

**ORTA ENLEM İYONKÜRESİ İÇİN RASSAL ALAN  
MODELİ GELİŞTİRİLMESİ**

**DEVELOPMENT OF RANDOM FIELD MODEL FOR  
MIDLATITUDE IONOSPHERE**

**OZAN KÖROĞLU**

**Prof. Dr. Feza ARIKAN**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim - Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

DOKTORA TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2021

Bu tez kapsamındaki çalışmalar Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından TÜBİTAK 109E055, TÜBİTAK 112E568, ortak TÜBİTAK 115E915 ve RFBR 13-02-91370-CT projesi projesi ve ortak TÜBİTAK 114E092 ve AS CR 14/001 projesi ile desteklenmiştir.

Bu tez çalışmasında kullanılan Toplam Elektron İçeriği (TEİ), Türkiye Sabit GPS Ağı-Aktif (TUSAGA-Aktif), International GNSS Service (IGS) ve European Permanent GPS Network (EUREF) ağlarından kaydedilmiş Receiver Independent Exchange Format (RINEX) verileri işlenerek oluşturulmuştur.

İyonosonda verileri F2 katmanı kritik frekansı ( $f_oF_2$ ), F2 katmanı kritik yüksekliği ( $h_mF_2$ ) Lowell GIRO Data Center (LGDC) Digital Ionogram DataBase (DIDBase) tarafından sağlanan Standard Archive Output (SAO) kayıtlarından elde edilmiştir.

## ÖZET

# ORTA ENLEM İYONKÜRESİ İÇİN RASSAL ALAN MODELİ GELİŞTİRİLMESİ

**OZAN KÖROĞLU**

**Doktora, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü**

**Danışman: Prof. Dr. Feza ARIKAN**

**Haziran 2021, 160 sayfa**

Kısa Dalga (KD), uydu haberleşmesi, seyrüsefer ve uzaktan algılama sistemlerinin başarımında iyonküre büyük öneme sahiptir. Güneş etkinliği ve yerküresel etkilere bağlı olarak yön bağımlı, dağıtılmalı, uzay ve zamanda sürekli değişen karmaşık yapıda plazma ortamıdır. İyonkürenin yapısının ve işleyişinin anlaşılması, iyonkürede meydana gelen değişimlerin gözlenmesi ve modellenmesi için gereklidir. Son derece karmaşık bu yapı istatistiksel olarak incelenebilir. İstatistiksel olarak modellendiğinde temel davranışları kestirilebilir. Ayrıca ileriye dönük tahmin ve kestirim yapılması için altyapı sağlanır. İyonkürenin karakterize edilmesi için en temel belirleyici elektron yoğunluğudur. İyonküre için elektron yoğunluğuna bağlı olarak tanımlanan plazma frekansı iyonkürenin karakteristik parametresidir. İyonkürede ilerleyen radyo dalgaları, plazma yapısı nedeni ile iyonküre tarafından soğurma, dağıtma, kutuplanma kaybı, zaman gecikmesi, Faraday Dönmesi ve faz kayması gibi birçok etkiye maruz kalır. Farklı ölçüm yöntemleri ile elde edilen Toplam Elektron İçeriği (TEİ), F2 katmanının kritik frekansı foF2, kritik yüksekliği hmF2 ve katman kalınlığı gibi parametreler iyonküre araştırmalarında kullanılmaktadır. International Reference Ionosphere (IRI) ve IRI modelini temel alan IRI-Plas gibi modeller kabul görmüş iklimsel, ampirik, deterministik fiziksel iyonküre modelleridir. Bunlar iyonkürenin sakin ve değişkenliğinin az ol-

duğu zamanları aylık saatlik ortanca değerler ile gösterebilse de uzay-zamanda iyonkürenin davranışının takip edilmesi için yetersizdir. Bu çalışmada iyonkürenin uzay-zamanda stokastik modelinin oluşturulabilmesi için yönseme istatistikleri konumda noktasal olarak incelenmiştir. foF2, hmF2, TEİ ve katman kalınlığının geliştirilen IONOLAB-PDF yöntemi ile uzay-zamanda yıllık, mevsimlik, aylık ve saatlik OYF kestirimleri yapılmıştır. İyonküre parametrelerinin hem kendi içinde uzay-zamanda davranışları hem de birbirleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. İyonküre parametrelerinin aylık saatlik parametrik OYFları Lognormal ve Weibull olarak bulunmaktadır. Noktasal olarak foF2'nun parametrik ortalama ve standart sapma kestirimleri IRI-Plas modeline girdi olarak sağlandığı durumda anlık foF2 girildiği duruma yaklaşan elektron yoğunluğu profilleri elde edilmiştir. IRI-Plas modeline stokastik yönseme kestirimleri girildiği durumda rassal gerçeklemeler %70'i  $1\sigma$  ve %95'i  $2\sigma$  içinde kalmıştır. IONOLAB-PDF yöntemi ile noktasal olarak elde edilen iyonküre modelleri IRI-Plas modeline girilerek ampirik deterministik model, ampirik stokastik hale gelmektedir. Orta enlemde IRI-Plas modelinin stokastik olarak yakın gerçek zamanda güncellenmesi için literatürde ilk defa yüksek çözünürlüklü foF2 haritaları, geliştirilen IONOLAB-CK yöntemi ile elde edilmiştir. Yöntemin başarımı iyonkürenin yönsemesini yansıtacak şekilde sentetik yüzeyler kullanılarak hata metrikleri üzerinden incelenmiştir. Hata metriklerinde sentetik yüzeyin değişkenliğinin artması nedeniyle ortaya çıkan artış sınırlı kalmıştır. Gerçek gün ve saat örneklerinde de hata metriklerinde ortalama on kat azalma ve çözünürlükte de yaklaşık beş kat artış olmuştur. IONOLAB-CK yöntemi uygulanarak birinci modalite foF2, ikinci modalite TEİ ile birlikte kullanılarak yüksek çözünürlüklü ve hassas bir şekilde kestirilmiştir. Elde edilen kestirim haritaları yardımı ile IRI-Plas modelinin girdilerini yakın gerçek zamanda güncelleyerek IONOLAB-RAY'de KD için en uygun yanca ve yükseliş gönderim açıları, en uygun frekans otomatik olarak sunulabilmektedir. Kaydedilmiş eğik iyonogramlar ile elde edilen ışın izleme yayılım yolu kestirimleri karşılaştırılmıştır. IONOLAB-CK yöntemi ile kestirilen yüksek çözünürlüklü foF2 haritaları kullanılarak girdileri güncellenen IRI-Plas, IONOLAB-RAY arka plan iyonküre modeli olduğunda gerçek eğik iyonogramda gözlenen değerler IONOLAB-RAY ile vericiden alıcıya başarı ile tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kısa Dalga Haberleşme, İyonküre, Rassal Alan, OYF Kestirimi, Krigleme, Eş-Krigleme.

## **ABSTRACT**

### **Development of Random Field Model for Midlatitude Ionosphere**

**OZAN KÖROĞLU**

**Doctor of Philosophy, Department of Electrical and Electronics  
Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Feza ARIKAN**

**June 2021, 160 pages**

The ionosphere has utmost importance on the performance of Short Wave (SW) and satellite communication, satellite-based navigation, and remote sensing systems. It is an anisotropic, dispersive, and inhomogeneous plasma environment in both space and time. The structure and nature of ionosphere must be well understood for modeling and observation. This complex environment can be analyzed statistically. Statistical analysis and modeling give an advantage of understanding basic trend structure and enable prediction of the ionosphere. The most critical parameter which characterizes the ionosphere is electron density. The plasma frequency is the fundamental characteristic parameter, which depends on the electron density as a plasma environment. Propagation of radio waves in the ionosphere suffers several effects: attenuation, dispersion, polarization shift, time delay, Faraday Rotation, and phase delay due to its plasma structure. Total Electron Content (TEC), the critical frequency of F2 layer,  $f_oF_2$ , the critical height of F2 layer,  $h_mF_2$  and ionospheric slab thickness are essential parameters for investigating ionosphere. International Reference Ionosphere (IRI) and IRI-Plas are widely used ionospheric models. Empirical and deterministic models track low variability conditions and calm periods using hourly monthly medians. However, they have not enough performance on the space-time behavior of the ionosphere. In this disser-

tation, the statistical trend structures of the ionospheric parameters are analyzed using their particular locations. Parametric Probability Density Functions (PDF) are estimated as foF2, hmF2, TEC, and slab thickness for annual, seasonal, monthly, and hourly. The trend behavior of ionospheric parameters is analyzed both space, time, and in-between relations of each parameter using IONOLAB-PDF. Hourly, monthly parametric PDFs are estimated predominantly Weibull and Lognormal. Stochastic electron density profiles are obtained by providing IONOLAB-PDF estimates into the IRI-Plas model as inputs. Therefore, the electron density profiles predicted with IRI-Plas became empirical and stochastic. Statistical realizations of electron density profiles with the update of IONOLAB-PDF are in  $1\sigma$  for %70 and  $2\sigma$  for %95. Besides, high-resolution, regional foF2 maps are estimated in near real-time for updating inputs of the IRI-Plas model for the first time. IONOLAB-CK is a high-resolution interpolation tool based on Kriging methods for ionospheric parameters. The performance of the developed method is investigated using synthetic surfaces by error metrics. The metric error levels remain bounded even the variability of the synthetic surface increases. IONOLAB-CK method improves the interpolation variance five times and increases the interpolation resolution by approximately ten times as compared to Ordinary Kriging. As first modality, spatially sparse sampled foF2 and second modality densely sampled TEC values are used in IONOLAB-CK for good, moderate, and bad ionospheric conditioned example days. High-resolution foF2 maps are obtained using IONOLAB-CK with low interpolation variance. Using high-resolution foF2 and TEC maps, ionospheric slab thickness maps are also obtained for the first time. Obtained high-resolution foF2 maps provide an update for the IRI-Plas model, which is used as a background ionospheric model for the ray tracing algorithm IONOLAB-RAY. Near real-time update provide of IRI-Plas model inputs, and using IONOLAB-RAY; optimum transmission frequency and transmission direction are estimated in both azimuth and elevation for SW communication. The results are compared with oblique ionogram measurements for an oblique transmission experiment between two ionosondes. After providing a high-resolution foF2 update for inputs of IRI-Plas as background ionospheric model, the propagation of both ordinary and extraordinary ray paths successfully estimated.

**Keywords:** HF Communication, Ionosphere, Random Field, PDF Estimation, Kriging, Co-Kriging.

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde çok değerli fikir ve yardımdan öte, yaşadığım her zorlukta yanımda olan, yol göstericiliği ile tüm eğitim ve meslek hayatımdaki en büyük rol model, hakkı asla ödenmez değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Feza Arıkan'a teşekkürlerimi sunarım.

Sevgili eşim, hayat arkadaşım ve aynı zamanda meslektaşım her zaman yanımda olan Meltem olmadan bu çalışma nihayete eremezdi.

Değerli görüş ve önerileri ile karşılaştığımız her probleme ışık tutan Sayın Prof. Dr. Orhan Arıkan'a teşekkür ederim.

Tez izleme aşamalarında ve değerlendirilmesinde yardımlarını esirgemeyen değerli jüri üyeleri Prof. Dr. Gülbin Dural Ünver, Prof. Dr. Atila Yılmaz, Prof. Dr. Sinan Gezici ve Prof. Dr. Cenk Toker'e teşekkür ederim.

Bu tez çalışması kapsamında birlikte çalıştığımız, görüş ve önerileri ile destek olan, Rusya Bilimler Akademisi'nden Sayın Dr. Tamara Gulyaeva'ya ve Çekya Bilimler Akademisi'nden Sayın Dr. Zbyšek Mořna'ya teşekkür ederim.

Ayrıca değerli ailem Nazıkar, Yılmaz ve Furkan Köroğlu, Çiğdem Bilgiç, Lale Şebnem, Nazım ve Ecem Kutlu'ya teşekkür ederim.

Destekleri ve yardımları için Meteksan Savunma ailesine teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
ŞEKİLLER.....	viii
ÇİZELGELER.....	xv
1. GİRİŞ .....	1
2. İYONKÜRE .....	9
2.1. İyonkürenin Yapısı .....	9
2.2. İyonkürede Radyo Sinyal Yayılımı .....	13
2.3. İyonküre Modelleri .....	18
2.3.1. IRI-Plas Modeli .....	19
2.4. İyonküre Ölçümleri .....	22
2.4.1. Uydu Tabanlı Yöntemler .....	22
2.4.1.1. Toplam Elektron İçeriği .....	23
2.4.2. Yer Tabanlı Yöntemler.....	24
2.4.2.1. İyonosonda .....	24
3. IRI-PLAS İYONKÜRE MODELİNİN YEREL STOKASTİK GÜNCELLENMESİ	28
3.1. IONOLAB-PDF.....	31
3.2. Uzay-Zamanda Yerel İyonküre Ölçümlerinin Yönsemesi.....	41
3.3. Uzay Zamanda Bölgesel İyonküre Ölçümlerinin Yönsemesi .....	63
3.4. IRI-Plas Modelinin Rassal İyonküre Benzetimleri ile Güncellenmesi.....	64
4. EŞ-KRİGLEME İLE F2 KATMANI KRİTİK FREKANS HARİTALAMASI .....	70
4.1. Izgara Yapısı ve Dizinleme.....	73
4.2. Sentetik Yüzey .....	75
4.3. Örnekleme Düzeni.....	77
4.4. Başarım Kriterleri .....	79
4.5. Ortalamasız Krigleme .....	81



4.6. IONOLAB-CK .....	86
4.7. IONOLAB-CK Yönteminin Sentetik Yüzeyler Kullanılarak İncelenmesi .....	93
4.8. İyonküre Ölçümleri Rassal Aradeğerleme Uygulanması .....	103
4.9. Çapraz Doğrulama .....	114
5. GÜNCELLENMİŞ IRI-PLAS İYONKÜRE MODELİ İLE DALGA YOLU IŞIN İZLEME UYGULAMASI .....	117
6. SONUÇ .....	139
KAYNAKLAR .....	144
A. İYONOSONDA VE GPS ALICI KOORDİNATLARI .....	153
ÖZGEÇMİŞ .....	157

