dört şekil incelendiğinde gün içerisinde 28 Nisan 2011 tarihinde Türkiye'nin güneşe yöneliminin hareketi gözlemlenmekte ve güneşe en yakın zamanının da beklendiği gibi 0900 GS ile 1500 GS

arasında olduğu gösterilmektedir.



Şekil 5.2. 28 Nisan 2011 tarihinde güneş eksenli koordinat sisteminde TEİ haritaları; Krigleme haritaları a) 0300 GS, c) 0900 GS, e) 1500 GS, g) 2100 GS; en yüksek enerjili tekil değer kullanılarak elde edilen geri çatma haritaları b) 0300 GS, d) 0900 GS, f) 1500 GS, h) 2100 GS.

Çalışmanın devamında beşer dakika aralıklarla elde edilen yedi farklı bölgenin ortak koordinatları içerisinde kalan alan, daha düzenli bir veri seti oluşturmak ve tekil değer ayrışımı yapabilmek için $0.5^0 \times 0.6^0$ çözünürlüklü yeni bir ızgara üzerine oturtulmuş ve her bir ızgara noktasının TEİ kestirimi UKTA yöntemiyle hesaplanmıştır. Şekil 5.2a, Şekil 5.2c, Şekil 5.2e ve Şekil 5.2g, 28 Nisan 2011 tarihinde sırasıyla saat 0300 GS, 0900 GS, 1500 GS ve 2100 GS'de ortak koordinat bölgesi için TEİ grafiğini göstermektedir. Bu grafiklere bakılarak TEİ değerlerinin güneşe yönelimi ile değişimi gün içerisinde gözlemlenebilmektedir. Daha sonra ardışık yedi TEİ değeri bir matris oluşturacak şekilde yanyana dizilerek tekil değer ayrışımı yapılmış ve sonuçları incelenmiştir. Tekil değer ayrışımı sonucunda 28 Nisan 2011 tarihinde köşegen değerleri sırası ile 1043.30, 8.42, 4.06, 2.43, 1.95, 1.51 ve 1.45 olarak bulunmuş ve matrisin tüm gücünün %98.14'ünü ilk köşegen değerinin kapsadığı hesaplanmıştır. Bunun sonucunda matrisi geri oluştururken sırasıyla ilk köşegenden

başlayarak ve her seferinde bir sonraki köşegen değeri de kullanılarak matris tekrardan oluşturulmuş ve yedi ayrı koordinat değeri için hata değerlerine Eşitlik 5.8 ile verilen düzgelenmiş hata ile bakılmıştır.

$$e_{\Sigma_n}(t) = \frac{\|\hat{\mathbf{z}}_k(t) - \hat{\mathbf{z}}_{k,\Sigma_n}(t)\|_2}{\|\hat{\mathbf{z}}_k(t)\|_2} \quad (5.8)$$

burada Σ_n , n tane köşegen değerinin kullanıldığını göstermekte iken, $\hat{\mathbf{z}}_{s,\Sigma_n}(t)$ ise n tane tekil değer kullanılarak elde edilen TEİ vektörünü ifade etmektedir.

t	$e_{\Sigma_1}(t)$	$e_{\Sigma_2}(t)$	$e_{\Sigma_3}(t)$	$e_{\Sigma_4}(t)$	$e_{\Sigma_5}(t)$	$e_{\Sigma_6}(t)$	$e_{\Sigma_7}(t)$
0245 GS	1.44×10^{-2}	5.62×10^{-3}	2.92×10^{-3}	2.02×10^{-3}	7.68×10^{-4}	6.94×10^{-4}	2.63×10^{-16}
0250 GS	9.83×10^{-3}	3.85×10^{-3}	3.83×10^{-3}	3.70×10^{-3}	2.02×10^{-3}	1.25×10^{-3}	1.08×10^{-15}
0255 GS	6.55×10^{-3}	5.33×10^{-3}	3.82×10^{-3}	2.78×10^{-3}	2.77×10^{-3}	2.52×10^{-4}	7.28×10^{-16}
0300 GS	6.07×10^{-3}	5.92×10^{-3}	3.48×10^{-3}	3.24×10^{-3}	2.38×10^{-3}	1.19×10^{-3}	5.03×10^{-16}
0305 GS	7.56×10^{-3}	5.21×10^{-3}	4.21×10^{-3}	2.24×10^{-3}	2.12×10^{-3}	2.07×10^{-3}	3.38×10^{-16}
0310 GS	9.06×10^{-3}	3.91×10^{-3}	3.74×10^{-3}	3.19×10^{-3}	2.15×10^{-3}	2.14×10^{-3}	3.09×10^{-16}
0315 GS	1.16×10^{-2}	6.64×10^{-3}	3.00×10^{-3}	1.29×10^{-3}	9.54×10^{-4}	9.50×10^{-4}	7.87×10^{-16}

Çizelge 5.1. 28 Nisan 2011 tarihinde TDA analiz sonucunda düzgelenmiş hata değerleri

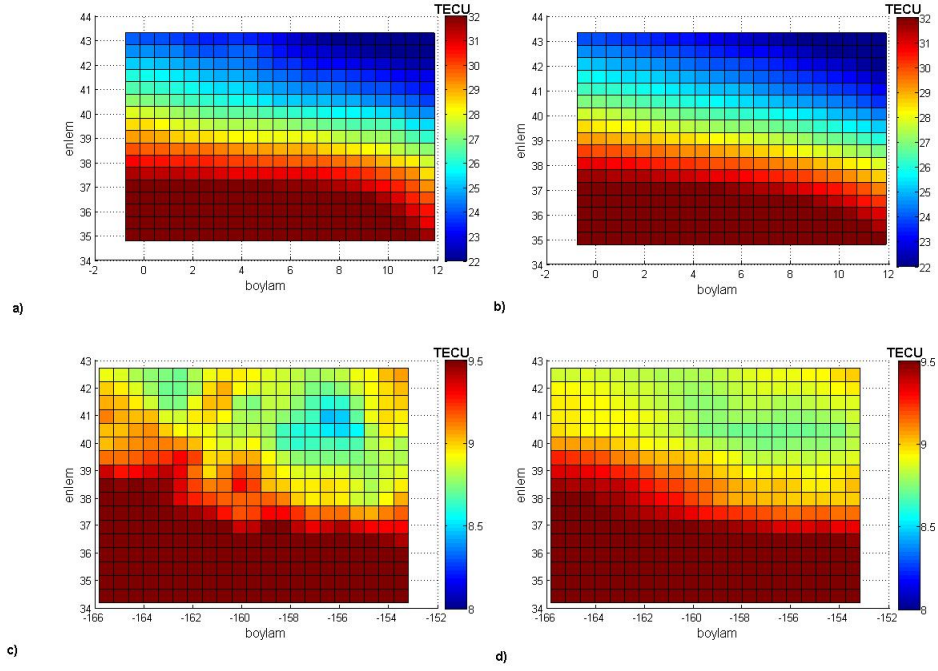
Çizelge 5.1'de 28 Nisan 2011 tarihinde 0245 GS ile 0315 GS arasında beşer dakika aralıklarla alınmış ardışık zaman dilimleri kullanılarak tekil değer ayrışımı yapılmış, daha sonra ilk köşegenden başlayarak ve her seferinde bir sonraki köşegen değeri de kullanılarak matris tekrardan oluşturulmuş ve yedi ardışık zaman için hata değerlerine düzgelenmiş hata ile bakılmıştır. Bu tabloya bakıldığında en yüksek enerjiye sahip köşegen kullanılarak elde edilen TEİ matrisi ortalama %1'lik hata ile hesaplanabileceği gösterilmiş ve matris tekrar oluştururken ilk köşegen değerinin yeterli olacağı sonucuna varılmıştır. Çizelge 5.2'de ise 28 Nisan 2011 tarihinde 0900 GS, 1500 GS ve 2100 GS'de sadece en yüksek enerjili köşegen değeri kullanılarak elde edilen TEİ matrisi ile Krigleme yöntemi ile kestirilmiş TEİ değeri arasındaki farka düzgelenmiş hata ile bakılmıştır. 0900 GS, 1500 GS ve 2100 GS için köşegen değerleri hesaplandığında, ilk köşegen değerinin sahip olduğu enerjinin, sırasıyla tüm enerjinin %98.53, %98.71 ve %98.36'sını kapsadığı hesaplanmıştır. Daha sonra sadece en yüksek enerjili köşegen kullanılarak TEİ matrisi tekrar oluşturulduğunda, ardışık yedi zaman için hatanın %1'in altında olduğu gözlemlenmiştir. Çalışılan ölçüm aletlerinin hassasiyetinin 3 TECU olduğu düşünüldüğünde, hatanın ihmal edilebilir ölçüde olduğu sonucuna varılmıştır [22].

Zaman	$e_{z_1}(t), t=0900 \text{ GS}$	$e_{z_1}(t), t=1500 \text{ GS}$	$e_{z_1}(t), t=2100 \text{ GS}$
$t - 15$	1.11×10^{-2}	8.08×10^{-3}	1.19×10^{-2}
$t - 10$	8.77×10^{-3}	6.26×10^{-3}	8.08×10^{-3}
$t - 5$	6.45×10^{-3}	5.05×10^{-3}	5.42×10^{-3}
t	4.07×10^{-3}	4.08×10^{-3}	4.59×10^{-3}
$t + 5$	5.67×10^{-3}	4.66×10^{-3}	5.78×10^{-3}
$t + 10$	9.52×10^{-3}	6.49×10^{-3}	8.66×10^{-3}
$t + 15$	1.30×10^{-2}	8.54×10^{-3}	1.09×10^{-2}

Çizelge 5.2. 28 Nisan 2011 tarihinde TDA analiz sonucunda düzgelenmiş hata değerleri

Şekil 5.3, 21 Mart 2011 tarihinde yani iyonkürenin sakin olarak adlandırıldığı bir günde ve Şekil 5.4 ise 05 Haziran 2011 tarihinde yani iyonkürenin bozulmalı olduğu bir günde iki farklı saat için güneş eksenli koordinat sisteminde TEİ haritalarını göstermektedir. Şekil 5.3a ve Şekil 5.4a, 1000 GS'de beşer dakika aralılarla alınmış ardışık yedi zaman için güneş merkezli koordinat sistemindeki ortak koordinat bölgesindeki TEİ haritası iken, Şekil 5.3b ve Şekil 5.4b, TDA yöntemi kullanıldıktan sonra sadece en yüksek enerjili köşegen değeri kullanılarak 1000 GS'de TEİ matrisinin tekrar oluşturulmasıyla elde edilmiş haritayı göstermektedir. Şekil 5.3a ve Şekil 5.4a ise 2300 GS'de beşer dakika aralılarla alınmış ardışık yedi zaman için güneş merkezli koordinat sistemindeki ortak koordinat bölgesindeki TEİ haritası iken, Şekil 5.3d ve Şekil 5.4d, TDA yöntemi kullanıldıktan sonra sadece en yüksek enerjili köşegen değeri kullanılarak 2300 GS'de TEİ matrisinin tekrar oluşturulmasıyla elde edilmiş haritayı göstermektedir.