## ŞEKİLLER

1.1.	İyonküre elektron yoğunluğu [1]. . . . .	1
2.1.	İyonküre coğrafi bölgeleri. . . . .	9
2.2.	Elektron yoğunluğunun yüksekliğe bağlı genel değişimi (IRI-Plas, Pruhonice [50° K-14.6° D] ve 06.06.2014). . . . .	11
2.3.	Güneş etkinliği indisleri, a) Kp, b) Dst, c) Güneş Lekesi Sayısı, d) F10.7 Güneş Işınımı İndisi (2009: siyah düz çizgi, 2012: mavi kesikli çizgi ve 2014: kırmızı kesikli noktalı çizgi). . . . .	14
2.4.	Pruhonice iyonosondası için 15 Mart 2015 günü 1200 GS Elektron Yoğunluğu Profili ( IRI-Plas ile elde edilmiştir.). . . . .	16
2.5.	Alıcı ve verici arasında radyo dalgalarının yayılımı. . . . .	17
2.6.	IRI kullanılarak Pruhonice (Çekya) için 06 Haziran 2014 farklı saatler için elde edilmiş elektron yoğunluğu profili. . . . .	19
2.7.	IRI-Plas kullanılarak Pruhonice (Çekya) için 06 Haziran 2014 farklı saatler için elde edilmiş elektron yoğunluğu profili. . . . .	20
2.8.	22 Haziran 2009 12:00 GS için IRI-Plas modeline foF2 ve TEİ verileri beslendiği koşullar için örnek kestirimler, a) DB049, b) PQ052 (siyah düz çizgi IRI-Plas, kırmızı düz çizgi IRI-Plas'a foF2 girdisi verildiği, mavi düz çizgi IRI-Plas'a TEİ girdisi verildiği durum). . . . .	21
2.9.	22 Şubat 2015 12:00 GS için IRI-Plas modeline foF2 ve TEİ verileri beslendiği koşullar için örnek kestirimler, a) DB049, b) PQ052 (siyah düz çizgi IRI-Plas, kırmızı düz çizgi IRI-Plas'a foF2 girdisi verildiği, mavi düz çizgi IRI-Plas'a TEİ girdisi verildiği durum). . . . .	22
2.10.	Pruhonice iyonosondası 12 Aralık 12 : 30 GS'de kaydedilmiş iyonogram, a) birleşik, b) dikey, c) eğik. . . . .	26
3.1.	IONOLAB-PDF akış diyagramı. . . . .	37
3.2.	foF2, hmF2, ve TEİ örnek verileri birinci, üçüncü ve beşinci satırlar, verilerin deneysel dağılımları (siyah), parametrik OYF kestirimleri (kırmızı kesikli çizgi) ikinci, dördüncü ve altıncı satırlar, birinci sütun JR055 (foF2, hmF2) ve sass (TEİ) 2009 yıllık 0200 – 0300 GS, ikinci sütun PQ052 (foF2, hmF2) ve gope (TEİ) 2012 bahar 1800 – 1900 GS, üçüncü sütun RO041 (foF2, hmF2) ve m0se (TEİ) 2014 Haziran 0400 – 0500 GS. . . . .	40

3.3.	Yıllık veriler üzerinden saat-içi parametrik OYF ortalaması $\hat{\mu}$ ve standart sapma $\hat{\sigma}$ kestirimleri: foF2 (siyah), hmF2 ve TEİ (kırmızı), 2009 (düz çizgi), 2012 (kesikli çizgi), 2014 (kesikli noktalı), birinci satır: JR, ikinci: PQ ve üçüncü satır: RO. ....	44
3.4.	Yaz mevsiminde elde edilen veriler üzerinden saat-içi parametrik OYF ortalaması $\hat{\mu}$ ve standart sapma $\hat{\sigma}$ kestirimleri: foF2 (siyah), hmF2 ve TEİ (kırmızı), 2009 (düz çizgi), 2012 (kesikli çizgi), 2014 (kesikli noktalı), birinci satır: JR055, ikinci: PQ052 ve üçüncü satır: RO041. ....	46
3.5.	Haziran ayından elde edilen veriler üzerinden saat-içi parametrik OYF ortalaması $\hat{\mu}$ ve standart sapma $\hat{\sigma}$ kestirimleri: foF2 (siyah), hmF2 ve TEİ (kırmızı), 2009 (düz çizgi), 2012 (kesikli çizgi), 2014 (kesikli noktalı), birinci satır: JR, ikinci: PQ ve üçüncü satır: RO. ....	47
3.6.	Saat-içi aylık foF2 parametrik OYF ortalama kestirimleri $\hat{\mu}_{foF2}$ , birinci sütun (a-d-g): JR, ikinci sütun (b-e-h): PQ, üçüncü sütun (c-f-i): RO; birinci satır (a-b-c): 2009, ikinci satır (d-e-f): 2012, üçüncü satır (g-h-i): 2014. ....	49
3.7.	Saat-içi aylık hmF2 parametrik OYF ortalama kestirimleri $\hat{\mu}_{hmF2}$ , birinci sütun (a-d-g): JR, ikinci sütun (b-e-h): PQ, üçüncü sütun (c-f-i): RO; birinci satır (a-b-c): 2009, ikinci satır (d-e-f): 2012, üçüncü satır (g-h-i): 2014. ....	50
3.8.	Saat-içi aylık TEİ parametrik OYF ortalama kestirimleri $\hat{\mu}_{TEC}$ , birinci sütun (a-d-g): JR, ikinci sütun (b-e-h): PQ, üçüncü sütun (c-f-i): RO; birinci satır (a-b-c): 2009, ikinci satır (d-e-f): 2012, üçüncü satır (g-h-i): 2014. ....	51
3.9.	Saat-içi aylık foF2 parametrik OYF standart sapma kestirimleri $\hat{\sigma}_{foF2}$ , birinci sütun (a-d-g): JR, ikinci sütun (b-e-h): PQ, üçüncü sütun (c-f-i): RO; birinci satır (a-b-c): 2009, ikinci satır (d-e-f): 2012, üçüncü satır (g-h-i): 2014. ....	53
3.10.	Saat-içi aylık hmF2 parametrik OYF standart sapma kestirimleri $\hat{\sigma}_{hmF2}$ , birinci sütun (a-d-g): JR, ikinci sütun (b-e-h): PQ, üçüncü sütun (c-f-i): RO; birinci satır (a-b-c): 2009, ikinci satır (d-e-f): 2012, üçüncü satır (g-h-i): 2014. ....	54
3.11.	Saat-içi aylık TEİ parametrik OYF standart sapma kestirimleri $\hat{\sigma}_{TEC}$ , birinci sütun (a-d-g): JR, ikinci sütun (b-e-h): PQ, üçüncü sütun (c-f-i): RO; birinci satır (a-b-c): 2009, ikinci satır (d-e-f): 2012, üçüncü satır (g-h-i): 2014. ....	55

3.12.	Katman Kalınlığı OYF kestirimi örnekleri, 1. satır Haziran 2012, 1800-1900 GS ve. 3. satır Ekim 2012, 0500-0600 GS verileri, 2. ve 4. satırlar örnek verilerin deneysel dağılımlar (siyah düz çizgi) ve parametrik OYF kestirimleri (kesikli noktalı kırmızı çizgi). Birinci Sütun JR ve sass, ikinci sütun PQ, üçüncü sütun RO. ....	56
3.13.	Yıllık veriler üzerinden $\tau$ saat-içi parametrik OYF ortalaması $\hat{\mu}$ ve standart sapma $\hat{\sigma}$ kestirimleri: 2009 (düz çizgi), 2012 (kesikli çizgi), 2014 (kesikli noktalı), birinci satır: JR, ikinci: PQ ve üçüncü satır: RO. ...	57
3.14.	Kış mevsiminden elde edilen veriler üzerinden $\tau$ saat-içi parametrik OYF ortalaması $\hat{\mu}$ ve standart sapma $\hat{\sigma}$ kestirimleri: 2009 (düz çizgi), 2012 (kesikli çizgi), 2014 (kesikli noktalı), birinci satır: JR, ikinci: PQ ve üçüncü satır: RO. ....	59
3.15.	Haziran ayından elde edilen veriler üzerinden $\tau$ saat-içi parametrik OYF ortalaması $\hat{\mu}$ ve standart sapma $\hat{\sigma}$ kestirimleri: 2009 (düz çizgi), 2012 (kesikli çizgi), 2014 (kesikli noktalı), birinci satır: JR, ikinci: PQ ve üçüncü satır: RO. ....	60
3.16.	Saat-içi aylık $\tau$ parametrik OYF ortalama kestirimleri $\hat{\mu}_\tau$ , birinci sütun (a-d-g): JR, ikinci sütun (b-e-h): PQ, üçüncü sütun (c-f-i): RO; birinci satır (a-b-c): 2009, ikinci satır (d-e-f): 2012, üçüncü satır (g-h-i): 2014. ...	61
3.17.	Saat-içi aylık $\tau$ parametrik OYF standart sapma kestirimleri $\hat{\mu}_\tau$ , birinci sütun (a-d-g): JR, ikinci sütun (b-e-h): PQ, üçüncü sütun (c-f-i): RO; birinci satır (a-b-c): 2009, ikinci satır (d-e-f): 2012, üçüncü satır (g-h-i): 2014. ....	62
3.18.	TUSAGA-Aktif Ağı için Türkiye üzerinde belirlenmiş bölgeler. ....	63
3.19.	TUSAGA-Aktif Ağı, 2011 yılı bahar mevsimi (Mart-Nisan) TEİ verilerinin bölgesel IONOLAB-PDF kestirimlerinden elde edilen parametrik ortalama ve standart sapma kestirimleri, a) $\hat{\mu}$ , b) $\hat{\sigma}$ . ....	64
3.20.	15 Aralık 2009 1200 GS JR055 istasyonu IRI-Plas elektron yoğunluğu profili (IONOLAB-PDF kestirimleri kullanılarak üretilmiş rassal profiller (1,000 koşum) siyah noktalı çizgiler, IRI – Plas: siyah düz çizgi, IRI – Plas( $f_{oF2_i}$ ) kırmızı düz çizgi, IRI – Plas( $\hat{\mu}_{foF2} \pm \hat{\sigma}_{foF2}$ ): mavi taralı alan ve IRI – Plas( $\hat{\mu}_{foF2} \pm 2 \hat{\sigma}_{foF2}$ ): açık mavi taralı alan. ....	66

3.21.	15 Mart 2012 1200 GS PQ052 istasyonu IRI-Plas elektron yoğunluğu profili (IONOLAB-PDF kestirimleri kullanılarak üretilmiş rassal profiller (1,000 koşum) siyah noktalı çizgiler, IRI – Plas: siyah düz çizgi, IRI – Plas( $f_{oF2_i}$ ) kırmızı düz çizgi, IRI – Plas( $\hat{\mu}_{foF2} \pm \hat{\sigma}_{foF2}$ ): mavi taralı alan ve IRI – Plas( $\hat{\mu}_{foF2} \pm 2 \hat{\sigma}_{foF2}$ ): açık mavi taralı alan. ....	67
3.22.	15 Haziran 2012 1400 GS RO041 istasyonu IRI-Plas elektron yoğunluğu profili (IONOLAB-PDF kestirimleri kullanılarak üretilmiş rassal profiller (1,000 koşum) siyah noktalı çizgiler, IRI – Plas: siyah düz çizgi, IRI – Plas( $f_{oF2_i}$ ) kırmızı düz çizgi, IRI – Plas( $\hat{\mu}_{foF2} \pm \hat{\sigma}_{foF2}$ ): mavi taralı alan ve IRI – Plas( $\hat{\mu}_{foF2} \pm 2 \hat{\sigma}_{foF2}$ ): açık mavi taralı alan. ....	69
4.1.	Yüzey kestiriminde kullanılan ızgara yapısı.....	74
4.2.	Sentetik olarak Çizelge 4.1’de verilen katsayılar ve Eşitlik 4.13 ve Eşitlik4.17 verilen fonksiyonlara örnek yüzeyler, a) Sabit, b) Düzlemsel, c) Gauss biçimli, d) Karesel, e) sinüs biçimli, f) Düzlemsel yönseme ve sinüs biçimli. ....	77
4.3.	Örnekleme noktaları, a) Birinci modalite, seyrek (6 örnek), İkinci modalite: b) az (40 örnek), c) orta (60 örnek), d) sık (80 örnek). ....	79
4.4.	Katsayıları Çizelge 4.5’de verilmiş yüzey için OKr, a) Düzlemsel yönsemeli yüzey ve örnek noktaları b) yarı değişinti serimi $\gamma_{ZZ}$ (Deneysel: mavi nokta, uyumlandırılmış Matérn fonksiyonu: kırmızı eğri), c) OKr ile kestirilmiş $\hat{Z}$ yüzeyi, d) Kestirim değişintisi $\hat{\sigma}^2$ . ....	84
4.5.	İkinci modalite için farklı örnekleme sayılarına göre $\log_{10}$ tabanında hata metrikleri, a) $Y_c$ , b) $Y_p$ , c) $Y_q$ , d) $Y_g$ , e) $Y_s$ .....	86
4.6.	IONOLAB-CK akış diyagramı. ....	94
4.7.	$S_4$ senaryosu, düzlemsel yönsemeli sentetik yüzeyden seyrek örneklenmiş birinci modalite ve ikinci modalite yarı değişinti serimi ve çapraz yarı değişinti serimleri (deneysel:mavi nokta, uyumlandırılmış Matérn fonksiyonu: kırmızı eğri), a) $\gamma_{ZZ}$ , b) $\gamma_{ZY}$ , c) $\gamma_{YZ}$ , d) $\gamma_{YY}$ .....	95
4.8.	$S_4$ senaryosu, a) Düzlemsel yönsemeli yüzey ve birinci modalite örnek noktaları, b) Düzlemsel yüzey ve ikinci modalite örnek noktaları, c) OKr Kestirim yüzeyi, $\hat{Z}_{OKr}$ kestirim yüzeyi, d) OKr kestirim değişintisi, $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , e) EKr kestirim yüzeyi, $\hat{Z}_{EKr}$ , f) EKr kestirim değişintisi, $\hat{\sigma}_{EKr}^2$ . ....	97
4.9.	Benzer senaryolar hata metrikleri, a) SKLD, b) L2N, c) RMSE, d) NRMSE, e) MAE, f) $\sigma_{RMS}^2$ . ....	99