Çizelge 5.3'te, 21 Mart 2011 (ilkbahar ekinoksu) tarihinde ve iyonkürenin bozulmalı olarak adlandırıldığı 05 Haziran 2011 tarihinde saat 1000 GS ve 2300 GS'de, en yüksek enerjili köşegen değeri kullanılarak elde edilmiş TEİ matrisi ile TDA analiz yöntemi yapılan TEİ matrisi arasındaki farka düzgelenmiş hata fonksiyonu ile bakılmıştır. Hata değerlerine bakıldığında ardışık yedi zaman dilimi için de ortalama hata %1'in altında iken özellikle ortanca saat için en düşük hatayı vermektedir. Bunun sonucunda TDA analiz yöntemi ile iyonkürenin her durumunda sadece en yüksek enerjili köşegen matrisi kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. En yüksek enerjili köşegen matris ise fiziksel olarak ortanca zamanı göstermektedir. Bu çalışma ile



Şekil 5.3. 21 Mart 2011 tarihinde güneş eksenli koordinat sisteminde TEİ haritaları; Krigleme Haritaları, a) 1000 GS, c) 2300 GS; en yüksek enerjili tekil değer kullanılarak elde edilen geri çatma haritaları, b) 1000 GS, d) 2300 GS.

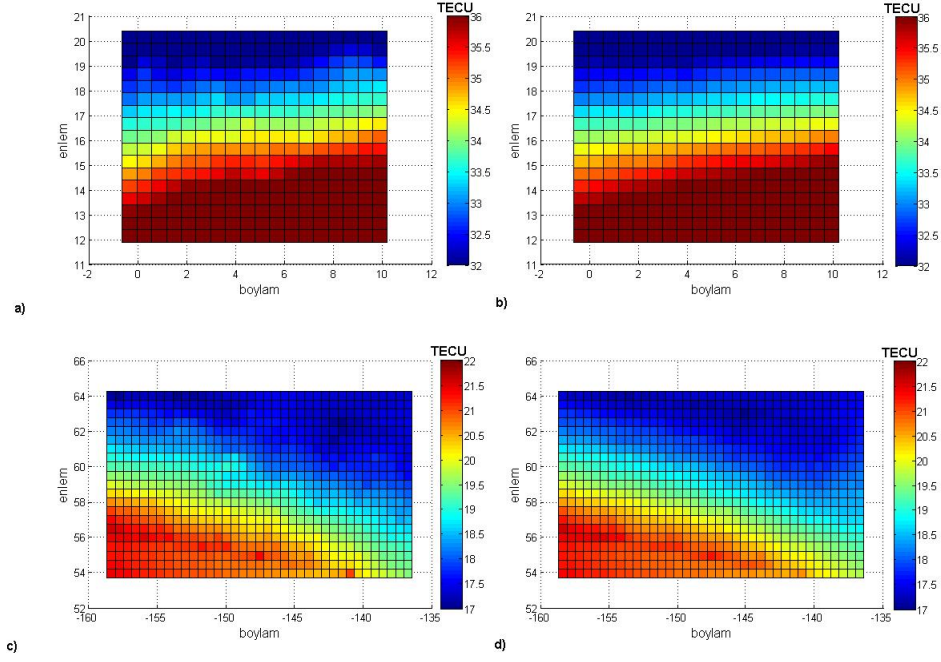
Zaman	21 Mart 2011		05 Haziran 2011	
	$e_{\Sigma_1}(t), t=1000 \text{ GS}$	$e_{\Sigma_1}(t), t=2300 \text{ GS}$	$e_{\Sigma_1}(t), t= 1000 \text{ GS}$	$e_{\Sigma_1}(t), t=2300 \text{ GS}$
$t - 15$	1.84×10^{-2}	1.92×10^{-2}	5.38×10^{-3}	1.35×10^{-2}
$t - 10$	1.65×10^{-2}	1.33×10^{-2}	3.75×10^{-3}	2.16×10^{-2}
$t - 5$	1.16×10^{-2}	8.90×10^{-3}	3.40×10^{-3}	5.35×10^{-3}
t	9.30×10^{-3}	8.90×10^{-3}	3.42×10^{-3}	6.92×10^{-3}
$t + 5$	1.23×10^{-2}	1.24×10^{-2}	3.39×10^{-3}	7.51×10^{-3}
$t + 10$	1.64×10^{-2}	1.58×10^{-2}	3.32×10^{-3}	9.54×10^{-3}
$t + 15$	1.70×10^{-2}	1.74×10^{-2}	3.86×10^{-3}	1.16×10^{-2}

Çizelge 5.3. 21 Mart 2011 ve 05 Haziran 2011 tarihlerinde TDA analiz sonucunda düzgelenmiş hata değerleri

iyonküre tabakasının zamanda onbeş dakika ilintiye sahip olduğu ve güneşin iyonküre üzerinde en büyük etkiyi gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.

$$e_{\hat{\mathbf{z}}_w}(t) = \frac{\|\mathbf{z}_k(t) - \hat{\mathbf{z}}_w(t)\|_2}{\|\mathbf{z}_k(t)\|_2} \quad (5.9)$$

Şekil 5.5 21 Mart 2011 tarihinde 1000 GS ve 1800 GS'de sırasıyla UKTA, Krigleme

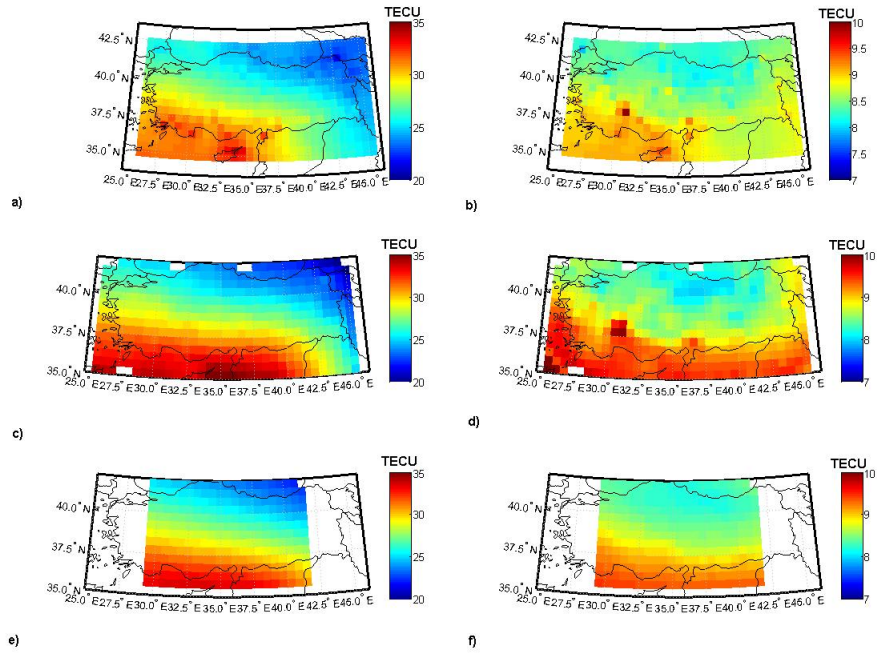


Şekil 5.4. 05 Haziran 2011 tarihinde güneş eksenli koordinat sisteminde TEİ haritaları; Krigleme Haritaları, a) 1000 GS, c) 2300 GS; en yüksek enerjili tekil değer kullanılarak elde edilen geri çatma haritaları, b) 1000 GS, d) 2300 GS.

Saat	$e_{\Sigma_1}(t)$	$e_{z_w}(t)$
1000 GS	9.30×10^{-3}	1.09×10^{-2}
1800 GS	6.88×10^{-2}	3.64×10^{-2}

Çizelge 5.4. 21 Mart 2011 tarihinde düzgelenmiş hata fonksiyonun ile UKTA yöntemi ve en yüksek enerjili tekil değer kullanılarak elde edilmiş geri çatma haritalarının Krigleme haritalarıyla olan farkı

ve en yüksek enerjili tekil değer kullanılarak elde edilen geri çatılmış TEİ haritalarını göstermektedir. Çizelge 5.4 ise bu üç farklı grafiğin iki farklı saat için düzgelenmiş hata değerlerini vermektedir. Sonuç olarak Krigleme haritaları iki farklı saat içinde TEİ değişimlerini konuma göre daha hassas olarak algılamakta, UKTA yöntemi konuma göre kör bir aradeğerleme fonksiyonu ile değişimi hissetmeden haritalar çıkartmaktadır. Bunun yanı sıra en yüksek enerjili tekil değer kullanılarak oluşturulan geri çatma TEİ haritaları, Krigleme ile hemen hemen aynı harita değerlere sahip olmanın yanında daha yumuşak geçişlere izin veren yerel değişimleri içermeyen bir haritalama yöntemidir.



Şekil 5.5. 21 Mart 2011 tarihinde Türkiye TEİ haritaları; UKTA yöntemi ile, a) 1000 GS, b) 1800 GS; Krigleme Haritaları, c) 1000 GS, d) 1800 GS; en yüksek enerjili tekil değer kullanılarak elde edilen geri çatma haritaları, e) 1000 GS, f) 1800 GS.

6. SONUÇLAR

KD ve uydu haberleşmesinde önemli bir yere sahip olan iyonküre, güneşin etkinliği, jeomanyetik, yerçekimsel ve sismik aktiviteler ile değişim gösterir. İyonküre tarafından etkilenen tüm bu sistemlerin etkilerinin incelenmesi için, iyonkürenin yapısının anlaşılması, bu katmanın sürekli gözlemlenmesi ve modellenmesi açısından önemlidir. İyonküredeki değişimler, bu katmandaki elektron yoğunluğu ile en iyi şekilde takip edilebilir. İyonküredeki TEİ kestirimleri düşük maliyete sahip ve en yaygın yöntem olan YKS istasyonları kullanılarak hesaplanır. Fiziksel nedenlerden dolayı bu istasyonlarda zaman zaman veri kayıpları olmaktadır. Sürekli gözlemlenmesi gereken bu katmandaki veri kayıpları, ilk aşamada özgün uzaysal aradeğerleme yöntemi kullanılarak tamamlanmaya çalışılmıştır. Öncelikle 2009 ve 2010 yılları üzerinden bazı istasyonlar pilot seçilmiş ve bu istasyonların TEİ değerleri komşuluklarından kestirilmiştir. Belirlenen bir istasyon için en iyi kestirimler, belirlenmiş istasyona göre simetrik seçilmiş dört komşuluk ile iki gün kullanılarak elde edilmiştir. Fiziksel nedenlerden ötürü herhangi bir istasyon için her zaman uygun dört komşuluk bulunmamaktadır. Bunun yanısıra iki komşuluk iki gün ve bir komşuluk bir gün üzerinden yapılan analizlerde de benzer hata normlarına ulaşılmıştır. Ayrıca herbir istasyonun herbir komşuluğunun tek tek katkılarına bakılmış ve bu katkıların 0-80 km, 80-100 km, 100-120 km ve 120-150 km aralıklarındaki etkileri gözlemlenmiştir. 2009, 2010, 2011 ve 2010-2011 yılları üzerinden yapılan çalışma sonucunda, herbir yılın belirlenmiş aralıklar için enbüyük olabilirlik seçimi altında ortalamalama değeri ve standart sapması hesaplanmış ve Gauss OYF grafikleri elde edilmiştir. 2010-2011 yıllarının birlikte analiz edildiği ve iki yıla ait 0-80 km komşuluğundaki tüm katsayılar kullanılarak, ortalama değeri 0.99978 ve standart sapması 0.15186 olarak hesaplanmış normal dağılıma sahip bir OYF fonksiyonundan rastgele çekilen bir katsayı ile kestirimin yapılabileceği sonucuna varılmıştır. Çalışmanın devamında uzay-zaman aradeğerleme yöntemleri bir araya getirilmiş sistemin başarımı ölçülmüştür. Çalışılan sistemlerin hassasiyetinin 3 TECU olduğu göz önüne alındığında, yapılan hataların iyonkürenin sakin ve bozulmalı olduğu her iki durumda da hassasiyetten daha az olduğu görülmüş ve TEİ kestirimleri her durumda düşük hata değerleriyle elde edilmiştir. Böylece orta enlem bölgesindeki herhangi bir istasyonun eksik verileri uzay-zaman aradeğerleme yöntemi ile tamamlanarak yüksek çözünürlüklü ve güvenilir bir veri seti elde edilmesine olanak tanınmıştır.

Tezin ikinci aşamasında, konumda ve zamanda değişiklik gösteren iyonküre katmanı, bir yönseme fonksiyonu ve bir rassal kalıntı fonksiyonunun toplamı şeklinde yazılarak, rassal fonksiyon olarak ifade edilmiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda orta enlem iyonküre yönsemesinin doğrusal olarak modellenebileceği gösterilmiştir. Bu tez kapsamında Türkiye ve KKTC üzerinde her beş dakikada bir doğrusal yönseme modelinin parametreleri kestirilmiş ve haritalar çıkartılmıştır. Çalışma yapılırken daha sık ve düzenli veri seti elde etmek amacıyla UKTA yöntemi ile aradığı yapılarak elde edilen yeni bir veri seti üzerinden çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen parametre değerleri ile örnekleme noktalarının yönseme değerleri hesaplanmış ve örnekleme noktalarıyla arasındaki hataya bakılmıştır. Orta enlem bölgesinde yer alan Türkiye üzerinde yapılan bu çalışmada, hata oranlarının ortalama yüzde beşin altında bulunmasıyla TÜBİTAK 109E055 projesi kapsamında elde edilen orta enlem iyonküresinin doğrusal olarak modellenebileceği sonucu desteklenmektedir. İyonkürenin bozulmalı olduğu günlerde ise hatanın arttığı ve sakin olduğu günlerde ise hatanın azaldığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda doğrusal yönseme parametrelerinin yıllık değişimi incelendiğinde mevsimsel değişimin ve üç yıllık değişimi incelendiğinde güneş lekeleri sayısındaki artışın parametrelerin değişimindeki etkisi gözlemlenmiştir. Orta enlem iyonküresinin doğrusal olarak modellenebileceği sonucuna ulaşılmış, iyonkürenin sakin ve bozulmalı olduğu günler yönseme modeliyle ilişkilendirilmiştir. Böylece Türkiye ve KKTC üzerinde yönseme haritaları elde edilmiş ve bu yönseme modeline bakılarak iyonküredeki ani değişimlerin modellenebileceği ve yönseme modelinin durağanlık süreleri hesaplanarak, orta enlem iyonküresinin yönseme haritalarının güncellenme sürelerinin bulunabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Çalışmanın devamında ise rassal kalıntı fonksiyonundan YDS fonksiyonu hesaplanmıştır. YDS fonksiyonu hesaplanırken deneysel YDS üzerine PSO ile Matern uyarlanmıştır. PSO çalıştırılırken öncelikle her uzaklık için eşit ağırlık verecek şekilde maliyet fonksiyonu kullanılmış ve yakın uzaklıklar için uyarlamamanın iyi olmadığı görülmüştür. Bunun üzerine iyonkürenin 150 km içerisinde değişmediği bilgisi altında, 150 km'den yakın olan uzaklıklar için daha fazla ağırlık verilerek yeni maliyet fonksiyonu kullanılmış ve teorik YDS fonksiyonu hesaplanmıştır. Kestirilen teorik YDS fonksiyonu kullanılarak, Evrensel Krigleme yöntemi ile her beş dakikada bir otomatik Türkiye TEİ haritalarının çıkartılmıştır. Sonuç olarak yüksek uzay-zaman çözünürlüklü hassas haritalar otomatik olarak elde edilmiştir.

Tezin son aşamasında Türkiye'yi kapsayan koordinat bölgesi, güneş eksenli koordinat sistemine çevrilmiş ve TDA analizi yapılmıştır. Çalışma yapılırken beşer dakika aralıklarla yedi ardışık zaman dilimi güneş eksenli koordinat düzlemine dönüştürülmüş ve bu yedi farklı bölgenin ortak koordinatları kullanılarak TDA analizi yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda tekil değerlerin toplam enerjisinin ortalamada %98'lik kısmının sadece ilk tekil değerde toplandığı görülmüş ve sadece bu tekil değer kullanılarak TEİ değerleri tekrar oluşturulup düzgelenmiş hataya bakılmıştır. Bunun sonucunda hataların ortalamada %1'in altında olduğu hesaplanmış ve TDA analiz yöntemi ile iyonkürenin her durumunda sadece en yüksek enerjili köşegen değeri kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. En yüksek enerjili köşegen değerinin ise fiziksel olarak ortanca zamana karşılık geldiği sonucuna ulaşılmış ve böylece iyonkürenin zamanda değişiminin onbeş dakika olduğu gösterilmiştir. Sonuç olarak UKTA yöntemiyle elde edilen haritaların kör bir şekilde aradeğerleme yaptığı, tekil değer ile elde edilen geri çatma haritalarının ise daha yumuşak geçişlere izin veren yerel değişimleri içermeyen bir haritalama yöntemi olduğu gösterilmiştir. Elde edilen en yüksek enerjili tekil değerler kullanılarak TEİ rassal fonksiyonu tanımlanacak ve değişimleri incelenecektir.

Sonuç olarak Türkiye üzerinde bölgesel bir YKS alıcı ağı kullanılarak yüksek uzay ve zaman çözünürlükte, TEİ kestirimlerinin uzay-zaman rassal gerçeklemeleri elde edilmiş ve TDA analizi yapılarak rassal fonksiyonun entropisi gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları uzay havası risk analizi için kullanılacaktır ve ayrıca koordinat dönüşümü yapılarak farklı orta enlem bölgeleri, birbirleriyle ve manyetik eşlenikleriyle kıyaslanarak iyonkürenin değişimlere bakılacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Arikan, F., Erol, C.B., Arikan, O., Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data, *Journal of Geophysical Research*, 108(A12), 1469-1480, **2003**.
- [2] Nayir, H., *Yerküresel Konumlama Sistemi İşaretleri Kullanılarak İyonosfer Toplam Elektron İçeriği Kestirimi*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye, **2007**.
- [3] Moon, Y., *Evaluation of 2-Dimensional Ionosphere Models for National and Regional GPS Networks in Canada*, Yüksek Lisans Tezi, The University of Calgary, Alberta, Canada, **2004**.
- [4] Komjathy, A., *Global Ionospheric Total Electron Content Mapping Using the Global Positioning System*, Doktora Tezi, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Kanada.
- [5] Schaer, S., *Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System*, Doktora Tezi, Astronomical Institute, University of Bern, Bern, Switzerland, **1999**.
- [6] Arikan, F., Yilmaz, A., Arikan, O., Sayin, I., Gurun, M., Akdogan, K.E., and Yildirim, S.A., Space Weather Activities of IONOLAB Group: TEC Mapping, *European Geophysical Union*, EGU General Assembly **2009**.
- [7] Arikan, F., Erol, C.B., Arikan, O., Regularized estimation of vertical total electron content from from GPS data for a desired time period, *Radio Science*, 39, RS6012, **2004**.
- [8] Arikan, F., Nayir, H., Sezen, U., Arikan, O., Estimation of Single Station Inter-frequency Receiver Bias Using GPS-TEC, *Radio Science*, 43, RS4004, doi:10.1029/2007RS003785, 2008a, **2008**.
- [9] Nayir, H., Arikan, F., Arikan, O., Erol, C.B., Total Electron Content Estimation with Reg-Est, *Journal of Geophysical Research*, 112, A11313, doi:10.1029/2007JA012459, 2007a, **2007**.
- [10] Yıldız, A., Arikan, O., Arikan, F., *İyonosfer TEİ Verilerinin Uzay-Zamansal Araştırılması*, 20-22 Nisan, Hacettepe Üniversitesi, Kemer, Antalya, **2011**.
- [11] Sayin, I., *Kriging ve Rassal Alan Öncülü ile Toplam Elektron İçeriği Haritalanması*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye, **2008**.
- [12] Toker, C., Gokdag, Y.E., Arikan, F., and Arikan, O., Application of Modified Particle Swarm Optimization Method for Parameter Extraction of 2-D TEC Mapping, *European Geophysical Union*, EGU General Assembly 2012, April 22-27, Vienna, Austria, **2012**.
- [13] Gokdag, Y.E., Arikan, F., Toker, C., and Arikan, O., Sentetik TEİ Yüzeyleri İçin Parçacık Sürü Optimizasyonu ile Parametre Kestirimi, *SIU 2012*, 18-20 Nisan, Ozyegin University, Lykia-World, Fethiye, Mugla, **2012**.