4.10.	Farklı senaryolar hata metrikleri, a) SKLD, b) L2N, c) RMSE, d) NRMSE, e) MAE, f) $\sigma_{RMS}^2$ . . . . .	101
4.11.	Örnek ölçüm noktaları, a) İyonosonda, b) GPS alıcısı konumları. . . . .	103
4.12.	$A_{s1}$ sakin 05 Ekim 2012 günü 1200 GS, a) foF2 örnek noktaları, b) $fo\hat{F}2_{OKr}$ (Çözünürlük: $2.62^\circ$ ), c) foF2 için $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , d) TEİ örnek noktaları, e) TEİ OKr kestirim yüzeyi, $T\hat{E}C_{OKr}$ , f) TEİ OKr kestirim değışintisi $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , g) foF2 EKr kestirim yüzeyi, $fo\hat{F}2_{EKr}$ (Çözünürlük: $0.50^\circ$ ), h) foF2 EKr kestirim değışintisi $\hat{\sigma}_{EKr}^2$ , i) Katman kalınlığı, $\hat{\tau}$ . . . . .	105
4.13.	$A_{s2}$ sakin 02 Haziran 2014 günü 1230 GS, a) foF2 örnek noktaları, b) $fo\hat{F}2_{OKr}$ (Çözünürlük: $2.62^\circ$ ), c) foF2 için $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , d) TEİ örnek noktaları, e) TEİ OKr kestirim yüzeyi, $T\hat{E}C_{OKr}$ , f) TEİ OKr kestirim değışintisi $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , g) foF2 EKr kestirim yüzeyi, $fo\hat{F}2_{EKr}$ (Çözünürlük: $0.50^\circ$ ), h) foF2 EKr kestirim değışintisi $\hat{\sigma}_{EKr}^2$ , i) Katman kalınlığı, $\hat{\tau}$ . . . . .	107
4.14.	$A_{n1}$ normal 12 Mart 2012 günü 1500 GS, a) foF2 örnek noktaları, b) $fo\hat{F}2_{OKr}$ (Çözünürlük: $2.62^\circ$ ), c) foF2 için $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , d) TEİ örnek noktaları, e) TEİ OKr kestirim yüzeyi, $T\hat{E}C_{OKr}$ , f) TEİ OKr kestirim değışintisi $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , g) foF2 EKr kestirim yüzeyi, $fo\hat{F}2_{EKr}$ (Çözünürlük: $0.50^\circ$ ), h) foF2 EKr kestirim değışintisi $\hat{\sigma}_{EKr}^2$ , i) Katman kalınlığı, $\hat{\tau}$ . . . . .	108
4.15.	$A_{n2}$ normal 28 Ekim 2014 günü 1800 GS, a) foF2 örnek noktaları, b) $fo\hat{F}2_{OKr}$ (Çözünürlük: $2.62^\circ$ ), c) foF2 için $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , d) TEİ örnek noktaları, e) TEİ OKr kestirim yüzeyi, $T\hat{E}C_{OKr}$ , f) TEİ OKr kestirim değışintisi $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , g) foF2 EKr kestirim yüzeyi, $fo\hat{F}2_{EKr}$ (Çözünürlük: $0.50^\circ$ ), h) foF2 EKr kestirim değışintisi $\hat{\sigma}_{EKr}^2$ , i) Katman kalınlığı, $\hat{\tau}$ . . . . .	110
4.16.	$A_{b1}$ bozulmalı 19 Şubat 2014 günü 0900 GS, a) foF2 örnek noktaları, b) $fo\hat{F}2_{OKr}$ (Çözünürlük: $2.62^\circ$ ), c) foF2 için $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , d) TEİ örnek noktaları, e) TEİ OKr kestirim yüzeyi, $T\hat{E}C_{OKr}$ , f) TEİ OKr kestirim değışintisi $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , g) foF2 EKr kestirim yüzeyi, $fo\hat{F}2_{EKr}$ (Çözünürlük: $0.50^\circ$ ), h) foF2 EKr kestirim değışintisi $\hat{\sigma}_{EKr}^2$ , i) Katman kalınlığı, $\hat{\tau}$ . . . . .	112
4.17.	$A_{b2}$ bozulmalı 17 Mart 2015 günü 1200 GS, a) foF2 örnek noktaları, b) $fo\hat{F}2_{OKr}$ (Çözünürlük: $2.62^\circ$ ), c) foF2 için $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , d) TEİ örnek noktaları, e) TEİ OKr kestirim yüzeyi, $T\hat{E}C_{OKr}$ , f) TEİ OKr kestirim değışintisi $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , g) foF2 EKr kestirim yüzeyi, $fo\hat{F}2_{EKr}$ (Çözünürlük: $0.50^\circ$ ), h) foF2 EKr kestirim değışintisi $\hat{\sigma}_{EKr}^2$ , i) Katman kalınlığı, $\hat{\tau}$ . . . . .	113
5.1.	İyonküre haberleşme parametre kestirimi algoritması. . . . .	120
5.2.	İyonosonda anten hüzme açısı ve yönleri [2]. . . . .	121

5.3.	İyonogram üzerinde farklı yönlerden elde edilen elektron yoğunluğu profillerinin gösterimi [2]. . . . .	122
5.4.	Eğik iyonküresel dalga yayını testi kaspamında kullanılan iyonosonda alıcı (Pruhonice ve Juliusruh) ve verici (Sopron) noktaları. . . . .	123
5.5.	IONOLAB-CK 13 Aralık 2018 günü 0715 GS, a) foF2 örnek noktaları, b) foF2 <sub>OKr</sub> (Çözünürlük: 2.62°), c) foF2 için $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , d) TEİ örnek noktaları, e) TEİ OKr kestirim yüzeyi, TÊC <sub>OKr</sub> , f) TEİ OKr kestirim değışintisi $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , g) foF2 EKr kestirim yüzeyi, foF2 <sub>EkR</sub> (Çözünürlük: 0.50°), h) foF2 EKr kestirim değışintisi $\hat{\sigma}_{EkR}^2$ , i) Katman kalınlığı, $\hat{t}$ . . . . .	124
5.6.	13 Aralık 2018, 0715 GS Pruhonice istasyonu iyonogramları a) Dikey ve eğik, b) Eğik sıradan, c) Eğik sıradışı iyonogram. . . . .	125
5.7.	IRI-Plas modeline girdi yapılmadığı durumda dalga yayılım yolları, 13 Aralık 2018, 0715 GS Sopron istasyonundan Pruhonice istasyonuna gönderilen dalgalar (Sıradan dalgalar kırmızı düz çizgi, sıradışı dalgalar mavi düz çizgi). . . . .	126
5.8.	IRI-Plas modeline TEİ girdi yapıldığı durumda dalga yayılım yolları, 13 Aralık 2018, 0715 GS Sopron istasyonundan Pruhonice istasyonuna gönderilen dalgalar (Sıradan dalgalar kırmızı düz çizgi, sıradışı dalgalar mavi düz çizgi). . . . .	126
5.9.	IRI-Plas modeline foF2 kestirimi girdi yapıldığı durumda dalga yayılım yolları, 13 Aralık 2018, 0715 GS Sopron istasyonundan Pruhonice istasyonuna gönderilen dalgalar (Sıradan dalgalar kırmızı düz çizgi, sıradışı dalgalar mavi düz çizgi). . . . .	127
5.10.	13 Aralık 2018, 1100 GS, a) foF2 örnek noktaları, b) foF2 <sub>OKr</sub> (Çözünürlük: 2.62°), c) foF2 için $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , d) TEİ örnek noktaları, e) TEİ OKr kestirim yüzeyi, TÊC <sub>OKr</sub> , f) TEİ OKr kestirim değışintisi $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , g) foF2 EKr kestirim yüzeyi, foF2 <sub>EkR</sub> (Çözünürlük: 0.50°), h) foF2 EKr kestirim değışintisi $\hat{\sigma}_{EkR}^2$ , i) Katman kalınlığı, $\hat{t}$ . . . . .	128
5.11.	13 Aralık 2018, 1100 GS Pruhonice istasyonu iyonogramları a) Dikey ve eğik, b) Eğik sıradan, c) Eğik sıradışı iyonogram. . . . .	129
5.12.	IRI-Plas modeline girdi yapılmadığı durumda dalga yayılım yolları, 13 Aralık 2018, 1100 GS Sopron istasyonundan Pruhonice istasyonuna gönderilen dalgalar (Sıradan dalgalar kırmızı düz çizgi, sıradışı dalgalar mavi düz çizgi). . . . .	130

5.13.	IRI-Plas modeline TEİ girdi yapıldığı durumda dalga yayılım yolları, 13 Aralık 2018, 1100 GS Sopron istasyonundan Pruhonice istasyonuna gönderilen dalgalar (Sıradan dalgalar kırmızı düz çizgi, sıradışı dalgalar mavi düz çizgi). . . . .	130
5.14.	IRI-Plas modeline foF2 kestirimi girdi yapıldığı durumda dalga yayılım yolları, 13 Aralık 2018, 1100 GS Sopron istasyonundan Pruhonice istasyonuna gönderilen dalgalar (Sıradan dalgalar kırmızı düz çizgi, sıradışı dalgalar mavi düz çizgi). . . . .	131
5.15.	13 Aralık 2018, 1200 GS, a) foF2 örnek noktaları, b) $fo\hat{F}2_{OKr}$ (Çözünürlük: $2.62^\circ$ ), c) foF2 için $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , d) TEİ örnek noktaları, e) TEİ OKr kestirim yüzeyi, $T\hat{E}C_{OKr}$ , f) TEİ OKr kestirim değışintisi $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , g) foF2 EKr kestirim yüzeyi, $fo\hat{F}2_{EKr}$ (Çözünürlük: $0.50^\circ$ ), h) foF2 EKr kestirim değışintisi $\hat{\sigma}_{EKr}^2$ , i) Katman kalınlığı, $\hat{\tau}$ . . . . .	132
5.16.	13 Aralık 2018, 1200 GS Pruhonice istasyonu iyonogramları a) Dikey ve eğik, b) Eğik sıradan, c) Eğik sıradışı iyonogram. . . . .	133
5.17.	IRI-Plas modeline girdi yapılmadığı durumda dalga yayılım yolları, 13 Aralık 2018, 1200 GS Sopron istasyonundan Pruhonice istasyonuna gönderilen dalgalar (Sıradan dalgalar kırmızı düz çizgi, sıradışı dalgalar mavi düz çizgi). . . . .	134
5.18.	IRI-Plas modeline TEİ girdi yapıldığı durumda dalga yayılım yolları, 13 Aralık 2018, 1200 GS Sopron istasyonundan Pruhonice istasyonuna gönderilen dalgalar (Sıradan dalgalar kırmızı düz çizgi, sıradışı dalgalar mavi düz çizgi). . . . .	135
5.19.	IRI-Plas modeline foF2 girdi yapıldığı durumda dalga yayılım yolları, 13 Aralık 2018, 1200 GS Sopron istasyonundan Pruhonice istasyonuna gönderilen dalgalar (Sıradan dalgalar kırmızı düz çizgi, sıradışı dalgalar mavi düz çizgi). . . . .	135
5.20.	13 Aralık 2018, 1100 GS, 4.7 MHz frekansında sıradan dalga yolu. . . . .	137
5.21.	13 Aralık 2018, 1100 GS, 4.7 MHz sıradan dalga yolu, a) dalga yolu uzunluğu, b) zaman gecikmesi. . . . .	138



## ÇİZELGELER

3.1.	İyonosonda ve GPS alıcılarının coğrafi ve jeomanyetik koordinatları. . .	38
4.1.	Örnek sentetik yüzeylerin oluşturulmasında kullanılan katsayılar. . . . .	76
4.2.	Birinci modalite OKr hata metrikleri. . . . .	84
4.3.	İkinci modalite için Eşitlik 4.13-Eşitlik 4.17’de tanımlı sentetik yüzeylerin oluşturulmasında kullanılan katsayılar. . . . .	85
4.4.	Yüzey tiplerine bağlı senaryo tanımlamaları. . . . .	95
4.5.	EKr için birinci modalite Eşitlik 4.13-Eşitlik 4.17’de tanımlı sentetik yüzeylerin oluşturulmasında kullanılan katsayılar. . . . .	96
4.6.	İkinci modaliteye eklenen küçük ölçekli yönsemelerin Eşitlik 4.13-Eşitlik 4.17’de tanımlı fonksiyonlar ile oluşturulmasında kullanılan katsayılar. . . . .	98
4.7.	Benzer senaryolar EKr aradeğerleme hata metrikleri. . . . .	99
4.8.	Yüzey tiplerine bağlı senaryo tanımlamaları. . . . .	100
4.9.	Farklı senaryolar hata metrikleri, a) SKLD, b) L2N, c) RMSE, d) NRMSE, e) MAE, f) $\sigma_{RMS}^2$ . . . . .	100
4.10.	EKr yönteminin uygulandığı örnek günler ve belirlenen gün ve saatlerdeki Kp, Dst indisleri. . . . .	104
4.11.	EKr yönteminin uygulandığı örnek günler ve belirlenen gün ve saatlerdeki çapraz doğrulama hata metrikleri. . . . .	115
5.1.	Almaç-göndermeç noktaları ve koordinatları. . . . .	121
5.2.	Taranan açı ve frekans aralıklarında alıcıcı ulşana dalga yolu sayısı ve toplam dalga yolu sayısına oranı. . . . .	136
5.3.	Yanca ve yükselişte taranan açı ve frekans aralıklarından alıcıya ulaşan dalgalar için elde edilen dalga yolu uzunluğu ve zaman gecikmelerinin ortanca değerleri. . . . .	137
EK-A.1.	Avrupa üzerinde seçilen iyonosonda koordinatları. . . . .	153
EK-A.2.	EUREF Sabit GPS Ağı’ndan seçilen GPS Alıcısı Koordinatları. . . . .	154
EK-A.3.	EUREF Sabit GPS Ağı’ndan seçilen GPS Alıcısı Koordinatları (Devam). . . . .	155
EK-A.4.	EUREF Sabit GPS Ağı’ndan seçilen GPS Alıcısı Koordinatları (Devam). . . . .	156

# Simgeler ve Kısaltmalar

BLUE	: Best Linear Unbiased Estimator
CODE	: Center of Orbit Determination Europe
COSPAR	: Committee on Space Research
EK <sub>r</sub>	: Eş-Krigleme
EUREF	: European Permanent GPS Network
foF <sub>2</sub>	: F2 katmanı kritik frekansı
GIM	: Global Ionosphere Maps
GS	: Greenwich Saati
GPS	: Global Positioning System
hmF <sub>2</sub>	: F2 katmanı kritik yükseklik
ICED	: Ionospheric Conductivity and Electron Density Profile
ICEPAC	: Ionospheric Communications Enhanced Profile Analysis and Circuit prediction
IONCAP	: IONospheric Communication Analysis and Prediction
IGS	: International GNSS Service
IONEX	: Ionosphere Map EXchange Format
IRI	: International Reference Ionosphere
ITU	: International Telecommunication Union
JPL	: Jet Propulsion Laboratory
KD	: Kısa Dalga
KKS	: Küresel Konumlama Sistemi
L2N	: En az Karesel Norm
MAE	: Ortalama Mutlak Hata
MUF	: Maximum Usable Frequency
NRMS	: Düzgelenmiş Ortalama Karesel Kök Hata
OK <sub>r</sub>	: Ortalamasız Krigleme
RA	: Rassal Alan
RINEX	: Receiver Independent Exchange Format
RMSE	: Ortalama Karesel Kök Hata
SKLD	: Simetrik Kullback-Leibler Mesafesi
TEİ	: Toplam Elektron İçeriği

T/P	: Topex/Poseidon
UKr	: Evrensel Krigleme
URSI	: International Union of Radio Science
UV	: Ultra Violet
VTEC	: Vertical Total Electron Content
VOACAP	: Voice Of America Coverage Analysis Program
YMA	: Yerküre Manyetik Alanı

# Sözlük

Aradeğerleme	: Interpolation
Ampirik	: Empirical
Aykırılık	: Anomaly
Bağıl	: Relative
Başucu	: Zenith
Beklenti	: Expectation
Bozulmalı Gün	: Disturbed Day
Boznetken	: Disturbance
Çokterimli	: Polinom
Çok-yolluluk	: Multipath
Çapraz Doğrulama	: Cross-validation
Deterministik	: Deterministic
Dağıtmalı	: Dispersive
Değişinti	: Variance
Deneysel Dağılım	: Histogram
Dönme	: Rotation
Durağanlık	: Stationarity
Diferansiyel Yanlılıklar	: Differential Code Biases
Düzensiz	: Sporadic
Elektron Yoğunluğu	: Electron Density
Enküçültme	: Minimization
En Yüksek Kullanılabilir Frekans	: Maksimum Usable Frequency
Eşdeğişinti	: Covariance
Eş-Krigleme	: Co-Kriging
Güneş Işınım Akısı	: Solar Radio Flux
Güneş Lekesi Sayısı	: Sun Spot Number
Gürbüz	: Robust
Greenwich Saati	: Greenwich Time, Universal Time
Halka Akımı	: Ring Current
Havaküre	: Atmosphere