- [14] Wielgosz, P., Brzezinska, D., Kashani, I., Regional Ionosphere Mapping with Kriging and Multiquadratic Method, *Journal of Global Positioning Systems*, 2(1), 48-55, **2003**.
- [15] Olea, R.A., *Geostatistics for Engineers and Earth Scientists*, Kluwe Academic, **1999**.
- [16] Sayin, I., Arikan, F., Arikan, O., Regional TEC Mapping with Random Field Priors and Kriging, *Radio Science*, 2(1), 43, doi:10.1029/2007RS003786, **2008**.
- [17] Kennedy, J., and Eberhart, R., Particle Swarm Optimization, *In Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, p. 1942-1948, **1995**.
- [18] Haupt, S.E., and Haupt, R.L., *Practical Genetic Algorithms*, Wiley Inter-Science, Second Edition.
- [19] Karatay, S., *Deprem ile İyonküre Toplam Elektron İçeriği Arasındaki İlişkinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, TÜRKİYE, **2010**.
- [20] Karatay, S., Arikan, F., Arikan, O., Investigation of total electron content variability due to seismic and geomagnetic disturbances in the ionosphere, *Radio Science*, 45, RS5012, 1-12, 2010d, **2010**.
- [21] Sheldon, M.R., *Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists*, Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics, **1987**.
- [22] Sezen, U., Arikan, F., Arikan, O., Ugurlu, O., Sadeghimorad, A., Online, automatic, near-real time estimation of GPS-TEC: IONOLAB-TEC, *Space Weather*, 11, 297305, doi:10.1002/swe.20054, **2013**.
- [23] Hardly, R.L. Multiquadratic Equations of Topography and Other Irregular Surfaces, *Journal of Geophysical Research*, 76, 1905-1915, **1971**.
- [24] Jin, S., Wang, J., Zhang, H., Zhu, W., Real-Time Monitoring and Prediction of Ionospheric Electron Content by Means of GPS, *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 28(3), 331-337, **2004**.
- [25] Yilmaz, A., Akdogan, K.E., Gurun, M. Regional TEC Mapping Using Neural Networks, *Radio Science*, 44, RS3007, doi:10.1029/2008RS004049, **2009**.
- [26] Arikan, F., Erol, C.B., Arikan, O., Statistical Characterization of Time Variability in Midlatitude Single-Tone HF Channel Response, *Radio Science*, 39, RS01889, 1429-1443, **1998**.
- [27] Köroğlu, O., *TUSAGA ve TUSAGA-Aktif Ağı Verileri ile Toplam Elektron İçeriğinin İstatistiksel Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye, **2012**.

EK 1: Spatio-Temporal Interpolation of Total Electron Content Using a GPS Network

M. N. Deviren,¹ F. Arikan,¹ and O. Arikan²

Received 24 July 2012; revised 27 March 2013; accepted 17 April 2013; published 19 June 2013.

[1] Constant monitoring and prediction of Space Weather events require investigation of the variability of total electron content (TEC), which is an observable feature of ionosphere using dual-frequency GPS receivers. Due to various physical and/or technical obstructions, the recordings of GPS receivers may be disrupted resulting in data loss in TEC estimates. Data recovery is very important for both filling in the data gaps for constant monitoring of ionosphere and also for spatial and/or temporal prediction of TEC. Spatial prediction can be obtained using the neighboring stations in a network of a dense grid. Temporal prediction recovers data using previous days of the GPS station in a less dense grid. In this study, two novel and robust spatio-temporal interpolation algorithms are introduced to recover TEC through optimization by using least squares fit to available data. The two algorithms are applied to a regional GPS network, and for a typical station, the number of days with full data increased from 68% to 85%.

Citation: Deviren, M. N., F. Arikan, and O. Arikan (2013), Spatio-temporal interpolation of total electron content using a GPS network, *Radio Sci.*, 48, 302–309, doi:10.1002/rds.20036.

1. Introduction

[2] Ionosphere is a key player in monitoring Space Weather (SW). The major observable feature of ionosphere is total electron content (TEC), which is defined as the line integral of electron density distribution on given ray path. The variability of TEC directly reflects the variability in electron density profile, which is a complicated function of position, height, and time. In recent decades, the worldwide, dual-frequency GPS receivers provide a cost-effective means in estimating TEC [Coster *et al.*, 1992; Komjathy, 1997; Hajj *et al.*, 2000; Nayir *et al.*, 2007]. GPS receivers can be used in Continuously Operating Reference Station (CORS) networks to increase the accuracy and reliability for positioning and surveying applications. CORS network receivers are generally distributed to a large region, and they can be placed at remote locations [Steigenberger *et al.*, 2006]. Due to various physical or operational disturbances, such as temporary antenna obstructions, power cuts, remote login problems, and geophysical or geomagnetic disturbances, GPS-TEC can be disrupted for a certain period during the day or the GPS receiver may cease to operate for a certain number of days. Services in navigation, positioning,

surveying, and monitoring of SW require continuous operation of GPS receivers and uninterrupted TEC estimation for 24 h. The continuous data sets are used in modeling of ionosphere, TEC mapping, computerized ionospheric tomography (CIT), within-the-hour statistical analysis, ionospheric earthquake precursor studies, and prediction of SW events such as those provided in Erturk *et al.* [2009]; Karatay *et al.* [2010]; Turel and Arikan, [2010]; and Foster and Evans [2008]. Thus, it is an important task to interpolate the missing TEC values within a day or for a whole day. Ionosphere is a magnetoplasma; an anisotropic, inhomogeneous, time and space variable, and time and space dispersive channel. Therefore, spatial and temporal correlation structure of ionosphere has to be utilized in any interpolation scheme. As shown in previous studies such as [Sayin *et al.*, 2010], the temporal wide-sense stationarity (WSS) period of ionosphere is about 7.5–15 min for a quiet day. WSS reduces to 5 min for ionospheric conditions including geomagnetic storms and sunrise/sunset periods. Typical spatial correlation distances roughly correspond to 80 km to 150 km in midlatitude regions [Komjathy, 1997; Karatay *et al.*, 2010; Foster and Evans, 2008]. In order to complete the TEC data gaps, both the geophysical structure and the space-time correlation of ionosphere have to be taken into account [Orús *et al.*, 2005; Hernández-Pajares *et al.*, 2006].

[3] Another important problem is the prediction of spatio-temporal variability in TEC. It may be necessary to estimate the TEC of a GPS station from its neighbors for 1 day and then compare it to the station's own data to observe the spatial differences. Such a study is very useful to predict local disturbances that affect only a few stations in a dense grid. The temporal variability over a station can be observed by

¹Department of Electrical and Electronics Engineering, Hacettepe University, Ankara, Turkey.

²Department of Electrical and Electronics Engineering, Bilkent University, Ankara, Turkey.

Corresponding author: F. Arikan, Department of Electrical and Electronics Engineering, Hacettepe University, Beytepe, Ankara, 06800 Turkey. (arikan@hacettepe.edu.tr)

comparing the station's own data with the predictions from the previous days of the same station in a less dense grid. In this study, two different interpolation algorithms that join spatial and temporal properties of ionosphere are introduced. Both algorithms can be used for both filling in the TEC data gaps and prediction of spatio-temporal variability of TEC over a station. The two algorithms make use of optimization by least squares fit to available data. Spatio-temporal interpolation can be applied for data gaps as short as a few minutes to 24 h. The algorithms are applied to interpolate in the missing GPS-TEC values for Turkish National Permanent GPS CORS Network (TNPNGN) for the years of 2001 to 2011 with great success. In section 2, the two novel spatio-temporal interpolation algorithms are provided. In section 3, the results are presented.

2. The Two Spatio-Temporal Interpolation Algorithms: STI-TEC1 and STI-TEC2

[4] TEC can be interpreted as the total number of electrons in a cylinder of 1 m^2 cross-section on a ray path. The unit of TEC is TECU and 1 TECU is equal to 10^{16} el/m^2 . In this study, TEC values in the direction of local zenith over a GPS station u , for a day d are denoted by a vector $\mathbf{x}_{u;d}$ as

$$\mathbf{x}_{u;d} = [x_{u;d}(1) \dots x_{u;d}(n) \dots x_{u;d}(N_{u;d})]^T \quad (1)$$

where $N_{u;d}$ is the number of TEC values for GPS station u and day d . The superscript T is the transpose operator. If there were no data loss, the number of TEC estimates for a complete data day would be N . For example, a typical commercial GPS receiver provides measurement recordings every 30 s. If TEC estimates are obtained for every 30 s, then the number of TEC values (without any data loss for that day) would be $N = 2 \times 60 \times 24 = 2880$ samples/day. If the number of TEC data for 1 day, $N_{u;d}$ is less than N , then there are missing TEC values in $\mathbf{x}_{u;d}$.

[5] The goal is to combine spatial and temporal interpolation in a unique way to compensate for the missing values of $\mathbf{x}_{u;d}$ either within a day or for a whole day. In the spatial interpolation part of STI-TEC1 and STI-TEC2, the neighboring GPS stations of the network within the radial distance of R_r of station u are taken into account. In the following equations, $N_{u;R_r}$ denotes the number of GPS stations in the neighborhood of station u within a radial distance R_r . In filling a data gap for station u within a day d , the temporal interpolation part of STI-TEC1 and STI-TEC2 both make use of a mathematical function that can be chosen from various alternatives including, but not limited to, cubic splines (C-splines) or polynomials [Kahaner et al., 1989]. Let N_n denote the number of missing TEC values in $\mathbf{x}_{u;d}$, such that if n_i denotes the last sample that has a TEC value before the missing data sequence and n_s denotes the first sample after the missing data sequence, then $N_n = n_s - n_i - 1$. The temporally interpolated data vector for the missing values between the n_i and n_s can be given as

$$\hat{\mathbf{x}}_{u;d;N_n} = f_p(x_{u;d}(n_i), x_{u;d}(n_s), N_n) \quad (2)$$

where f_p is the temporal interpolation function that generates N_n number of samples for the data gap. Typically a third-degree polynomial between the end points of $x_{u;d}(n_i)$ and $x_{u;d}(n_s)$ can be used and for C-splines, the constraint

extends to the point where both the function and the first and second derivatives at the end points have to be continuous [Kahaner et al., 1989]. This constraint guarantees a smooth interpolated section fitting the data at the end points.

[6] STI-TEC1 and STI-TEC2 differ from each other in the spatial interpolation of the data gap as discussed in detail in the following subsections.