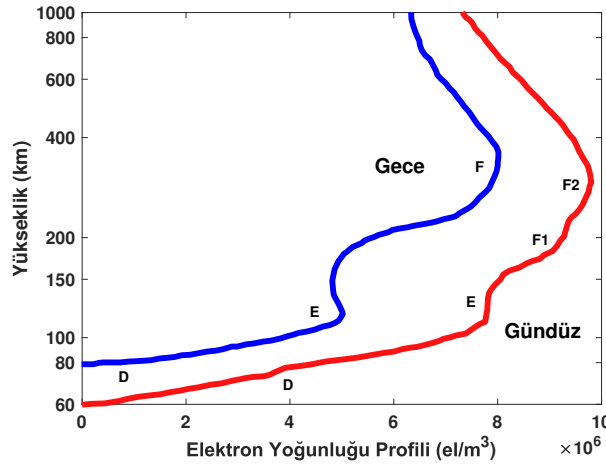
İzdüşüm	: Projection
İyonküre	: Ionosphere
Kalıntı	: Residual
Katman Kalınlığı	: Slab Thickness
Kırpışma	: Scintillation
Kısa Dalga	: Short Wave
Kritik Frekans	: Critical Frequency
Kutuplanma	: Polarization
Külçe Etkisi	: Nugget Effect
Küresel Konumlama Sistemi	: Global Positioning System
Modalite	: Modality
Mutlak	: Absolute
Mutlak Ortalama Hata	: Mean Absolute Error
Normal Gün	: Moderate Day
Ortalama Krigleme	: Simple Kriging
Orta Enlem Gece Yaz Aykırılığı	: Midlatitude Summer Nighttime Anomaly
Ortalamasız Krigleme	: Ordinary Kriging
Ortalama Karekök Hata	: Root Mean Square Error
Ortanca	: Median
Özünlü	: Intrinsic
Plazmaküre	: Plasmasphere
Rassal	: Random
Saçılma	: Scattering
Sakin Gün	: Calm Day
Saat-içi	: Within-the-hour
Sıkıştırılmış Algılama	: Compressed Sensing
Sıradan	: Ordinary
Sıradışı	: Extraordinary
Sonda	: Sounder
Sözde Menzil	: Pseudorange
Toplam Elektron İçeriği	: Total Electron Content
Uzay-zamansal	: Spatio-temporal

Yanca	: Azimuth
Yanlılık	: Bias
Yapısal Uzaklık	: Range
Yarı değişinti serimi	: Semivariogram
Yerküresel	: Global
Yerküre Manyetik Alanı	: Jeomagnetic Field
Yön bağımlı	: Anisotropic
Yön bağımsız	: Isotropic
Yönseme	: Trend
Yükseliş Açısı	: Elevation Angle

# 1. GİRİŞ

İyonküre, yerküreden 60-1,000 km yükseklikte yer alan bir havaküre katmanıdır. Pozitif iyonlar ve serbest elektronlardan oluşmuş plazma ortamıdır [1]. Meydana gelen iyonlaşma, temelde 102.7 nm'den daha kısa dalga boyuna sahip UV ışınması kaynaklıdır. Bu ışınma havaküre molekülleri ve atomları tarafından emilerek iyonlaşma gerçekleşir. Yüksek enlemlerde, çöken enerjik parçacıkların oluşturduğu, kozmik ve X-ışınlarının sebep olduğu iyonlaşma güneş hareketliliğine bağlı olarak düzensizdir [3]. Bu katman uzay ve zamanda durağan olmayan, düzgün dağılmamış, yön bağımlı, zaman, konum ve yükseklikle değişen, uzay ve zamanda dağıtmalı, son derece karmaşık bir yapıdadır [1].

Şekil 1.1'de yüksekliğe bağlı olarak iyonküre katmanları gösterilmiştir. D, E, F1 ve F2 adı verilen katmanlarda iyonlaşma seviyesine göre farklılıklar gözlenir. İyonkürenin en alt katmanı olan D katmanı radyo dalgalarının en fazla soğurulduğu katmandır. E katmanı 90 ile 150 km yükseklikte yer alır. Gündüz saatlerinde F1 ve F2 olarak iki katman halinde bulunan F katmanında, F1 katmanı gece saatlerinde F2 katmanı ile birleşmektedir. İyonküreyi etki-



Şekil 1.1: İyonküre elektron yoğunluğu [1].

leyen en temel kaynak güneş etkinliğidir. 11 yıllık güneş döngüsü, mevsimsel döngüler ve gün-tün döngüsü gibi en temel hareketlilikler iyonlaşma seviyesinde değişimlere sebep olur.

İyonkürenin en temel değişkeni elektron yoğunluğudur [3]. Elektron yoğunluğu konumda, zamanda ve yükseklikte güneş etkinliği ve Yerküre Manyetik Alanına (YMA) bağlıdır [4]. İyonküre bir plazma ortamı olduğundan, elektron yoğunluğuna bağlı olarak tanımlanabilen plazma frekansı temel karakteristik belirleyicidir. Açısal plazma frekansı Eşitlik 1.1'de ve-

rilmiştir.

$$\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 N_e}{m \epsilon_0}} \quad (1.1)$$

Yukarıdaki eşitlikte  $\omega_p$  açısız plazma frekansı,  $N_e$  elektron sayısı,  $e$  elektronun yükü,  $m$  elektronun kütlesi ve  $\epsilon_0$  boş uzayda dielektrik sabiti olarak tanımlanır. Elektron yükü, elektronun kütlesi ve boş uzayda dielektrik sabitinin değerleri kullanılarak plazma frekansı,  $f_p$  Eşitlik 1.2'de verildiği gibi hesaplanabilir.

$$f_p = 8.98 \sqrt{N_e} \quad (1.2)$$

İyonküre katmanlarının yüksekliğe bağlı belirgin keskin sınırları yoktur. Düzgün dağılmamış bu katmanların herbirinin içinde iyonlaşmanın ve elektron yoğunluğunun en yüksek olduğu noktada o katmanın kritik frekansı,  $f_o$  tanımlanır. Örnek olarak F2 katmanının kritik frekansı  $f_oF2$  olarak tanımlanır. İyonlaşmanın en fazla olduğu yükseklik ise her katman için kritik yükseklik,  $h_m$  olarak tanımlanır. Benzer şekilde F2 katmanının kritik yüksekliği  $h_mF2$  şeklinde ifade edilir.

İyonkürede ilerleyen radyo dalgaları iyonkürenin plazma yapısı nedeni ile soğurulma, dağıtma, kutuplanma kaybı, zaman gecikmesi, Faraday Dönmesi ve faz kayması gibi birçok etkiye maruz kalır. İyonkürenin radyo dalgalarına yaptığı etkiler iyonlaşmaya bağlıdır. Ayrıca dalganın iyonküre ortamında ilerlemesinin incelenmesinde kırılma indisi önemlidir. Kırılma indisi, ortamın özelliklerine göre iyonküre içinde dalganın yolunun tanımlanmasında kullanılır. İyonkürede yayılan dalganın kırılma indisi Appleton-Hartree eşitliği ile bulunmaktadır. Yön bağımlı ve dağıtımally iyonkürede Appleton-Hartree eşitliği hesaplanarak sıradan ve sıradışı dalgalar için kırılma indisi hesaplanır. Kırılma indisi kullanılarak iyonkürede yayılan dalganın yolu, zaman gecikmesi, grup ve faz gecikmesi, Doppler kayması hesaplanabilir. Kırılma indisi ve iyonkürenin elektron yoğunluğuna bağlı olan kritik frekans, radyo dalgalarının iyonküre içindeki davranışının ve iyonkürenin radyo dalgalarına etkilerinin incelenmesinde önemli parametrelerdir [4].

İyonküre ölçümleri kapsamında elektron yoğunluğunun doğrudan ölçümü mümkün olmadığı için dolaylı ölçüm ve hesaplama teknikleri geliştirilmiştir. Toplam Elektron İçeriği (TEİ), iyonküre elektron yoğunluğunun bir hat üzerinde çizgi integrali olarak tanımlanan toplam serbest elektron miktarıdır. İyonkürenin uzay ve zamandaki değişimlerinin gözlenmesinde kullanılabilecek bir parametredir.



İyonosondalar iyonküreye yüksek frekanslı sinyal gönderilmesi ve alınan sinyallerin frekansı taranarak ölçümler alınması temeline dayanır. İşaretin gönderilme zamanı ile geri dönme zamanı arasındaki süre ölçülür. Plazma frekansının üzerindeki sinyaller iyonküreden geçerek yayılır. İyonosondalar iyonlaşmanın en yüksek olduğu iyonkürenin F2 katmanının kritik frekansı foF2 başta olmak üzere katmanlardan yükseklik ve kritik frekans ölçümü yapılmasına olanak sağlar.

Kısa Dalga (KD) ve uydu haberleşmesi sinyallerini etkileyen bir katman olması nedeni ile çok büyük öneme sahip olan iyonküre, bunun yanında uydu seyrüsefer, uzaktan algılama, yön bulma ve ufuk ötesi radar sinyalleri üzerinde de etkilidir [5]. Uydu teknolojisinin gelişmesi ile beraber KD haberleşmesi üzerindeki ilgi azalmış gibi görünse de uydu sinyallerinin de iyonküre tarafından etkilenmesi, yörüngede bulunan uyduların pahalı ve tehlikeye açık olması sebebi ile önemini korumaktadır. Yön bağımlı iyonkürede dalga yayılımı ve saçılımı uydu-yer ve uydu-uydu radyo haberleşmelerinde bağlantı kalitesi ve haberleşmeye doğrudan etkisi sebebi ile büyük öneme sahiptir [6]. İyonküre araştırmaları askeri uygulamalar başta olmak üzere tüm haberleşme ve uzaktan algılama uygulamalarında önemlidir [7]. Haberleşme açısından KD bandı her zaman açık, haberleşme parametreleri uygun ayarlandığında dinlenilmesi ve karıştırılması son derece zor fakat çok dinamik değişen bir kanaldır. Askeri uygulamalar için çok uzak mesafelere haberleşmeye imkan tanınması açısından son derece önemlidir. Askeri olarak uçak-yer, yer-uçak haberleşme bağlantılarının kurulması için KD bandına farklı alt bantlar kullanılmaktadır [8]. İyonkürenin karmaşık yapısı ve sinyaller üzerindeki önemli etkileri nedeni ile bu katmanın yapısının, işleyişinin anlaşılması ve modellenmesi büyük öneme sahiptir.

KD bandında haberleşme noktadan noktaya veya tüm yönlere yayın şeklinde olabilir. İyonküre haberleşme parametreleri yanca ve yükselişte gönderim açıları, kullanılabilir frekans ve bant olarak sıralanabilir. Dalga yolu boyunca sönmüleme kaybı, zaman gecikmesi de diğer önemli parametrelerdir. KD haberleşmesi kapsamında noktadan noktaya gerçek zamanlı kanal kestirim (Real-Time Channel Evaluation) sistemleri bulunmaktadır. Bu sistemler haberleşme yapılacak her ayrı nokta ile önceden eş zamanlama yaparak bilinen bir pilot sinyali göndererek önce kanalın anlık özelliklerini hesaplanmaktadır [9]. Daha sonra hesaplanan bu kanal parametrelerine göre gönderim yapılır. Bu sistemlerin idamesi zor ve pahalıdır. Olası her haberleşme noktasına kurulması gerekmektedir.

Haberleşme parametre modelleri kapsamında International Telecommunication Union (ITU) KD kanal modelleri bulunmaktadır [9–11]. Bu modeller sinyalin iyonkürede yayılımı sırasında kanalda uğradığı bozulma ve değişimleri genel ve basit eşitlikler kullanarak göstermektedir. Dolayısıyla hem zamanda hem konumda farklı noktalar ve zaman aralıklarında benzer sonuçlar üretmektedir. İyonkürenin uzay-zamanda sürekli değişken yapısı dikkate alındığında elde edilen sonuçlar haberleşme parametrelerinin gerçek zamanda noktadan noktaya haberleşme için kullanılabilir değerlerinden oldukça uzaktır.

Kanal modelleme çalışmaları kapsamında ise dar bantlı Watterson kanal Modeli ve geniş bantlı Vogler-Hoffmeyer kanal modeli bulunmaktadır [12, 13]. Bu modellerden Watterson kanal modelinde kanal durağan olarak kabul edilerek çok dar bantlı ve kısa zaman aralıklarında geçerli olabilecek bir kanal dürtü tepkisi olarak, zaman düzleminde Gauss şekilli bir fonksiyon önerilmiştir [12]. Ionospheric Communications Enhanced Profile Analysis and Circuit prediction (ICEPAC), Ionospheric Communication Analysis and Prediction (IONCAP) ve Voice of America Coverage Analysis Program (VOACAP) gibi programlar da literatürde mevcuttur [14, 15]. Bu programlar ise zamanda aylık, saatlik ortanca yönseme değerleri, uzayda ise çok geniş bölgesel ortalamalar kullanılarak çalışmaktadır [15]. IONCAP ve ICED (Ionospheric Conductivity and Electron Density Profile) adı verilen iletkenlik ve elektron yoğunluğu profiline IONCAP yazılımına eklenmesi ile ICEPAC oluşturulmuştur [14, 15]. Bu modeller saatlik-aylık ortanca değerleri kullanarak daha önceden kurulmuş, iyonkürenin değişken özelliğini yansıtmayan belli formüller iyonküre parametrelerini sunmaktadır.

İyonküre modelleri literatürde ampirik, deterministik çalışmalar üzerinden yürütülmüştür [16, 17]. Ampirik iyonküre modelleme çalışmaları uzun süreli veri setleri kullanılarak, verilere uygun ve verilerin değişim örüntüsünü takip edebilecek matematiksel yaklaşımlardan oluşmaktadır. Modelleme, elektron ve iyonların oluşumu, rekombinasyonu, iletimi işlevlerinin matematiksel olarak ifade edilmesine dayanmaktadır. Günümüz çalışmaları hibrit olarak adlandırılabilir ampirik modellerin içindeki boşlukların teorik modeller ile tamamlanmaya çalışılmasından oluşmaktadır [16]. Ampirik modeller uzun süreli verilerin incelenmesi ile elde edildiği için iklimsel olarak aylık ve mevsimlik olarak ortanca değerlerden oluşmaktadır. Elektron yoğunluğu, sayısı, iyon sıcaklığı gibi iyonküre iyon yapısı ve kritik frekanslar, kritik yükseklikler sağlanmaktadır. İyonküre aylık ve mevsimlik ortanca değerler ile ifade edildiğinde uzay ve zamanda dinamik değişken yapısı takip edilememekte ve anlık olarak

iyonkürenin durumunu yansıtamamaktadır.

International Reference Ionosphere (IRI) modeli kabul görmüş; ISO standardı olarak kabul edilen iyonküre modelidir. 60-2.000 km yüksekliğe kadar çalışabilen iklimsel, ampirik, deterministik bir modeldir. İyonküre parametreleri, mevsimlik, aylık ve saatlik ortanca değerleri belirleyen katsayılar kullanılarak belirlenmektedir. Dr. Tamara Gulyaeva tarafından geliştirilen IRI-Plas modeli ise IRI modelini temel alarak plazmaküreyi de içine alacak şekilde yükseklik değerini GPS uydularının seyir yörüngesi olan 20,200 km irtifaya kadar iyonküre-plazmaküre modelidir. Ayrıca IRI-Plas modeli içerisine Toplam Elektron İçeriği (TEİ) parametresi girdi olarak verilebilmektedir. Elde edilen sonuçlar ortanca değerlere daha yakın olup iyonkürenin o anlık durumunu yansıtmayabilir. IRI ve IRI-Plas modelleri sadece konum, tarih ve saat için çıktı üretmektedir. Bu modeller haberleşme için gerekli parametreleri üretememektedir [18–25].

İyonküre modelleri fiziksel olarak iyonkürenin bileşimi, elektron yoğunluğu başta olmak üzere kestirdiği kritik frekanslar ve yükseklikler haberleşme uygulamaları için gerekli bilgileri sağlamamaktadır. Kanal modelleri ise iyonkürenin yakın gerçek zamandaki durumuna göre kestirim yapmamaktadır. İyonkürenin haberleşme için gerekli kanal parametrelerini üretebilecek ve iyonküre değişimlerini yakın gerçek zamanda takip edebilecek bir modele gereksinimi bulunmaktadır.

Bu tezin amacı ampirik deterministik IRI-Plas iyonküren modelinin girdilerinin uzay zamanda yakın gerçek zamanda iyonkürenin anlık durumunu yansıtacak şekilde güncellenerek ampirik rassal tahminler elde edebilmektir. Bununla birlikte güncellenmiş iyonküre modeli kullanılarak iyonkürede hesaplamalı olarak dalga yolu ışın izleme algoritmasıyla noktadan noktaya haberleşme parametrelerinin sunulmasıdır. Radyo sinyallerinin iyonkürede yayılımı çalışma frekansı, verici noktasının konumu, verici antenin yönelimi (yanca ve yükseliş) ve iyonkürenin gönderim esnasındaki durumuna doğrudan bağlıdır [26].

IONOLAB grubu tarafından geliştirilen ve doğrulanmış IONOLAB-RAY modeli arka plan iyonküre modeli olarak IRI-Plas kullanılmaktadır. IONOLAB-RAY yönteminde IRI-Plas arka plan modeli iyonkürenin yakın gerçek zamanda durumunu yansıtacak şekilde güncellenerek bir bölgede kullanıcı tarafından belirlenen verici konumu, alıcı konumu, haberleşme zamanı için en uygun gönderim açıları ve frekanslarını kullanıcıya sunulmaktadır.

Ampirik deterministik modeller iyonkürenin sakin ve değişkenliğinin az olduğu zamanları aylık saatlik ortanca değerler ile gösterebilse de uzay-zamanda iyonkürenin davranışının takip edilmesi için yeterli değildir. Bu sebeple iyonkürenin rassal bir modelinin geliştirilmesi hem iyonkürenin yakın gerçek zamanda davranışının incelenmesinde hem de ileriye dönük tahmin edilmesinde kolaylık sağlayacaktır.

İyonküre uzay-zamanda, güneş etkinliği, yerküre manyetik alanı gibi bir çok parametreden etkilenmektedir [27,28]. Bir rassal fonksiyon, kaynaklandığı fiziksel duruma göre farklı uzay zaman modelleri ile ifade edilebilir. Rassal fonksiyon bir yönseme  $M(\underline{x},t)$  ve bir durağan rassal fonksiyonun toplamı şeklinde Eşitlik 1.3'de gösterildiği gibi tanımlanabilir [28,29].

$$Z(\underline{x},t) = M(\underline{x},t) + H(\underline{x},t) \quad (1.3)$$

Yukarıdaki eşitlikte verilen  $\underline{x}$  konum,  $t$  ise zamandır.  $M(\underline{x},t)$  uzun süreli değişimleri ve  $H(\underline{x},t)$  kısa süreli değişimleri ifade etmektedir. Yönseme fonksiyonunun veya durağan rassal fonksiyon ayrı ayrı ölçümlenemediği için rassal fonksiyonun modellenmesinde fiziksel olaylardan çıkarılabilecek yardımcı bilgiler kullanılabilir [30].  $Z(\underline{x},t)$  rassal fonksiyonunun tek bir gerçekleminin rassal fonksiyonun özelliklerini taşıdığı varsayımı ergodiklik olarak tanımlanır [31]. Rassal fonksiyonun tek bir gerçekleminin elde edildiğinden fonksiyonun ergodik olduğu kabul edilebilir.

Eşitlik 1.3'de verilen modelde kısa süreli  $H(\underline{x},t)$  iyonkürede meydana gelen ve çoğunlukla yönsemenin dışında kalan değişimler olarak tanımlanmıştır. Bu değişimler yerküresel manyetik fırtınalar, yerkürede meydana gelen sismik hareketlerin iyonküreye etkileri, iyonküre bozulmaları gibi daha kısa süreli ve genellikle yerel gözlenen olaylardır.

Uzun süreli değişimlerin gösterildiği  $M(\underline{x},t)$  iyonkürenin sahip olduğu temel çevrimler, yönsemeler olarak tanımlanmıştır. Bu yönsemeler Olasılık Yoğunluk Fonksiyonları (OYF) kullanılarak modellenabilir. Bu çalışmanın ilk aşamasında yönseme modeli oluşturulmuştur. Konumda noktasal olarak IONOLAB-PDF yöntemi yardımı ile yönsemenin Olasılık Yoğunluk Fonksiyonları (OYF) elde edilmiştir.

OYFlerden elde edilen gerçeklemler ile IRI-Plas modeli stokastik olarak güncellendiği durumda ampirik deterministik aylık saatlik ortanca değer üreten modelin girdileri güncellenerek ampirik stokastik sonuçlar elde edilmiştir. IONOLAB-PDF yöntemi kullanılarak TEİ,

foF2, hmF2 ve katman kalınlığının noktasal olarak yönseme modelleri elde edilmiştir. Geliştirilen IONOLAB-PDF yöntemi ile iyonküre parametrelerinin ilk defa kendi birbirleri arasındaki ilişkiler yönseme istatistiklerinin kestirimleri kullanılarak incelenmiştir. IONOLAB-PDF yöntemi ile herhangi iyonküre parametresinin yönseme istatistikleri otomatik olarak elde edilebilir.

Noktasal olarak kestirilen iyonküre ölçümlerinin yönseme modelleri ortalama ve standart sapma kestirimleri konumda aradeğerlenerek IRI-Plas modeline girdi olarak verilebilir. Bu durumda bölgenin stokastik yönsemesi elde edilmiş olacaktır. Diğer yandan yakın gerçek zamanda iyonküre ölçümlerinin elde edilerek IRI-Plas modeline girdi sağlanması için Eşitlik 1.3'de verilen  $Z(\underline{x}, t)$  rassal fonksiyonu doğrudan kullanılmalıdır. Bu nedenle uzay-zamanda yüksek çözünürlüklü foF2 kestirimleri yakın gerçek zamanda IRI-Plas modeline girdi olarak sağlanması için iyonküre ölçümleri kullanılmıştır.

İyonosondalar konumda ve zamanda seyrek dağılmış sistemlerdir. Buna karşın GPS alıcıları kullanılarak bölgesel olarak konumda ve zamanda sık TEİ kestirimleri elde edilebilmektedir. İyonküre parametrelerinin yönseme istatistiklerinden elde edilen sonuçlara göre uzay-zamanda birbiri ile yüksek ilintiye sahip TEİ ve foF2 kullanılabilir.

Seyrek foF2 ölçümleri ile sık TEİ ölçümlerinin yardımı ile yüksek çözünürlüklü olarak aradeğerlenebilir. Çalışmanın ikinci kısmında uzay-zamanda sık foF2 haritaları elde edilmiştir. Geliştirilen IONOLAB-CK yöntemi öncelikle sentetik yüzeyler kullanılarak doğrulanmıştır. Sentetik yüzeyler iyonküre yönsemelerini temsil edecek şekilde seçilerek hata metrikleri üzerinden yöntem başarımı gösterilmiştir. Ayrıca çapraz doğrulama yöntemi kullanılarak iyonkürenin farklı durumlarından örnek gün ve saatlerde kestirim haritalarının başarımı test elde edilmiştir. IONOLAB-CK yöntemi ile elde edilen yüksek çözünürlüklü foF2 haritalarının yanında literatürde ilk defa yüksek çözünürlüklü katman kalınlığı haritaları da elde edilmiştir.

Kestirilen yüksek çözünürlüklü foF2 haritaları IRI-Plas modeline girdi olarak sağlanmıştır. IONOLAB-RAY ışın izleme algoritması ile verilen bir verici ve alıcı noktaları için en uygun yanca ve yükseliş gönderim açıları, kullanılabilir en uygun gönderim frekansı kestirilmiştir. IONOLAB-RAY ışın izleme algoritmasının arka plan iyonküre modeli IRI-Plas uzay-zamanda yüksek çözünürlüklü olarak güncellenmiş ve eğik iyonogramlar ile karşılaş-

tırılmıştır. Eğik iyonogramlarda gözlenen frekans aralıkları ve yanca, yükselişte gönderim açıları taranarak IRI-Plas modeline girdi verilmediği, Ortalamasız Krigleme ile aradeğerlenmiş TEİ girdileri verildiği ve IONOLAB-CK ile kestirilmiş foF2 haritaları girdi olarak verilerek karşılaştırılmıştır. Buna göre IRI-Plas'ın yakın gerçek zamanda elde edilmiş foF2 kestirim haritaları ile beslendiği durumda hem sıradan hem de sıradışı alıcıya ulaşan dalga sayısı daha fazladır. Kayıt edilmiş iyonogram izlerine göre belirlenen frekans aralıkları başarı ile IRI-Plas modelinin girdilerinin foF2 kestirim haritaları ile güncellendiği durumda elde edilmiştir.

Bu tez çalışmasında geliştirilen yöntemler ile kullanıcı tarafından dışarıdan girilen bir bölge için, bölgede bulunan iyonküre ölçümleri ve IRI-Plas modeli kullanılarak yakın gerçek zamanda iyonkürenin anlık durumunu tahmin edilebilecektir. Elde edilen istatistiksel iyonküre modeli kullanılarak kullanıcı tarafından seçilen alıcı ve verici noktaları için noktadan noktaya en uygun yanca ve yükseliş gönderim açıları, en uygun frekans otomatik olarak sunulmaktadır. İyonküre modelleri daha çok fiziksel iyonkürenin ampirik deterministik olarak fiziksel koşullarını aylık saatlik ortanca değerler üzerinden tanımlamaktadır. KD kanal modelleri ise tamamen analitik fonksiyonlar kullanılarak tanımlanmaktadır. Bu çalışma IRI-Plas modelinin girdilerini yakın gerçek zamanda güncelleyerek IONOLAB-RAY modeli yardımı ile KD kanal parametrelerini kestirmektedir. Bu açıdan literatürde bulunan eksikliği başarı ile tamamlamıştır.

Bu tez çalışmasında Bölüm 2'de iyonküre yapısı, özellikleri ve sinyal yayılımına etkileri detaylandırılmıştır. İyonkürenin yapısını ve işleyişini anlamakta kullanılan ölçüm yöntemleri ve bu tez çalışmasında kullanılan iyonküre ölçümleri anlatılmıştır. Bölüm 3'de iyonküre ölçümlerinin uzay-zamanda istatistiksel olarak incelenmiş ve birbirleri arasındaki ilişkiler ortaya konulmuştur. İyonkürenin noktasal olarak stokastik yönseme modeli oluşturulmuştur.

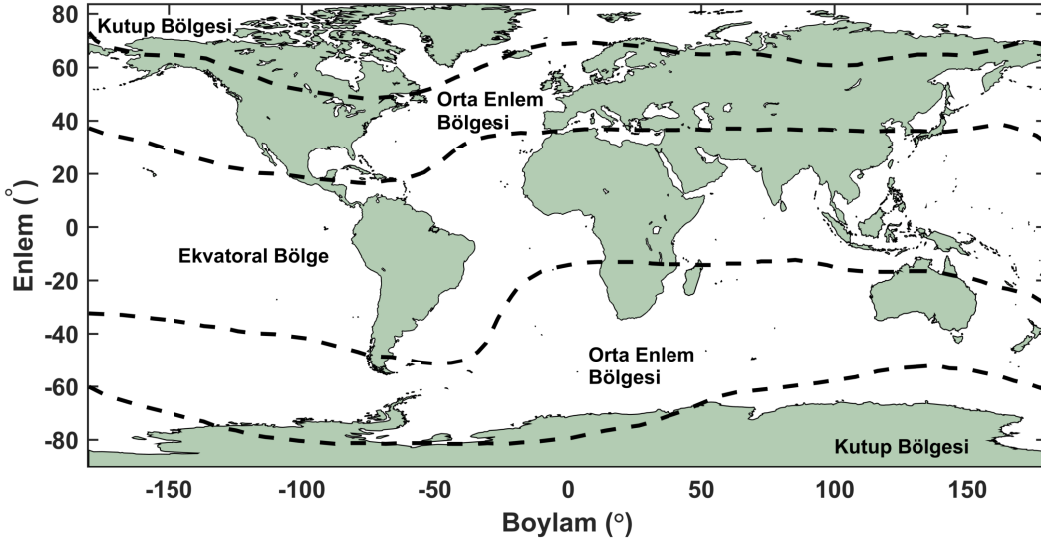
Bölüm 4'de iyonküre ölçümleri için konumda aradeğerleme yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen IONOLAB-CK yöntemi ile Eşitlik 1.3' de verilen  $Z(x,t)$  doğrudan modellenmiştir. Bölüm 5'de IRI-Plas arka plan modelinin girdilerinin güncellenmesi sonrasında IONOLAB-RAY ışın izleme modeli ile verilen bir verici noktası kullanılarak sinyalin iletilmesi istenen noktaya en uygun gönderim frekansı ve yanca, yükseliş açıları kestirilmiştir. Bölüm 6'da bu tez kapsamında yapılan analizler, sonuçları ve elde edilen bulgular paylaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve gelecek çalışmalar özetlenmiştir.

## 2. İYONKÜRE

İyonküre, radyo dalga yayılımı açısından oldukça önemlidir. Bu plazma katman Kısa Dalga (KD), uydu başta olmak üzere haberleşme ve radyo seyrüsefer sinyallerine etki eden uzay zamanda dinamik değişken yapıdadır [1, 3, 4]. İyonkürenin değişkenliğinin başlıca sebepleri arasında güneş ve yerküresel kaynaklı etkenler gösterilebilir. Bu etkenler iyonkürenin düzgün dağılmamış ve yön bağımlı olmasına neden olup yayılan radyo sinyallerinin farklı etkilenmesine sebep olmaktadır. Sivil ve askeri KD uygulamalarında iyonküre radyo dalgalarını yansıtarak uzak bölgeler arası haberleşmenin yapılabilmesine olanak sağlar. İyonküre uydu haberleşmesi için de büyük öneme sahiptir. Uydulardan yeryüzündeki alıcılara gönderilen sinyaller iyonküre katmanında kırılmaya uğrarlar.

### 2.1 İyonkürenin Yapısı

İyonküre kendi içinde yüksekliğe bağlı olarak farklı katmanlardan oluşmaktadır. Bu katmanlar kesin sınırlara sahip olmasa da iyonlaşma seviyesi ve sinyaller üzerindeki etkisi farklı olmaktadır. Ayrıca iyonküre ekvator, kutup bölgeleri bunların arasında kalan orta enlem bölgelerinde farklı dinamiklere sahiptir. İyonküre yönsemesindeki belirgin farklılıklara göre bölgeler coğrafi olarak Şekil 2.1’de gösterilmiştir [32, 33].



Şekil 2.1: İyonküre coğrafi bölgeleri.