2.1. STI-TEC1

[7] In STI-TEC1, the spatial interpolation step primarily takes into account the TEC values of neighbors of station u depending on the radial distance R_r for a number of days prior and/or posterior of day d . Thus, an estimate of $\mathbf{x}_{u;d}$ for station u , in the neighborhood of radius R_r on day d , $\hat{\mathbf{x}}_{u;d;R_r}$, can be obtained as

$$\hat{\mathbf{x}}_{u;d;R_r} = \sum_{v=1}^{N_{u;R_r}} \alpha_{u;d;R_r}(v) \mathbf{x}_{v;d;R_r} \quad (3)$$

where $\alpha_{u;d;R_r}(v)$ is the spatial interpolation coefficient for v th station in the R_r neighborhood of station u for day d . $N_{u;R_r}$ is defined as the number of stations that will be used in the interpolation of TEC that are in the neighborhood of radius R_r of station u . $\mathbf{x}_{v;d;R_r}$ denotes the TEC vector for station v and day d in the neighborhood of radius R_r . The spatial interpolation coefficient $\alpha_{u;d;R_r}(v)$ can be obtained by solving the following minimization problem:

$$\min_{\alpha_{u;d;R_r}(v)} \sum_{d_n=d_i}^{d_s} \left\| \mathbf{x}_{u;d_n} - \sum_{v=1}^{N_{u;R_r}} \alpha_{u;d;R_r}(v) \mathbf{x}_{v;d_n;R_r} \right\|_2^2 \quad (4)$$

for the total number of days $N_{d_s-d_i}$ from day d_i to day d_s prior to the day d . It is assumed that neighboring stations v have complete temporal data for $N_{d_s-d_i}$ number of days. $\|\cdot\|_2$ denotes the \mathcal{L}_2 norm corresponding to the metric distance between two vectors. The minimization in equation (4) can be obtained in closed form and the interpolation coefficients can be obtained as

$$\underline{\alpha}_{u;d;R_r} = \left(\sum_{d_n=d_i}^{d_s} \mathbf{X}_{u;d_n;R_r}^T \mathbf{X}_{u;d_n;R_r} \right)^{-1} \left(\sum_{d_n=d_i}^{d_s} \mathbf{b}_{u;d_n;R_r} \right) \quad (5)$$

where $\underline{\alpha}_{u;d;R_r}$ denotes the optimized interpolation coefficient vector for station u , day d and in the neighborhood R_r , and it is given as

$$\underline{\alpha}_{u;d;R_r} = [\alpha_{u;d;R_r}(1) \dots \alpha_{u;d;R_r}(v) \dots \alpha_{u;d;R_r}(N_{u;R_r})]^T \quad (6)$$

$\mathbf{X}_{u;d_n;R_r}$ in equation (5) is the matrix whose columns are TEC vectors from neighboring stations for day d_n . Specifically, $\mathbf{X}_{u;d_n;R_r}$ can be expressed as

$$\mathbf{X}_{u;d_n;R_r} = [\mathbf{x}_{1;d_n;R_r} \dots \mathbf{x}_{v;d_n;R_r} \dots \mathbf{x}_{N_{u;R_r};d_n;R_r}] \quad (7)$$

and the vector $\mathbf{b}_{u;d_n;R_r}$ in equation (5) is given as

$$\mathbf{b}_{u;d_n;R_r} = \mathbf{X}_{u;d_n;R_r}^T \mathbf{x}_{u;d_n} \quad (8)$$

[8] The temporal interpolation of missing TEC values can be obtained using equation (2). Then, the separate temporally and spatially interpolated data from equation (2) and equation (3) can be combined with smoothing function that favors the temporal interpolation at the end points and spatial

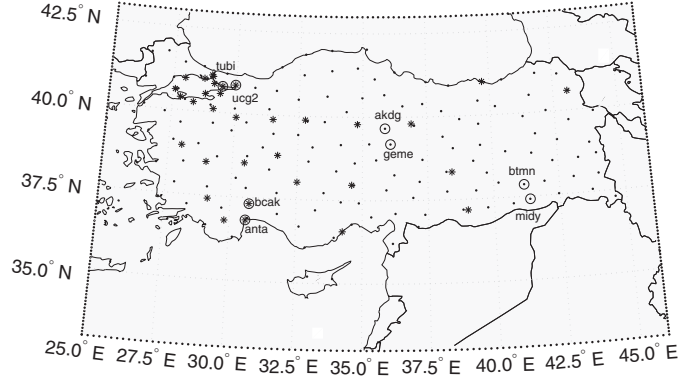


Figure 1. Distribution of TNPNGN (asterisk) and TNPNGN-Active (dots) GNSS CORS receiver station network. The circles indicate the stations that have been used in the manuscript.

interpolation in between. The joint spatio-temporal interpolation, STI-TEC1, can thus be achieved using a combiner matrix \mathbf{G} as shown below

$$\hat{\mathbf{x}}_{u;d;c} = \mathbf{G}\hat{\mathbf{x}}_{u;d;R_r} + (\mathbf{I} - \mathbf{G})\hat{\mathbf{x}}_{u;d;N_n} \quad (9)$$

where $\hat{\mathbf{x}}_{u;d;c}$ is the joint spatio-temporal interpolated TEC vector; \mathbf{I} is the identity matrix, and the combiner diagonal matrix \mathbf{G} can be chosen as a solution to the following minimization problem:

$$\min_{\mathbf{G}} \sum_{d_n=d_i}^{d_s} \|\mathbf{x}_{u;d_n} - \hat{\mathbf{x}}_{u;d_n;c}\|_2^2 \quad (10)$$

The combiner diagonal matrix \mathbf{G} can be expressed as $\mathbf{G} = \text{diag}(g_1, \dots, g_k, \dots, g_{N_n})$, where $\text{diag}(\cdot)$ is the diagonal matrix operator. The minimization in equation (10) can be rewritten in a simplified form as

$$\min_{g_1, \dots, g_{N_n}} \sum_{d_n=d_i}^{d_s} \sum_{k=1}^{N_n} [x_{u;d_n}(k) - g_k \hat{x}_{u;d_n;R_r}(k) - (1 - g_k) \hat{x}_{u;d_n;N_n}(k)]^2 \quad (11)$$

The optimal g_k can be found independent of each other as the minimizer of the following equation:

$$\min_{g_k} \sum_{d_n=d_i}^{d_s} [x_{u;d_n}(k) - \hat{x}_{u;d_n;N_n}(k) - g_k (\hat{x}_{u;d_n;R_r}(k) - \hat{x}_{u;d_n;N_n}(k))]^2 \quad (12)$$

The solution can be obtained as follows:

$$g_k = \frac{\sum_{d_n=d_i}^{d_s} (\hat{x}_{u;d_n;R_r}(k) - \hat{x}_{u;d_n;N_n}(k)) (x_{u;d_n}(k) - \hat{x}_{u;d_n;N_n}(k))}{\sum_{d_n=d_i}^{d_s} (\hat{x}_{u;d_n;R_r}(k) - \hat{x}_{u;d_n;N_n}(k))^2} \quad (13)$$

In a GPS network, where many operational faults occur, it is difficult to find a number of consecutive days with full TEC estimates between days d_i to d_s for both station d and its neighboring stations in a radius of R_r . In most cases, 1 day before the day of interest and one neighbor in a radius of R_r are the available data sources. Therefore, in cases where there is highly sparse data in space and time, equation (13) can be rewritten using an alternate combiner function as

$$g_k = 1 - \frac{e^{-\beta(k-1)} + e^{-\beta(N_n-k)}}{1 + e^{-\beta(N_n-1)}} \quad (14)$$

where β can take values between 0 and 1, where $\beta = 0$ corresponds to only temporal interpolation.

2.2. STI-TEC2

[9] An alternate spatio-temporal interpolation, STI-TEC2, can be performed by giving more weight to temporal data of the station u . In filling the data gaps with STI-TEC2, the spatial interpolation from the neighbors are used only as a multiplying factor that guarantees the spatial homogeneity in ionosphere. Thus, the first step of STI-TEC2 takes into account the TEC data of station u 1 day before and 1 day after the missing day d as the primary interpolator. An estimate of $\mathbf{x}_{u;d}$ for station u , day d from $\mathbf{x}_{u;d-1}$ and $\mathbf{x}_{u;d+1}$, $\hat{\mathbf{x}}_{u;d}$, can be obtained as

$$\hat{\mathbf{x}}_{u;d} = \sum_{\substack{d_n=d-1 \\ d_n \neq d}}^{d+1} \alpha_{u;d_n} \mathbf{x}_{u;d_n} \quad (15)$$

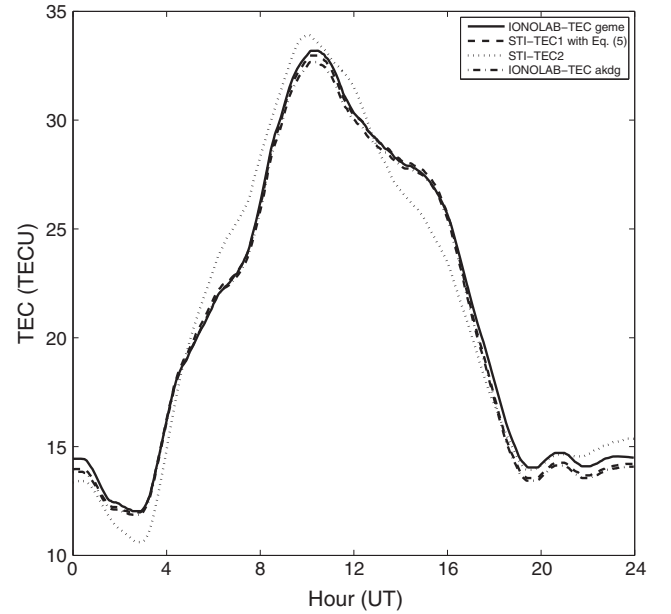


Figure 2. Application of STI-TEC1 with equation (5) (dashed line), and STI-TEC2 (dotted line) to 24 h gap of geme on 30 March 2011, using akdg (dash-dotted line) as a neighboring station. The original IONOLAB-TEC estimate for geme on 30 March 2011 is given with a solid line.

Table 1. Mean and Standard Deviation for Gaussian Distribution of $\alpha_{u;d;R_r}$

Neighbor Distance to Station u	$\hat{\mu}_\alpha$	$\hat{\sigma}_\alpha$
0–80 km	0.859978	0.015186
80–100 km	0.859972	0.016062
100–120 km	0.859981	0.017308
120–150 km	0.859974	0.020952

where $\alpha_{u;d_n}$ is the temporal interpolation coefficient for d_n th day of station u . The temporal interpolation coefficient $\alpha_{u;d_n}(v)$ can be obtained by solving the following minimization problem:

$$\min_{\alpha_{u;d_n}} \sum_{\substack{d_n=d-1 \\ d_n \neq d}}^{d+1} \left\| \mathbf{x}_{u;d_n} - \sum_{\substack{d_n=d-1 \\ d_n \neq d}}^{d+1} \alpha_{u;d_n} \mathbf{x}_{v;d_n} \right\|_2^2 \quad (16)$$

It is assumed that station u has complete temporal data for days $d-1$ and $d+1$. The minimization in equation (16) can be obtained in closed form as

$$\underline{\alpha}_{u;d} = \left(\sum_{\substack{d_n=d-1 \\ d_n \neq d}}^{d+1} \mathbf{X}_{u;d_n}^T \mathbf{X}_{u;d_n} \right)^{-1} \left(\sum_{\substack{d_n=d-1 \\ d_n \neq d}}^{d+1} \mathbf{b}_{u;d_n} \right) \quad (17)$$

where $\underline{\alpha}_{u;d}$ denotes the optimized coefficient vector for station u , day d , and it can be given as

$$\underline{\alpha}_{u;d} = [\alpha_{u;d-1} \ \alpha_{u;d+1}]^T \quad (18)$$

The data matrix of station u , $\mathbf{X}_{u;d_n}$, excludes the data of station u for day d , and it can be obtained from days $d-1$ and $d+1$ as

$$\mathbf{X}_{u;d_n} = [\mathbf{x}_{u;d-1} \ \mathbf{x}_{u;d+1}] \quad (19)$$

and

$$\mathbf{b}_{u;d_n} = \mathbf{X}_{u;d_n}^T \mathbf{x}_{u;d_n}. \quad (20)$$

When the above minimization problem is solved for one station u and 1 day d , equation (18) becomes

$$\underline{\alpha}_{u;d} = [1/2 \ 1/2]^T \quad (21)$$

Although the coefficients in equation (21) produce a reasonable temporal interpolation for quiet midlatitude ionosphere, it cannot represent significant diurnal variations due to ionospheric disturbances. In order to include the daily variability, the spatial modifications can be included using the GPS stations in the neighborhood of u within a radial distance R_r . Equation (15) can be modified to

$$\hat{\mathbf{x}}_{u;d} = \sum_{\substack{d_n=d-1 \\ d_n \neq d}}^{d+1} r_{d;d_n} \alpha_{u;d_n} \mathbf{x}_{u;d_n} \quad (22)$$

where

$$r_{d;d_n} = \frac{1}{N_{u,R_r}} \sum_{v=1}^{N_{u,R_r}} \frac{\bar{\mathbf{x}}_{v;d}}{\bar{\mathbf{x}}_{v;d_n}}. \quad (23)$$

In equation (23), the overline denotes the mean of TEC values for station v and day d or d_n . The ratio factor in equation (23) introduces a correction for ionospheric variability from the neighbors of station u .

[10] For the temporal interpolation of a data gap for station u within the day d , the interpolation in equation (2) can be used. The separate temporally and spatio-temporally interpolated data in equations (2) and (22) can be combined with smoothing function as shown below

$$\hat{\mathbf{x}}_{u;d;t} = \mathbf{G}_t \hat{\mathbf{x}}_{u;d} + (\mathbf{I} - \mathbf{G}_t) \hat{\mathbf{x}}_{u;d;N_n} \quad (24)$$

where $\hat{\mathbf{x}}_{u;d;t}$ is the joint spatio-temporal interpolated TEC vector, and \mathbf{I} is the identity matrix. The diagonal elements of the combiner matrix \mathbf{G}_t , $g_{t;k}$, can be chosen similar to the combiner in equation (14) as

$$g_{t;k} = 1 - \frac{e^{-\beta(k-1)} + e^{-\beta(N_n-k)}}{1 + e^{-\beta(N_n-1)}}. \quad (25)$$

[11] The developed techniques of STI-TEC1 and STI-TEC2 are applied to interpolate the missing data sections of TNPNG as discussed in detail in the following section.

3. Results

[12] In this study, novel STI-TEC1 and STI-TEC2 interpolation methods are applied to TNPNG and TNPNG-Active Continuously Operating Receiver Station (CORS) networks. TNPNG consists of 23 stations, some permanent and some mobile, that operated between 2001 to 2008. TNPNG-Active is made up of 146 CORS GNSS stations distributed uniformly across Turkey and North Cyprus Turkish Republic since May 2009. The receiver stations are indicated in Figure 1 for both TNPNG and TNPNG-Active network.

[13] The GPS-TEC values are estimated as IONOLAB-TEC (www.ionolab.org) based on Reg-Est algorithm and IONOLAB-BIAS as given in *Nayir et al.* [2007] and *Arikan et al.* [2004, 2008]. Cycle slip faults and very short duration gaps in pseudorange and phase delay due to momentary antenna obstructions are corrected in IONOLAB-TEC preprocessing algorithm [*Sezen and Arikan, 2012*]. If IONOLAB-TEC gaps are less than 15 min and TEC difference between gap ends is less than 3 TECU, equation (2) is used with C-spline interpolation. Both STI-TEC1 and STI-TEC2 are used to fill the TEC gaps whose duration is longer than 15 min and/or whose TEC difference between gap ends is more than 3 TECU.

[14] In TNPNG-Active, for a typical station, the percentage of days that have full TEC data without any gaps is 68. For some remote stations, this number can get as low as 37%. STI-TEC1 and STI-TEC2 are both applied to all TNPNG-Active stations and the Marmara Region permanent CORS stations of TNPNG separately. With STI-TEC1, on the average, the number of days with full data increased from 68% to 82%. For example, in 2009, the data increase for anr station is 17%; For fasa station, the increase is 12%; and for tnce station, the increase in data is 25%. In extreme cases, in 2011, snop station has 311 days with full data, and the number of days of complete data increased only by 0.8% to 314 days after the application of STI-TEC1 algorithm. On the other hand, in 2011, vaan station has 64 complete data days and with STI-TEC1, the number of days that have complete data is 314 with 68% increase. Similarly, using STI-TEC2 interpolation algorithm, the number of days that have full data improved from 68% to 75% for a typical station.

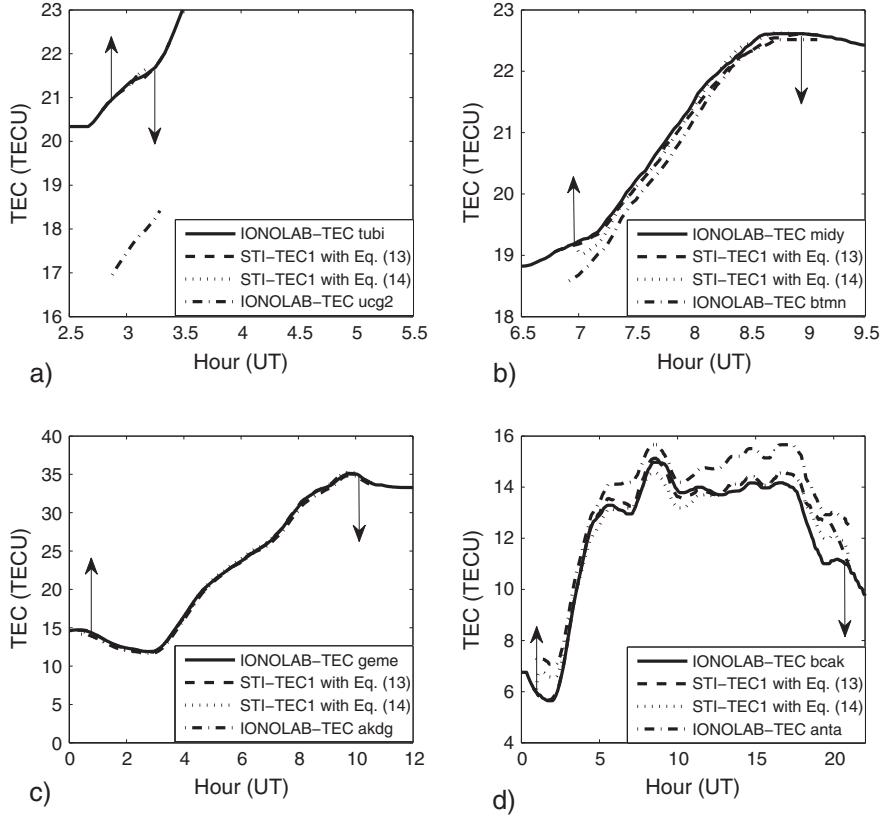


Figure 3. Application of STI-TEC1 with equation (13) (dashed line) and equation (14) (dotted line) (a) 15 min data gap of tubi on 31 March 2001, (b) 2 h data gap of midy on 6 August 2011, (c) 10 h data gap of game on 31 March 2011, (d) 20 h data gap of bcaak on 21 June 2006. The arrows indicate the initial and final samples for interpolation. The original IONOLAB-TEC estimates in each subplot are given in solid line, and neighbors are indicated with dash dotted line.

[15] The performance of STI-TEC algorithms are measured using Symmetric Kullback-Leibler Distances, $e_{Sf}(u; d; N_n)$, and normalized \mathcal{L}_2 norms, $e_{Ni}(u; d; N_n)$, as follows

$$e_{Sf}(u; d; N_n) = \sum_{n=1}^{N_n} \left[\frac{\hat{x}_{u;d;i}(n)}{\bar{x}_{u;d;i}} \ln \left(\frac{\hat{x}_{u;d;i}(n) \bar{x}_{u;d;i}}{x_{u;d;N_n}(n) \bar{x}_{u;d;N_n}} \right) + \frac{x_{u;d;N_n}(n)}{\bar{x}_{u;d;N_n}} \ln \left(\frac{x_{u;d;N_n}(n) \bar{x}_{u;d;N_n}}{\hat{x}_{u;d;i}(n) \bar{x}_{u;d;i}} \right) \right] \quad (26)$$

and

$$e_{Ni}(u; d; N_n) = \frac{\|\mathbf{x}_{u;d;N_n} - \hat{\mathbf{x}}_{u;d;i}\|}{\|\mathbf{x}_{u;d;N_n}\|} \quad (27)$$

for station u , day d , and gap of N_n samples. i can be c for STI-TEC1 or t for STI-TEC2. Both algorithms are tested on 23 stations between 2001 and 2008, and on 146 stations for 2009 to 2011. When both algorithms are tested for interpolations for different temporal gaps, different ionospheric states, and with different neighbors within 150 km, it is observed that TEC can be robustly and successfully estimated using one neighboring station and using $(d-1)$ th day using equation (3).

[16] An example for applications of STI-TEC1 and STI-TEC2 for a 24 h data gap is provided in Figure 2 for station game (Gemerek, Sivas, Turkey) located at [39.18°N, 36.08°E] on a quiet day of 30 March 2011. The neighboring

station is chosen as akdg (Akdağmadeni, Sivas, Turkey) at [39.66°N, 35.87°E]. The distance between game and akdg is 56 km, and they are both in TNPNG-Active. game and akdg stations are indicated in Figure 1 with circles. In application of STI-TEC1 for a 24 h gap, the temporal interpolation combiner is not used. STI-TEC1 is implemented only with equation (3) in this case. The interpolation coefficients $\alpha_{u;d;R_r}$ in equation (5) are computed using akdg on 29 March 2011. In Figure 2, the STI-TEC1 interpolation with equation (5) is given with a dashed line. For this case, $e_{Sc} = 1.14 \times 10^{-4}$, and $e_{Ni} = 1.4 \times 10^{-2}$. The application of STI-TEC2 as an interpolator for 24 h gap for game on 30 March 2011 is also provided in Figure 2 with a dotted line. For this case, akdg station is used as the neighbor. The interpolation coefficients are computed using 29 March 2011 and 31 March 2011, 1 day prior and 1 day after the interpolation day. The SKLD and L2 norm for STI-TEC2 application are $e_{Sf} = 1.8 \times 10^{-3}$ and $e_{Ni} = 5.6 \times 10^{-2}$. As it can be observed from Figure 2, on a quiet day of ionosphere, the STI-TEC1 with only equation (5) can be used with high reliability. STI-TEC2 is also a good performer on a quiet day and it can interpolate whole 24 h with reasonable accuracy.