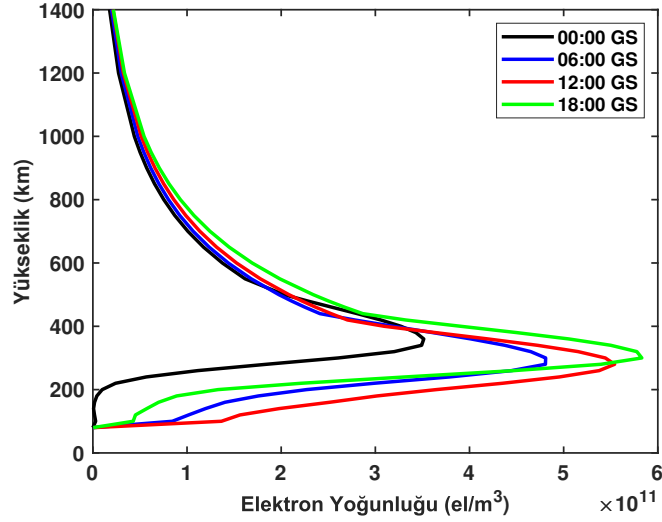
İyonküre üç ana bölgede incelenebilir. Bu bölgeler jeomanyetik ekvatorial bölge, orta enlem ve kutup (yüksek enlem) bölgeleridir [3, 5, 34].

- **Kutup Bölgesi:** Yerkürenin Güney ve Kuzey Kutup bölgelerinde genel olarak  $60^\circ$  üstü enlemler olarak tanımlanmaktadır. Yerküre manyetik alan çizgileri kutup bölgesinde yere dik olduğundan havaküreye giren yüklü parçacıklar manyetik alan ile birlikte kutup bölgelerinden içeri doğru havakürenin alt katmanlarına ilerler. Literatürde kutup ışıkları olarak tanımlanan bu durum kutup bölgelerinde sıklıkla gerçekleşmektedir [4, 32] .
- **Orta Enlem Bölgesi:** Yerkürenin kutup bölgeleri ve ekvatorial bölgenin arasında  $30^\circ$  -  $60^\circ$  arasında enlem kuşağında bulunmaktadır. İyonküre ölçümlerinde kullanılan iyonosonda ve GPS alıcı ağlarının çok büyük kısmı bu bölgede bulunmaktadır. En çok kara ve yerleşimin olduğu bölüm olan bu orta enlem bölgesinde iyonküre araştırmaları ve uygulamaları yoğunlaşmıştır [5].
- **Jeomanyetik Ekvatorial Bölge:** İyonkürenin ekvatorial bölge olarak tanımlandığı bu alan ekvator etrafında coğrafi olarak  $\mp 30^\circ$  aralığında tanımlanmaktadır. Bu bölgede gözlenen iyonlaşma, güneş ışınlarının diğer bölgelere oranla daha dik alınması ile birlikte daha fazla olup farklı dinamiklere bağlı iyonlaşma seviyeleri gözlenmektedir. Buna örnek olarak elektron yoğunluğunun artması ile birlikte sinyallerde genlik ve faz kırışmalarının en fazla gözlemlendiği bölgedir.

İyonküre yüksekliğe ve iyonlaşma seviyesine göre kendi içinde farklı katmanlardan oluşmaktadır. Bunlar alt katmandan itibaren D, E ve F olarak tanımlanmıştır [3, 32–34]. İyonlaşma miktarına göre farklılık gözlenen katmanlar aşağıda alt katmandan üst katmanlara doğru sırasıyla açıklanmıştır:

- **D Katmanı:** Havakürenin 60 - 90 km yükseklik aralığında ve iyonlaşmanın diğer katmanlara göre daha az olduğu katmandır. D katmanı güneşten gelen yüksek enerjili X ışınları sebebi ile gün doğumundan gün batımına kadar gözlenmektedir. Radyo dalgaları üzerindeki soğurma etkisi de özellikle alt KD bantlarında gün içinde çok daha fazladır. Elektronların ulaştığı ortalama hız yayılan dalganın frekansı ile ters orantılı olduğu için frekans azaldıkça soğurma miktarı artmaktadır [35].
- **E Katmanı:** Havakürenin 90 - 150 km yükseklik aralığında güneş aktivitesi ve güneşin yerel başucu açısına bağlı olarak değişen katmandır. E katmanında en yüksek





Şekil 2.2: Elektron yoğunluğunun yüksekliğe bağlı genel değişimi (IRI-Plas, Pruhonice [50° K-14.6° D] ve 06.06.2014).

iyonlaşma seviyesine diğer katmanlarda olduğu gibi yerel öğle zamanlarında ulaşılır. Farklı iyonküre dinamiklerine bağlı olarak iyonlaşma gece saatlerinde de gözlenebilir. Bu katmanda çok değişken ve düzensiz ince katmanlı yapılar oluşabilmektedir. Orta ve ekvatorial enlem bölgelerinde daha yüksek olasılıkla oluşabilen bu düzensiz iyonlaşmalar genellikle yaz mevsimi gündüz saatlerinde gözlenmektedir. Öte yandan aynı durum yüksek enlemlerde ise daha çok gece saatlerinde oluşmaktadır.

- **F Katmanı:** İyonkürenin 150 - 500 km yükseklik aralığında gözlenen iyonkürenin KD ve uydu haberleşmesi açısından en önemli katmanıdır. İyonlaşmanın en fazla olduğu iyonküre yansıtıcılığının en yüksek gözlendiği katman F katmanıdır. Gündüz saatlerinde F1 ve F2 olarak iki katman halinde bulunan F katmanında F1 katmanı gece saatlerinde F2 katmanı ile birleşmektedir.

F1 katmanı 150 km ile 240 km arasında sadece gündüz saatlerinde görülmektedir. Yerel öğle saatlerinde iyonlaşma miktarı en yüksek seviyesine ulaşır.

F2 katmanı yaklaşık olarak 240 km üzerinde ve günün her saatinde var olan bir katmandır. Bu katman uzay zamanda ve güneş aktivitesine göre değişkenlik gösterir. İyonküre araştırmalarında kullanılan en önemli kritik frekans bu katman için tanımlanmaktadır. İyonkürenin en önemli ve iyonlaşmanın en fazla gözlendiği katman olan F2 katmanı iyonküre araştırmaları ve haberleşme uygulamaları açısından en çok incelenen katmandır.

İyonlaşmanın en temel etkeni güneş kaynaklı olduğu için güneşin ve yerkürenin hareketlerine göre iyonlaşma miktarında çeşitli döngüler bulunmaktadır. Bunlardan en önemlileri gece-gündüz, yıllık, mevsimlik ve 11 yıllık güneş döngüsüdür. Mevsimsel değişimler incelendiğinde özellikle orta enlemde iyonküre için Kasım, Aralık, Ocak, Şubat ayları kış mevsimi, gün-tün eşitliğini içine alan Mart ve Nisan ayları ile Eylül ve Ekim ayları sırasıyla bahar ve güz, son olarak Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos ayları da yaz mevsimi olarak tanımlanmaktadır [23]. Mevsimsel değişimlerden daha kısa süreli olarak aylık değişimler de gözlenmektedir.

Literatürde yer alan iyonküre modellerinde iyonküre ölçümlerinin aylık ortanca tahminleri verilmektedir. Bu döngüler temel olarak iyonkürenin zamana bağlı davranışında ana belirleyici olarak gösterilebilir. Yerküre manyetik alanı ve alan çizgilerinin dağılımı ile dünyanın kendi etrafında dönüş hızı ve yerçekimsel etkiler iyonküre elektron yoğunluğu üzerinde etkiye sahiptir.

İyonkürede gözlenen temel döngüler uzun süreli değişimleri temsil ederse bunların yanında iyonkürede kısa süreli olaylar da gözlenmektedir. Güneş rüzgarları, güneş patlamaları, yer-küresel manyetik hareketlilikler de iyonkürede önemli değişikliklere yol açabilir.

İyonkürede meydana gelen olaylar ve döngüler küresel ölçekte tanımlanmış iyonküre indisleri ile takip edilmektedir. İyonküre indisleri Yerküre üzerine konumlandırılmış algılayıcılar veya uydu kaynaklı ölçümlerden günlük, 3 saatlik ve daha uzun zaman aralıklarında elde edilmektedir.

Güneş üzerinde gözlenen leke benzeri yapılar Güneş Lekesi Sayısı (GLS) olarak adlandırılır ve güneş etkinliğinin ölçüsü olarak yüzeyinde bulunan etrafına göre daha soğuk lekelerin sayısıdır [3, 4, 32]. GLS, 11 yıllık bir döngüye sahiptir. 11 yıllık zaman dilimi içinde güneş aktivitesi güneş çevrimi olarak adlandırılmaktadır. GLS yıllık, aylık ve günlük kayan ortalamalar şeklinde sunulmaktadır.

F10.7, güneş ışınımı akısı olarak tanımlanan 10.7 cm (2,800 MHz) dalga boyunda ışıma kayıtlarıdır. Güneş etkinliğinin incelenmesinde kullanılan GLS ve F10.7 ile güneş etkinliğinin az ya da çok olduğu zaman aralıkları belirlenmektedir.

Dünya üzerinde Güney ve Kuzey Yarımküre'de 44°K - 60°K yer-küresel manyetik enlem

kuşağında bulunan 13 yerküresel manyetik gözlem istasyonlarından elde edilen Kp indisi küresel olarak 3 saatlik zaman aralıklarında yayınlanan bir indistir. Sakin gün davranışından farklılaşan manyetik etkinliğin ölçütü olarak tanımlanan Kp, 0 ile 9 arasında değerler almaktadır. Kp indisinin yüksek değerler alması manyetokürede yüksek seviyeli ve küresel ölçekli değişimlerin meydana geldiğini göstermektedir.

Ap indisi küresel ölçekte günlük olarak ortalama jeomanyetik hareketlilik seviyesi olarak tanımlanmaktadır. Ap indisinin seviyesinin artışı yerküresel manyetik hareketliliğin arttığı anlamına gelmektedir. Dst indisi ekvatorial bölgeye yakın istasyonlar tarafından ölçülen yerküresel manyetik etkinlik hakkında bilgi veren bir indistir. Ekvatorial bölgede dünya etrafında dönen iyonküre halka akımları dünyanın manyetik alanına ters bir manyetik alan üretir [1,3].

Dst indisi dünyanın etrafında dönen bu halka akımlarının gücü hakkında bilgi vermektedir. Dst indisi dünyanın manyetik alanındaki yerküresel manyetik fırtınalara sebep olan zayıflamayı göstermektedir.

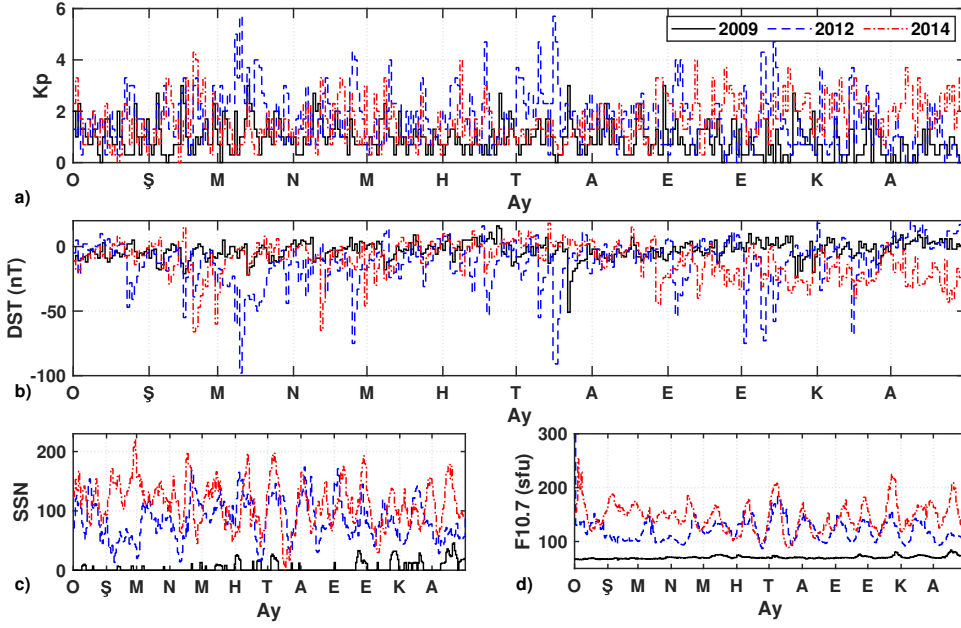
Güneş etkinliğinin az, orta ve yüksek seviyeli olduğu sırasıyla 2009, 2012 ve 2014 yılları iyonküre indisleri Şekil 2.3'de verilmiştir. Şekil 2.3a'da farklı yıllara göre Kp indisi, Şekil 2.3b'de ise Dst indisi gösterilmiştir. Güneş Lekesi Sayısı (GLS) ve F10.7 indisleri sırasıyla Şekil 2.3c ve Şekil 2.3d'de sunulmuştur. Siyah düz çizgi ile gösterilen 2009 yılında iyonküre indislerinin tamamı diğerlerinden küçüktür. İndisler sürekli olarak izlenerek yayınlanmaktadır. İndisler kullanılarak iyonkürede fırtına ya da bozulmalar küresel olarak incelenmektedir.

## 2.2 İyonkürede Radyo Sinyal Yayılımı

İyonlaşma seviyesindeki değişime bağlı olarak büyük çoğunluğu nötr gaz tabakası olan iyonküre, serbest elektronlar ile plazma katmanı haline gelmektedir. İyonkürenin en temel karakteristik belirleyicisi plazma frekansıdır [32, 36].

Plazma frekansının elde edilebilmesi için iyonize bir gaz tabakasında bulunan elektronlara etkiyen kuvvetler incelenebilir. İyonlar elektronlara göre daha ağır olduklarından gaz tabakası içindeki elektrik alan, elektronların hareketlerini daha fazla etkiler [4,37,38]. Buna göre Eşitlik 2.1'de  $m$  kütleli  $e$  yüklü bir elektronun hareketi verilmiştir.

$$m \frac{d\vec{v}(t)}{dt} = e\vec{E}(t) \quad (2.1)$$



Şekil 2.3: Güneş etkinliği indisleri, a) Kp, b) Dst, c) Güneş Lekesi Sayısı, d) F10.7 Güneş Işınımı İndisi (2009: siyah düz çizgi, 2012: mavi kesikli çizgi ve 2014: kırmızı kesikli noktalı çizgi).

Yukarıdaki eşitlikte  $\vec{E}(t)$  elektrik alan,  $\vec{v}(t)$  elektron hızıdır [39]. Eşitlik 2.1 fazör uzamında yazılırsa:

$$j\omega m\vec{v} = e\vec{E} \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.2 elde edilir. Birim hacimdeki elektron sayısı  $N_e$  olmak üzere, iyonlaşmış gaz içindeki iletim akımı Eşitlik 2.3’de verildiği gibi yazılabilir.

$$\vec{J} = eN_e\vec{v} = \frac{e^2N_e}{j\omega m}\vec{E} \quad (2.3)$$

Eşitlik 2.2 ve Eşitlik 2.3 Maxwell denkleminde kullanılırsa

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega\epsilon_0\vec{E} + \vec{J} \quad (2.4)$$

$$= j\omega\epsilon_0 \left( 1 - \frac{e^2N_e}{\omega^2 m\epsilon_0} \right) \vec{E} \quad (2.5)$$

elde edilebilir [39,40]. Yukarıdaki eşitlikte parantez içindeki bağıl dielektrik sabiti kullanılarak yön bağımsız ortam için plazma frekansı Eşitlik 2.6’da verildiği gibi bulunur.

$$\omega_p = \sqrt{\frac{e^2N_e}{m\epsilon_0}} \quad (2.6)$$

Yukarıdaki eşitlikte  $\omega_p$  açısız plazma frekansı,  $N_e$  elektron sayısı,  $e$  elektron yükü,  $m$  elektronun kütlesi ve  $\epsilon_0$  boş uzayda dielektrik sabitidir.