[17] STI-TEC1 interpolation is applied to all TNPNG-Active stations using one neighbor and one prior day in the interpolation equation (3). All estimated $\alpha_{u;d;R_r}$ values within a year are grouped with respect to the distance to the neighboring station as 0–80 km, 80–100 km, 100–120 km, and

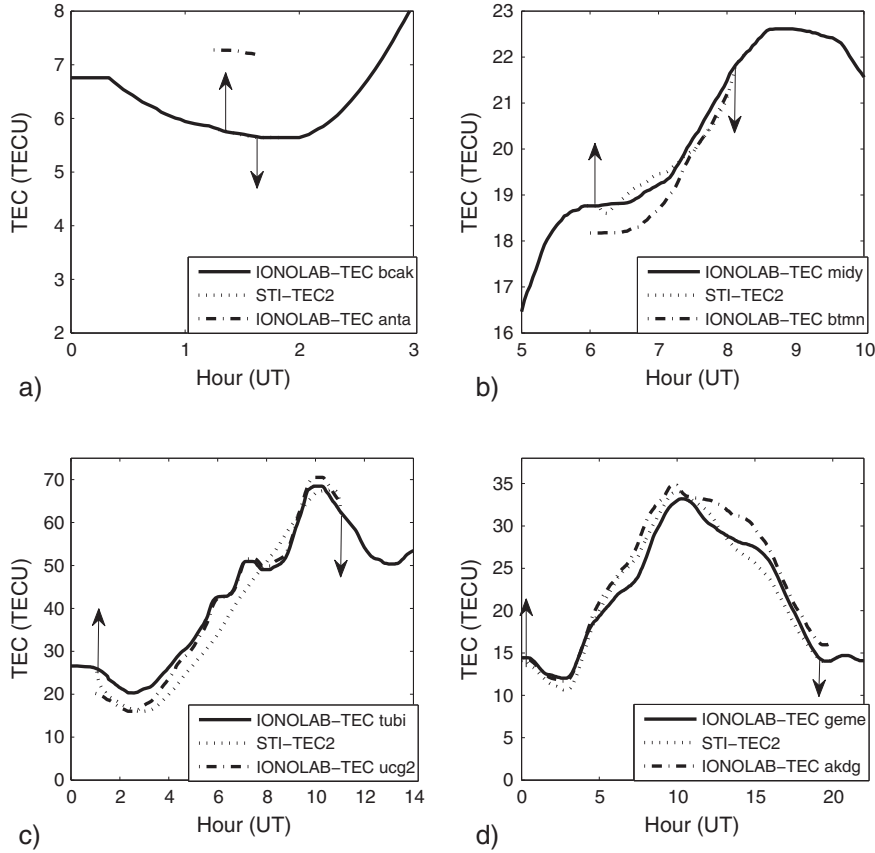


Figure 4. Application of STI-TEC2 in equation (24) with equation (25) (dotted line), (a) 15 min data gap of bcak on 21 June 2006, (b) 2 h data gap of midy on 6 August 2011, (c) 10 h data gap of tubi on 31 March 2001, (d) 20 h data gap of gene on 30 March 2011. The arrows indicate the initial and final samples for interpolation. The original IONOLAB-TEC estimates in each subplot are given in solid line, and neighbors are indicated with dash dotted line.

120–150 km. A histogram is drawn for each radius category, and it is observed that the interpolation coefficient $\alpha_{u;d;R_j}$ has a Gaussian distribution with mean, $\hat{\mu}_\alpha$, and standard deviation, $\hat{\sigma}_\alpha$. The parameters of normal distribution are obtained in the maximum likelihood sense from the data. The parameters $\hat{\mu}_\alpha$ and $\hat{\sigma}_\alpha$ for the years of 2010 and 2011 combined are provided in Table 1. As it is observed from Table 1, the distance of neighboring station within 150 km does not affect the mean of the distribution, yet the standard deviation increases slightly as the distance of the neighbor increases. For neighboring stations that are farther than 150 km radius of station u , the ionospheric correlation decreases. Thus, the STI-TEC1 interpolation is not applied for neighbors which are more than 150 km apart. In *Turel and Arikani [2010]*, it is stated that for GPS stations that are located in midlatitude

that have no more than $\pm 5^\circ$ latitude difference from each other, the within-the-hour probability density functions of TEC are very similar. Thus, it might be expected that the values in Table 1 can be used for any GPS network located in any midlatitude region to interpolate TEC values from neighboring stations. For the case of a single GPS station, nearest Global Ionospheric Map (GIM) grid point values can be utilized (<ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/iono>).

[18] In section 2.1, two possible combiner coefficients for spatio-temporal interpolation are proposed in equations (13) and (14) to be used in equation (9). In Figure 3, the performance of these two possible combiners is presented for 15 min, 2 h, 10 h, and 20 h gaps, for various ionospheric conditions. In each subplot, the solid line indicates the original IONOLAB-TEC estimate for each station and

Table 2. $e_{S_i}(u; d; N_n)$ and $e_{N_i}(u; d; N_n)$ Values for the Interpolations Provided in Figures 3 and 4 for Stations and Dates Given in the Subfigures

	15 min	2 h	10 h	20 h
$e_{S_c}(u; d; N_n)$ with (13)	1.22×10^{-6}	3.05×10^{-6}	1.07×10^{-5}	5.74×10^{-4}
$e_{S_c}(u; d; N_n)$ with (14)	2.40×10^{-3}	8.37×10^{-6}	4.09×10^{-5}	9.73×10^{-4}
$e_{S_i}(u; d; N_n)$ with (25)	3.11×10^{-6}	7.50×10^{-5}	6.90×10^{-3}	1.70×10^{-3}
$e_{N_c}(u; d; N_n)$ with (13)	1.70×10^{-3}	4.40×10^{-2}	4.40×10^{-3}	3.86×10^{-2}
$e_{N_c}(u; d; N_n)$ with (14)	2.59×10^{-6}	4.80×10^{-2}	7.70×10^{-3}	4.12×10^{-2}
$e_{N_i}(u; d; N_n)$ with (25)	2.90×10^{-3}	1.26×10^{-2}	10.82×10^{-2}	5.58×10^{-2}

for each day. STI-TEC1 using equation (9) with equation (13) is given with dashed line. STI-TEC1 using equation (9) with equation (14) is given with dotted line. The arrows indicate the beginning and end points of interpolation. In Figure 3a, 15 min data gap of station tubi is interpolated using the neighboring station ucg2 (44 km away from tubi), on 31 March 2001, during which there is a negative disturbance in ionosphere in a solar maximum year. In Figure 3b, 2 h data gap of station midy is interpolated using the neighboring station btmn (53 km away from midy), on 6 August 2011, a severe ionospheric storm day. The year 2011 is in the ascending phase of solar cycle 24. In Figure 3c, 10 h data gap of station geme is interpolated using the neighboring station akdg (56 km away from geme), on 31 March 2011, a quiet day. In Figure 3d, 20 h data gap of station bcak is interpolated using the neighboring station anta (56 km away from bcak), on 21 June 2006, summer solstice day for the northern hemisphere in a solar minimum year. All mentioned stations are indicated in Figure 1 with circles. tubi, ucg2, bcak, and anta are TNPNG stations and geme, akdg, midy, and btmn are TNPNG-Active stations. It is observed from Figure 3 that STI-TEC1 performs very well as a spatio-temporal interpolator with various length data gaps and on both quiet and disturbed days of ionosphere. When equations (13) and (14) in equation (9) are compared with each other, the computation of STI-TEC1 with equation (14) as a combiner works without a demand on data of the station for previous days. In all of these examples in Figure 3, β is chosen as 0.35.

[19] An example for application of STI-TEC2 in equation (24) using equation (25) is provided in Figure 4 for 15 min, 2 h, 10 h and 20 h gaps, for various ionospheric conditions. In each subplot, the solid line indicates the original IONOLAB-TEC estimate for each station and for each day. STI-TEC2 using equation (24) with equation (25) is given with a dotted line. The arrows indicate the beginning and end points of interpolation. In Figure 4a, 15 min data gap of station bcak is interpolated using the neighboring station anta, on 21 June 2006, summer solstice day. In Figure 4b, 2 h data gap of station midy is interpolated using the neighboring station btmn, on 6 August 2011, a severe ionospheric storm day. In Figure 4c, 10 h data gap of station tubi is interpolated using the neighboring station ucg2, on 31 March 2001, where there is a negative disturbance in ionosphere. In Figure 4d, 20 h data gap of station geme is interpolated using the neighboring station akdg, on 30 March 2011, a quiet day. In all of these examples in Figure 4, β value in the combiner equation (25) is chosen as 0.35.

[20] The $e_{ST}(u; d; N_n)$ and $e_{NT}(u; d; N_n)$ values for the interpolations provided in subplots of Figures 3 and 4 are given in Table 2. It is observed that both STI-TEC1 and STI-TEC2 are very successful in interpolation of gaps with different sizes with both error norms for quiet days of ionosphere. For disturbed days of ionosphere and with data gaps that are longer than 6 h, STI-TEC1 must be preferred.

4. Conclusion

[21] Two novel spatio-temporal interpolation algorithms are developed both to fill in the data gaps and to predict spatio-temporal variability of TEC in GPS networks. The algorithms make use of optimization of spatial and temporal correlation of ionosphere by least squares fit to available

data. The two algorithms, STI-TEC1 and STI-TEC2, are applied separately to TNPNG between 2001 and 2008 and TNPNG-Active between 2009 and 2011. The missing TEC data for durations longer than 15 min to 24 h are interpolated using both neighboring station TEC values. In the computation of interpolation coefficients and combiners, the data of previous day and 1 day after the interpolation day are utilized. With the application of STI-TEC1, the days with complete data increased from 68% to 85%. With STI-TEC2, the rate of increase is from a typical 62% to 75%. The algorithms are tested using Symmetric Kullback-Leibler distance and normalized \mathcal{L}_2 norm. With both norms, it is observed that the interpolated data agrees with the original data of the station with great success for any gap length from a few minutes to 24 h. STI-TEC1 can be used with any data gap length and for any ionospheric condition. The interpolation error of STI-TEC2 increases for gaps longer than 6 h for disturbed days of the ionosphere. The algorithms can be applied to any GPS regional network data in midlatitude regions using the TEC data from neighboring stations within 150 km radius. The spatio-temporal coefficients can be obtained by generating random numbers from a Gaussian distribution whose mean and standard deviations are provided in this study. For single stations that are not located in a network, closest GIM grid point can be substituted to fill in the TEC gaps using the same distribution.

[22] **Acknowledgment.** This study is supported by TUBITAK EEEAG grant 109E055.