Radyo sinyallerinin iyonküre ile etkileşimi plazma frekansına bağlı olup en yüksek elektron yoğunluğu, uzay, zaman ve güneş ışınımı ile doğrudan bağlantılıdır. İyonküre KD bandında 3-30 MHz aralığında sinyallere daha fazla etki etmektedir. Genel olarak 30 MHz üzerinde sinyaller zayıflama ve gecikmeye uğrayarak iyonküreden geçebilir. İyonküre plazma frekansı ve yayılan dalganın frekansına bağlı olarak radyo dalgası iyonkürede yayılır.

İyonküre katmanlarının herbirinin en yüksek iyonlaşma yüksekliği ve en yüksek elektron yoğunluğu değerleri farklıdır. Her katman için elektron yoğunluğunun en yüksek olduğu noktada kritik frekans tanımlanmaktadır. Örnek olarak E katmanının kritik frekansı foE, F2 katmanının kritik frekansı foF2'dur. Kritik frekansların tanımlandığı yükseklikler ise kritik yüksekliklerdir. İyonkürede örnek olarak E katmanı kritik yüksekliği hmE ve F2 katmanının kritik yüksekliği hmF2'dur.

Kritik frekans değeri kullanılarak katmanın en yüksek elektron yoğunluğu değeri tanımlanır. F2 katmanı için foF2, kritik frekans kullanılarak F2 katmanının en yüksek elektron yoğunluğu NmF2 değeri tanımlanır. NmF2, Eşitlik 2.7'de verildiği şekilde hesaplanır. Elektron yoğunluğu birim hacim başına düşen elektron sayısı olarak tanımlanır, birimi el/m<sup>3</sup>'dür [1].

$$NmF2 = 1.24 \times 10^{10} (foF2)^2 \quad (2.7)$$

Yukarıdaki eşitlikte foF2, MHz cinsinden kullanılmaktadır.

En önemli iyonküre parametrelerinden bir diğeri ise Toplam Elektron İçeriği (TEİ)'dir. TEİ, iyonküre elektron yoğunluğunun bir  $L$  hattı üzerinde çizgi integrali olarak tanımlanır. Bir metrekare kesit alanlı silindir içerisindeki toplam serbest elektron sayısı olarak ifade edilir. Birimi TECU'dur (1 TECU= 10<sup>16</sup> el/m<sup>2</sup>). Eşitlik 2.8'de Toplam Elektron İçeriği verilmiştir.

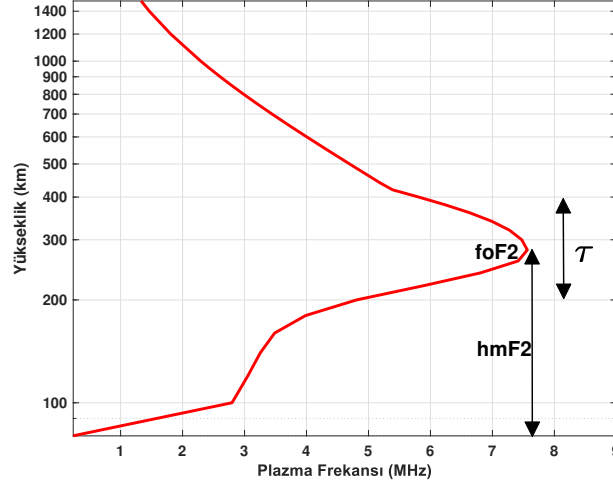
$$TEİ = \int_L N_e dl \quad (2.8)$$

İyonküre Katman Kalınlığı ( $\tau$ ), Toplam Elektron İçeriği (TEİ)'nin F2 katmanı tepe elektron yoğunluğu (NmF2)'na oranı olarak tanımlanır. Birimi km'dir. Eşitlik 2.9'da katman kalınlığı

verilmiştir.

$$\tau = \frac{TEI}{NmF2} \quad (2.9)$$

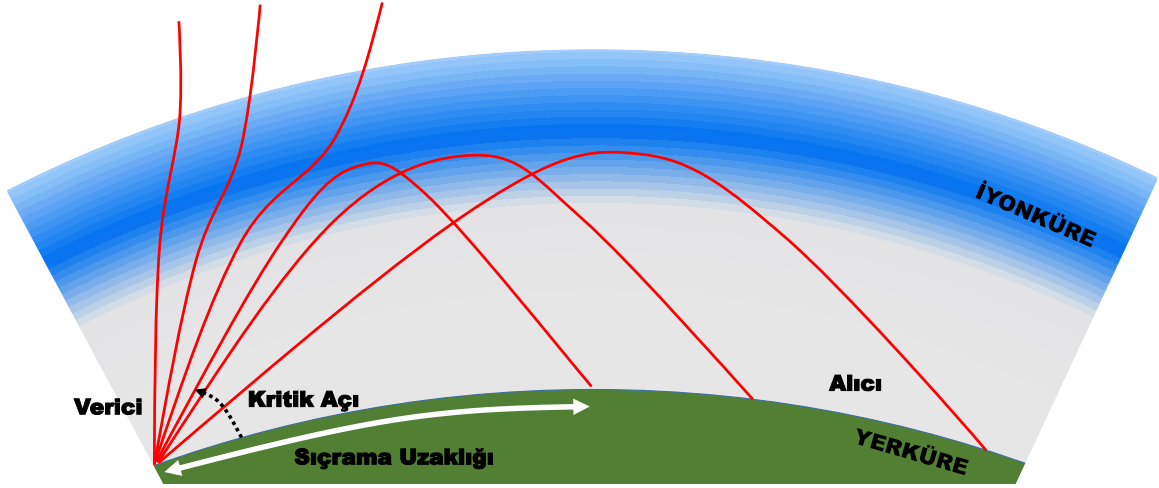
Katman kalınlığı ( $\tau$ ), NmF2 ve TEI'nin oranı olarak iki değişkenin bir fonksiyonudur [25]. Şekil 2.4'de temel iyonküre parametreleri elektron yoğunluğu profili, ionogram üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Pruhonice iyonosondası için 15 Mart 2015 günü 1200 GS Elektron Yoğunluğu Profili (IRI-Plas ile elde edilmiştir.).

Şekil 2.5'de bir vericiden farklı gönderim açılarında gönderilen radyo dalga yolları ve düşme noktaları gösterimi sunulmuştur. Gönderim açıları ve gönderim frekansına bağlı olarak radyo dalgasının alıcıya ulaşacağı noktalar oldukça farklı olabilmektedir. Bu nedenle doğru gönderim parametrelerinin kullanılması çok önemlidir. Dalganın iyonkürede alacağı yol iyonküreye giriş açısı, gönderim frekansı, iyonküre katmanlarının kritik frekansları, kritik yükseklikler ve kırılma indisine bağlıdır. Şekil 2.5'de farklı açıları ile gönderilen dalgalardan bazıları iyonkürede kırılmaktadır, bir kısmı iyonküreyi geçmektedir.

İyonkürede yayılan bir dalganın iyonküre içinde kırılma indisi,  $n$  hesaplanmasında Eşitlik 2.10'da verilen Appleton-Hartree eşitliği kullanılmaktadır [26, 41–44]. İyonküre ve yerküresel manyetik alan etkisi ile iyonküre içinde sıradan ve sıradışı olarak iki farklı hat boyunca ilerleyen dalga, farklı noktalarda kırılmaya uğrar. Eşitlik 2.10'da paydada bulunan  $\pm$  işareti göre sıradan ve sıradışı dalgalar için kırılma indisi bulunabilir. İyonkürenin yön bağlı yapısı nedeni ile sıradan ve sıradışı dalgalar iyonkürede yayılım yoluna bağlı olarak iyonküreyi geçebilir, soğurulabilir. Bu durumda farklı dalga yollarından yayılan radyo dalga



Şekil 2.5: Alıcı ve verici arasında radyo dalgalarının yayılımı.

bileşenleri farklı zaman gecikmeleri ve farklı soğurulma kayıplarına uğrarlar.

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - jZ - \frac{Y_T^2}{2(1-X-jZ)} \pm \left[ \frac{Y_T^4}{4(1-X-jZ)^2} + Y_L^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.10)$$

Yukarıdaki eşitlikte  $n$  kırılma indisini ifade etmektedir. Yukarıdaki eşitlikte verilen  $X(N_e, \omega)$ ,  $Y(B, \omega)$  ve  $Z(\omega)$  aşağıda tanımlanmıştır.

$$X(N_e, \omega) = \frac{e^2 N_e \omega_p^2}{m \epsilon_0 \omega^2} \quad (2.11)$$

$$Y(B, \omega) = \frac{e B}{\omega_m} \quad (2.12)$$

$$Y_L = Y \cos(\varphi) \quad (2.13)$$

$$Y_T = Y \sin(\varphi) \quad (2.14)$$

$$Z(\omega) = \frac{\omega_v}{\omega} \quad (2.15)$$

Yayılan dalganın frekansı  $\omega$  ve yerküre manyetik alan akısı  $B$  ile ifade edilir. Dalganın ilerleme yönü ile yerküre manyetik alanı arasında kalan açı  $\varphi$  olarak tanımlanmıştır. Elektron dönme frekansı  $\omega_h$  ve elektronların çarpışma frekansı  $\omega_v$ 'dür.

En Yüksek Kullanılabilir Frekans (Maximum Usable Frequency, MUF), iyonküre geliş açısına ve kritik frekansa bağlı olarak KD haberleşmesinde kullanılabilen en yüksek frekans olarak tanımlanır. MUF bir alıcı ve verici arasında KD radyo dalgasının iyonküreden kırılarak gönderim noktasında gidebileceği en yüksek frekanstır. Eşitlik 2.16 'da MUF tanımlan-

mıştır.

$$\text{MUF} = \text{foF2} \sec(\chi) \quad (2.16)$$

Yukarıdaki eşitlikte vericinin  $\chi$  yerel başucu doğrultusu ile gönderilen radyo dalgası arasındaki açıdır. KD haberleşmesinde çok önemli bir parametredir.

İyonküre fiziksel birleşimini ve temel iyonküre parametrelerinin modellenmesi amacı ile literatürde fiziksel iyonküre modelleri bulunmaktadır.

### 2.3 İyonküre Modelleri

Uzay-zamanda birçok fiziksel etkene bağlı olarak değişen iyonkürenin modellenmesi kapsamında iklimsel, ampirik ve deterministik modeller geliştirilmiştir. Bu modellerden en çok kullanılan ve en çok kabul görmüş model International Reference Ionosphere (IRI) modelidir. IRI modeli iyonkürenin uzun dönemli fiziksel özelliklerinin incelenerek oluşturulduğu ampirik bir modeldir [45].

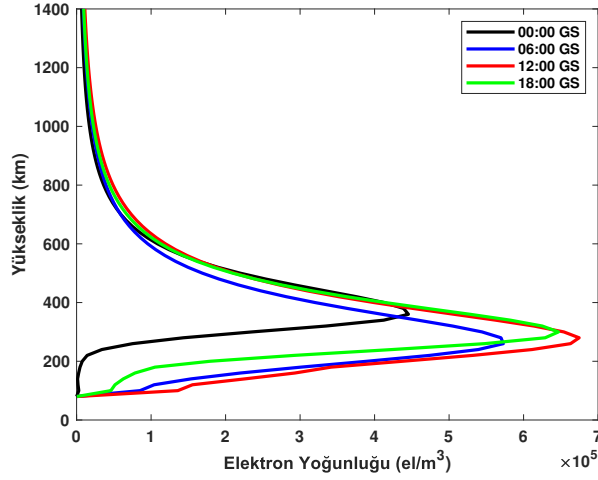
IRI modeli Committee on Space Research (COSPAR) ve International Union of Radio Science (URSI) tarafından standart olarak tanınan parametrelere sahip bir modeldir. IRI, 2009 yılından günümüze kadar ISO standart modeli olarak tanınan temel iyonküre modeli olarak tanınmıştır [17–25,46]. IRI modeli orta enlem iyonosondalarından alınan uzun süreli ölçümlerin incelenmesi ile oluşturulmuştur. Orta enlem için elde edilen kestirimler daha iyonküreye daha iyi uymaktadır. Kutup ve ekvatorial bölgeler için elde edilen kestirimler farklılık göstermektedir.

IRI modeli elektron yoğunluğu, elektron sıcaklığı, iyon sıcaklığı, TEI, foF2, hmF2 başta olmak üzere F2 ve diğer katman parametreleri, iyon bileşimleri ( $\text{O}^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{He}^+$ ,  $\text{N}^+$ ,  $\text{NO}^+$ ,  $\text{O}_2^+$ ), ekvatorial dikey kayma parametrelerini sağlayabilmektedir. IRI modeline girdi olarak F10.7 indisi, Ap indisi ve hmF2, foF2, NmF2; F2 katmanı parametreleri ve diğer katmanların parametreleri girdi olarak sağlanabilmektedir. Model çıkışında elektron yoğunluğunu gündüz saatlerinde 65 – 2,000 km, gece saatlerinde 80 – 2,000 km elektron ve iyon sıcaklıklarını 60 – 2,500 km, iyon bileşimlerini 75 – 2,000 km aralığında sunmaktadır [47].

Şekil 2.6’da IRI modeli kullanılarak Pruhonice iyonosondasının konumunda 06 Haziran 2014 günü farklı saatlerde elektron yoğunluğu profili kestirimleri gösterilmiştir. Yerel öğle



saatlerinde elektron yoğunluğu en yüksek değerine ulaşmaktadır. Gece saatlerinde ise elektron yoğunluğu azalırken en yüksek elektron yoğunluğu gözlenen yükseklik artmaktadır.



Şekil 2.6: IRI kullanılarak Pruhonice (Çekya) için 06 Haziran 2014 farklı saatler için elde edilmiş elektron yoğunluğu profili.

IRI, iyonkürenin oldukça uzun zamana bağlı ölçümleri kullanılarak oluşturulmuş iklimsel, ampirik ve deterministik modelidir [48]. Herhangi bir konum ve zaman için IRI modeli kullanılarak dikey elektron yoğunluğu profili, elektron ve iyon sıcaklığı, iyon yapısına ilişkin iyonküre parametreleri, mevsimlik, aylık ve saatlik ortalama değerler uzun süreli ölçümler kullanılarak elde edilen fonksiyonlara uyumlandırılarak belirlenmektedir. Modelde üretilen bu parametreler 60 km ile 2,000 km arasında yükseklik için verilmektedir.

Model Fortran aracında geliştirilmiş kaynak kodları ile sunulmaktadır. IRI modeli 60 – 2,000 km'ye kadar iyonküre parametreleri sunabilirken plazmaküre katmanına dair bilgi içermektedir.

### 2.3.1 IRI-Plas Modeli

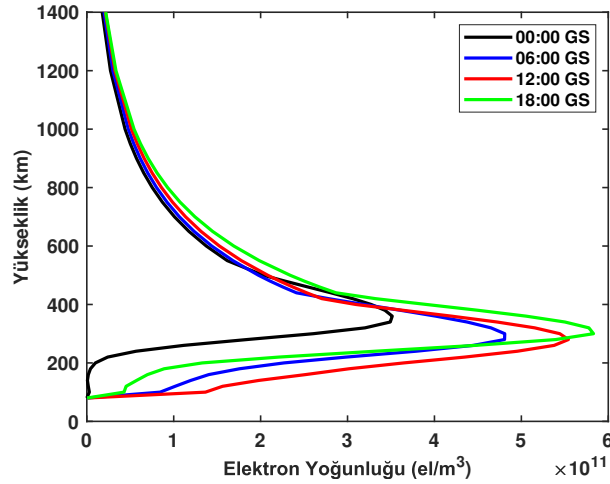
IRI-Plas, IRI modelini temel alarak plazmaküreyi de içine alacak şekilde yükseklik değerini GPS uydularının seyir yörüngesi olan 20,200 km'ye kadar uzatan iyonküre-plazmaküre modelidir. IRI modelinin genişletilmiş bir versiyonu olan IRI-Plas modeline IRI-modeline verilebilen girdilere ek olarak TEİ girdi parametresi olarak verilebilmektedir [25, 49].