References

- Arikan, F., C. B. Erol, and O. Arikan (2004), Regularized estimation of VTEC from GPS data for a desired time period, *Radio Sci.*, *39*, RS6012, doi:10.1029/2004RS003061.
- Arikan, F., H. Nayir, U. Sezen, and O. Arikan (2008), Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC, *Radio Sci.*, *43*, RS4004, doi:10.1029/2007RS003785.
- Coster, A. J., E. M. Gaposchkin, and L. E. Thornton, (1992), Real-time ionospheric monitoring system using the GPS, *Tech. Rep. 954*, Lincoln Laboratory, Lexington, MA.
- Erturk, O., O. Arikan, and F. Arikan (2009), Tomographic reconstruction of the ionospheric electron density as a function of space and time, *Adv. Space Res.*, *43*, 1702–1710.
- Foster, M. P., and A. N. Evans (2008), An evaluation of interpolation techniques for reconstructing ionospheric TEC maps, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, *46*, 2153–2163.
- Hajj, G. A., L. C. Lee, X. Pi, L. J. Romans, W. S. Schreiner, P. R. Straus, and C. Wang (2000), COSMIC GPS ionospheric sensing and space weather, *TAO*, *11*, 235–272.
- Hernández-Pajares, M., J. M. Juan, and J. Sanz (2006), Medium-scale traveling ionospheric disturbances affecting GPS measurements: Spatial and temporal analysis, *J. Geophys. Res.*, *111*, A07S11, doi:10.1029/2005JA011474.
- Kahaner, D., C. Moler, and S. Nash (1989), *Numerical Methods and Software*, pp. 100–125, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., USA.
- Karatay, S., F. Arikan, and O. Arikan (2010), Investigation of total electron content variability due to seismic and geomagnetic disturbances in the ionosphere, *Radio Sci.*, *45*, RS5012, doi:10.1029/2009RS004313.
- Komjathy, A. (1997), Global ionospheric total electron content mapping using the global positioning system, Ph. D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada.
- Nayir, H., F. Arikan, O. Arikan, and C. B. Erol (2007), Total electron content estimation with Reg-Est, *J. Geophys. Res.*, *112*, A11313, doi:10.1029/2007JA012459.
- Orús, R., M. Hernández-Pajares, J. M. Juan, and J. Sanz (2005), Improvement of global ionospheric VTEC maps by using kriging interpolation technique, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, *67*, 1598–1609.
- Sayin, I., F. Arikan, and K. E. Akdogan (2010), Optimum temporal update periods for regional ionosphere monitoring, *Radio Sci.*, *45*, RS6018, doi:10.1029/2009RS004316.

- Sezen, U., and F. Arikan (2012), A Novel algorithm for cycle slip detection and repair, geophysical research abstracts, 14, EGU2012-7586, EGU General Assembly 2012.
- Steigenberger, P., M. Rothacher, R. Dietrich, M. Fritsche, A. Rülke, and S. Vey (2006), Processing of a global GPS network, *J. Geophys. Res.*, *111*, B05402, doi:10.1029/2005JB003747.
- Turel, N., and F. Arikan (2010), Probability density function estimation for characterizing hourly variability of ionospheric total electron content, *Radio Sci.*, *45*, RS6016, doi:10.1029/2009RS004345.

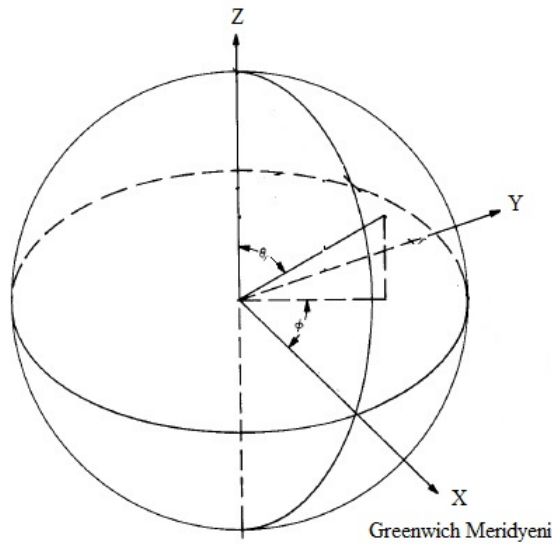
EK 2:Jeodezik Koordinat Sisteminin Güneş Eksenli Koordinat Sistemine Dönüşümü

Jeodezik koordinat sisteminden güneş eksenli koordinat sistemine dönüşüm yapmak amacıyla öncelikle jeodezik koordinatların kartezyen koordinatlara çevrilmesi gerekmektedir. Bu dönüşüm için aşağıdaki eşitlikler kullanılabilir:

$$a = R \sin(90 - \lambda) \cos(\phi) \quad (1)$$

$$b = R \sin(90 - \lambda) \sin(\phi) \quad (2)$$

$$c = R \cos(90 - \lambda) \quad (3)$$

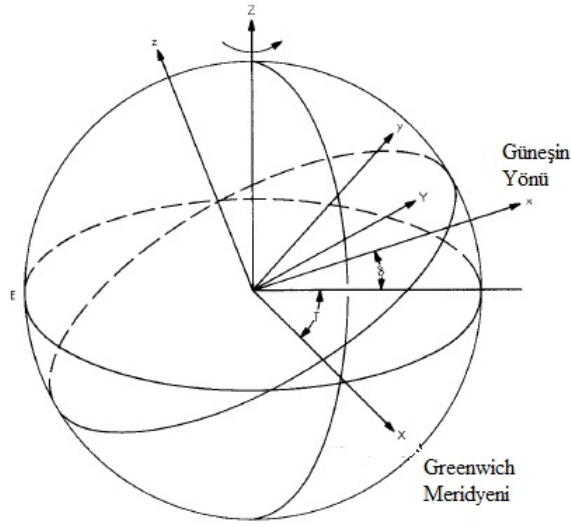


Şekil .1. Jeodezik koordinatlardan kartezyen koordinatlara dönüşüm.

Yukarıdaki eşitliklerde λ ($\lambda = 90 - \theta$) jeodezik koordinatlarda enlemi, ϕ jeodezik koordinatlarda boylamı ve R ise dünyanın merkezinden yüksekliği ifade etmektedir ve aşağıdaki şekilde gösterilebilir:

$$\mathbf{R} = a\hat{X} + b\hat{Y} + c\hat{Z} \quad (4)$$

Eşitlik 4'te verilen \hat{X} Greenwich meridyenini, \hat{Z} dünyanın dönüş eksenine paralel olan yönü ifade ederken, \hat{Y} bu her iki eksene dik olan yönü gösterir.



Şekil .2. Kartezyen koordinatlardan güneş eksenli koordinat sistemine dönüşüm.

Şekil .2'de gösterilen koordinat düzlemi üzerinde kartezyen koordinatlardan, güneş eksenli kartezyen koordinatlara Eşitlik 5, Eşitlik 6 ve Eşitlik 7 kullanılarak dönüşüm yapılabilir.

$$\hat{x} = \hat{X} \cos(T) \cos(\delta) + \hat{Y} \sin(T) \cos(\delta) + \hat{Z} \sin(\delta) \quad (5)$$

$$\hat{y} = -\hat{X} \sin(T) + \hat{Y} \cos(T) \quad (6)$$

$$\hat{z} = \hat{x} \times \hat{y} = -\hat{X} \cos(T) \sin(\delta) - \hat{Y} \sin(T) \sin(\delta) + \hat{Z} \cos(\delta) \quad (7)$$

Yukarıdaki eşitlikler kullanıldığında koordinat dönüşümü yapılan noktanın \mathbf{R} uzaklığı her iki koordinat düzleminde birbirine Eşitlik 8 ile eşlenerek,

$$a\hat{X} + b\hat{Y} + c\hat{Z} = \alpha\hat{x} + \beta\hat{y} + \gamma\hat{z} \quad (8)$$

ve Eşitlik 9 kullanılarak dönüşüm sonrası her bir yöndeki uzunluk bulunabilir.

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(T) \cos(\delta) & \sin(T) \cos(\delta) & \sin(\delta) \\ -\sin(T) & \cos(T) & 0 \\ -\cos(T) \sin(\delta) & -\sin(T) \sin(\delta) & \cos(\delta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (9)$$

Eşitlik 9 ile verilen δ günün bir fonksiyonu olmakla beraber, güneş ışınlarının geliş açısını derece cinsinden ifade etmektedir ve Eşitlik 10 ile hesaplanmaktadır.

$$\delta(d) = 23.5 \times \cos\left(\frac{d - 172}{365} \times 2\pi\right) \quad (10)$$

burada d , yılın kaçınıcı günü olduğunu göstermektedir. T ise güneş ışınlarının Greenwich meridyeni ile arasındaki açıyı derece cinsinden ifade eder ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$T(t) = -180 \times \left(\frac{t - 12 \times 60}{12 \times 60}\right) \quad (11)$$

burada t dakika cinsinden ifade edilmektedir.

Güneş eksenli kartezyen koordinatlardan, güneş eksenli jeodezik koordinatlara geçiş ise Eşitlik 12, Eşitlik 13 ve Eşitlik 14 ile bulunur.

$$R' = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2} \quad (12)$$

$$\lambda' = 90 - \arccos\left(\frac{\gamma}{R'}\right) \quad (13)$$

$$\phi' = \arctan\left(\frac{\beta}{\alpha}\right) \quad (14)$$

Jeodezik koordinatlardan güneş eksenli jeodezik koordinatlara geçilerek zamanda değişimleri enaza indirgenerek incelemeler yapılabilir.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: Muhammet Necat DEVİREN

Doğum Yeri: Ankara

Medeni Hali: Bekar

E-posta: mnecatdeviren@gmail.com

Adresi: Bahçelievler Mahallesi Prof. Muammer Aksoy Caddesi No:57 D:1 Çankaya / ANKARA

Eğitim

Lise: Edremit Anadolu Lisesi, BALIKESİR

Lisans: Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, ANKARA

Yüksek Lisans: Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, ANKARA

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce : İyi

İş Deneyimi

Temmuz 2010-Eylül 2010: Araştırma-Geliştirme Mühendisi, İletişim Sistemleri Grubu, TÜBİTAK Uzay, TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, ANKARA

Deneyim Alanları

-

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

Spatio-Temporal Interpolation of Total Electron Content Using a GPS Network, *Radio Science*, Vol. 48, 302-309, doi:10.1002/rds.20036, 2013

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

Spatio-Temporal TEC Interpolation for TNPGN-Active Stations, *MASFOR 2012*, - Boğaziçi University, İstanbul, 2012.

Türkiye İyonküre Yönsemesinin Kayan Pencere İstatistiksel Analiz Yöntemi ile - İncelenmesi, *SIU 2013*, Sinyal İşleme Kurultayı, Girne, KKTC, 2013.

Automatic Regional Mapping of Total Electron Content Using a GPS Sensor Network and Isotropic Universal Kriging, *FUSION 2013*, İstanbul, 2013.