IRI-Plas modeli plazmaküreyi de içine alacak şekilde GPS uydu irtifaları olan 20,200 km yüksekliğe kadar elektron yoğunluğu profili kestirebilmektedir [25, 49, 50]. IRI-modeline

göre en belirgin farklı güncellenmiş üst iyonküre katmanı ve plazmaküre ölçeklendirme parametrelerine sahip olmasıdır [51]. GPS uydu seyir irtifalarına kadar üretilen elektron yoğunluğu profilleri ile TEİ kestirimleri GPS alıcıları ile elde edilen TEİ kestirimlerine yaklaşmaktadır [24, 52].

IRI-Plas Fortran programı IONOLAB grubu tarafından çevrimiçi olarak hizmet verecek şekilde sunulmaktadır [53]. Çevrimiçi ortamda IONOLAB grubu tarafından sağlanan hizmette herhangi konum ve zaman için IRI-Plas modelinin kestirimleri kullanıcıya sunulmaktadır.

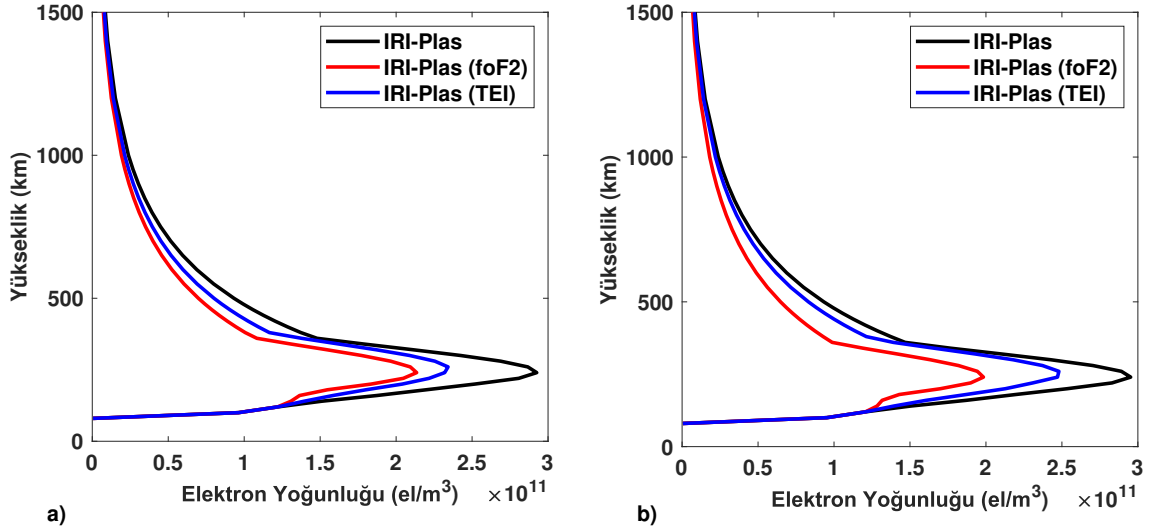
Şekil 2.7’de gösterilen yüksekliğe bağlı elektron yoğunluğu profillerinde günün farklı saatlerinde iyonlaşma miktarı model çıktısı olarak verilmiştir. Şekil 2.7’de IRI-Plas kullanılarak Pruhonice iyonosondasının konumunda 06 Haziran 2014 günü farklı saatlerde elektron yoğunluğu profili kestirimleri gösterilmiştir. Şekil 2.6’de verilen IRI kestirimleri ile şekilsel olarak benzerlik gösterse de elektron yoğunluğunun en yüksek seviyeleri karşılaştırıldığında IRI-Plas kestirimlerinin Plazmakürenin de etkilerini içerdiği için daha yüksek olduğu gözlenmektedir. IRI-Plas en yüksek elektron yoğunluğu değerini öğle saati için fakat IRI akşam saati için vermiştir.



Şekil 2.7: IRI-Plas kullanılarak Pruhonice (Çekya) için 06 Haziran 2014 farklı saatler için elde edilmiş elektron yoğunluğu profili.

İklimsel, ampirik, deterministik modellerin en önemli dezavantajı, hesaplama katsayılarının orta enlem iyonosondalarından aylık-saatlik ortancalardan oluşmasıdır [16]. Dolayısıyla aylık ve mevsimlik, saatlik ortanca değerler üzerinden kestirim yapılması sonucunda iyonkürede meydana gelen kısa süreli ve anlık değişimler kestirimlerde gözlenmemektedir.

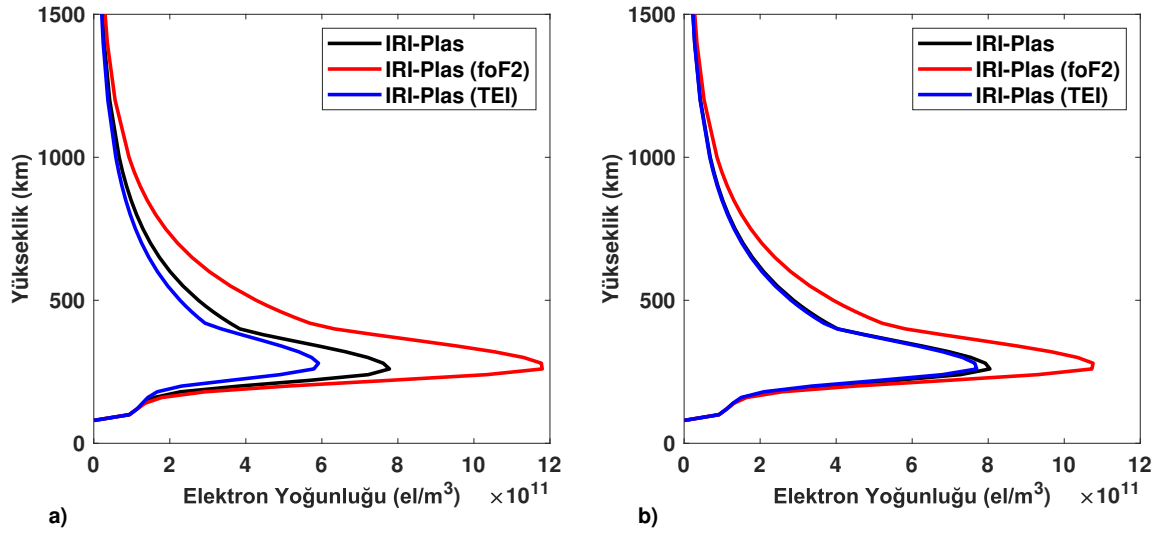
Bu çalışma kapsamında kullanılan foF2 ve TEİ verileri beslenmesi ve modele girdi verilmediği durumda IRI-Plas elektron yoğunluğu profili kestirimleri örneklendirilmiştir. Şekil 2.8'de DB049 (Dourbes) ve PQ052 (Pruhonice) iyonosondası ile dour (Dourbes) ve gope (Ondrejov) GPS alıcı istasyonu için güneş etkinliğinin az olduğu 22 Haziran 2009 12:00 GS için IRI-Plas modeline iyonosondadan elde edilen foF2 ve GPS alıcısından elde edilen TEİ değeri girdi olarak verilmiştir. Şekil 2.8a'da DB049 için elektron yoğunluğu profilinde siyah renkli olarak verilen IRI-Plas profilinin, foF2 verisi beslenmiş profile göre daha fazla kestirdiği gözlenmektedir. Şekil 2.8b'de ise aynı enlemde ve 4° doğuda bulundan PQ052 için elektron yoğunluğu profilleri verilmiştir. Buna göre IRI-Plas kestirimleri foF2 beslenmiş tahminlere göre daha yüksektir. TEİ verisi beslendiği durum ise her iki istasyon içinde benzer olarak IRI-Plas'a girdi verilmediği durum ile foF2 verildiği durum arasında bulunmaktadır.



Şekil 2.8: 22 Haziran 2009 12:00 GS için IRI-Plas modeline foF2 ve TEİ verileri beslendiği koşullar için örnek kestirimler, a) DB049, b) PQ052 (siyah düz çizgi IRI-Plas, kırmızı düz çizgi IRI-Plas'a foF2 girdisi verildiği, mavi düz çizgi IRI-Plas'a TEİ girdisi verildiği durum).

Şekil 2.9'da DB049 (Dourbes) ve PQ052 (Pruhonice) iyonosondası ile dour (Dourbes) ve gope (Ondrejov) GPS alıcı istasyonu için güneş etkinliğinin yüksek olduğu yıldan 22 Şubat 2015 12:00 GS için IRI-Plas modeline iyonosondadan elde edilen foF2 ve GPS alıcısından elde edilen TEİ değeri girdi olarak verilmiştir. Şekil 2.8a'da DB049 için elektron yoğunluğu profilinde siyah düz çizgi olarak verilen IRI-Plas profilinin, foF2 verisi beslenmiş profile göre daha az kestirildiği gözlenmektedir. Şekil 2.8b'de ise aynı enlemde ve 4° doğuda bulunan PQ052 için elektron yoğunluğu profilleri verilmiştir. Buna göre IRI-Plas kestirimleri foF2 beslenmiş tahminlere göre daha azdır. TEİ verisi beslendiği durum ise her iki istasyon içinde

benzer olarak IRI-Plas'a girdi verilmediği durumdan daha az kestirilmiştir.



Şekil 2.9: 22 Şubat 2015 12:00 GS için IRI-Plas modeline foF2 ve TEİ verileri beslendiği koşullar için örnek kestirimler, a) DB049, b) PQ052 (siyah düz çizgi IRI-Plas, kırmızı düz çizgi IRI-Plas'a foF2 girdisi verildiği, mavi düz çizgi IRI-Plas'a TEİ girdisi verildiği durum).

IRI-Plas modeline girdi verilmediği durumda ve foF2 girdi olarak beslendiği duruma göre farklı sonuçlar üretmektedir. Bunun sebebi modelin yakın gerçek zamanlı foF2 verisine duyarlı olarak elektron yoğunluğu kestirimlerini bu girdiye dayalı olarak güncellemesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca TEİ verisinin girdi olarak verildiği durumda ise model girdi verilmediği duruma göre iyonkürenin sakin koşullarında daha iyi sonuçlar üretse de foF2 girdisi verildiği durumdan farklılaşmaktadır. Yine de IRI-Plas modeli IRI modelinden farklı olarak GPS alıcılarının bulunduğu noktalarda modelin TEİ verisi ile girilerek kullanılmasına olanak sağlamaktadır.

## 2.4 İyonküre Ölçümleri

İyonkürenin yapısını ve dinamiğini anlamak için farklı iyonküre ölçüm yöntemleri bulunmaktadır. Bunlar uydu ve yer tabanlı yöntemler olarak temelde iki gruba ayrılabilir [54].

### 2.4.1 Uydu Tabanlı Yöntemler

Uydu tabanlı yöntemler ise genel olarak GPS ve TOPEX / Poseidon (T/P) uyduları temelli yöntemleridir. Okyanus Topoğrafya Deneyi (TOPEX / Poseidon) NASA ve Fransa Uzay Dairesi (CNES) ortak girişimi olarak okyanus incelemeleri yapmaktadır. T/P uydusu 1336 km

yükseklikte bulunmaktadır. Uydunun üzerinde tek ve çift frekanslı altimetreler bulunmaktadır. Çift frekanslı altimetre ile okyanus üzerinde Toplam Elektron İçeriği (TEİ) ölçümleri yapılabilmektedir. T/P ile elde edilen TEİ değerleri diğer başka yöntemler ile elde edilen TEİ değerleri ile karşılaştırılmaktadır.

İyonküre TEİ kestiriminde bir diğer gürbüz yöntem ise F. Arıkan, C.B. Erol ve O. Arıkan tarafından geliştirilen IONOLAB-TEC yöntemi ile yerel başucu doğrultusunda 40° üstünde yükseliş açısına sahip uydulardan alınan 30 saniye çözünürlüğündeki sözde menzil ölçümleri kullanılarak TEİ kestirimi yapılabilmektedir [54–59]. Bu teknik, uydulardan hesaplanan Eğik-TEİ değerlerinin en az kareler yöntemi ile birleştirilerek TEİ kestirimlerinin yapılmasına dayanır. Bu teknikle tüm gün için TEİ kestirimi yapılabildiği gibi, bir gün içindeki sınırlı bir zaman dilimi içinde TEİ kestirimi yapılabilmektedir [54–60].

#### **2.4.1.1 Toplam Elektron İçeriği**

TEİ kestirimleri yerel uzayda sık dağılmış, sürekli çalışan sabit GPS alıcı ağları ile uzay zamanda yüksek çözünürlüklü elde edilebilmektedir. Sabit GPS ağlarından küresel ölçekte kurulmuş ve çeşitli organizasyon, enstitüler aracılığı ile işletilen International GNSS Service (IGS), Avrupa Kıtası üzerinde 350'den fazla GPS alıcısını barındıran European Permanent GPS Network (EUREF) ve ortalama 146 GPS alıcısından oluşan Türkiye üzerinde Türkiye Ulusal Sabit GPS Ağı-Aktif (TUSAGA-Aktif) örnek gösterilebilir. Sabit GPS ağları 24 saat çalışma esasına dayansa da alıcı bazlı teknik problemler verilerde kesintilere yol açabilmektedir.

Konumlama amacıyla kullanılan GPS sisteminde L-bandında yayınlanan L1 ve L2 olmak üzere iki frekansın iyonkürenin frekansta dağıtılmalı olması nedeniyle ise iyonküreden geçerek gelen sinyallerin çeşitli yöntemlerle işlenerek TEİ kestiriminde kullanılmasına dayanmaktadır [61, 62]. Bu çalışmada GPS alıcı kayıtlarından gürbüz, güvenilir ve yüksek zaman çözünürlüklü TEİ kestirimi yapabilen IONOLAB-TEC yöntemi kullanılmıştır [55, 57–59, 63, 64]. TEİ verileri gece-gündüz döngüsü ile saat içinde değişmektedir. Ayrıca güneşin doğuşu ve güneşin batışı saat aralıklarında TEİ davranışları farklıdır. GPS alıcılarından elde edilen TEİ verileri doğrusal bir hat boyunca toplanarak ağırlıklandırıldıkları için iyonküre katmanlarının tamamına ait bileşenler içermektedir.

## 2.4.2 Yer Tabanlı Yöntemler

İyonkürenin incelenmesinde kullanılan yer tabanlı teknikler iyonküreye radyo dalgaları göndererek iyonküreden yansıma ve saçılmaların incelenmesi temeline dayanmaktadır. Sondalar radyo dalgalarını eğik bir açıdan iyonküreye gönderdiklerinde, kısa darbe dizisi biçimindeki radyo dalgaları iyonkürede kırınımına uğrar ve düzensiz biçimde saçılır. Saçılma doğrudan saçılma ve yerden yansiyarak saçılma olmak üzere iki farklı biçimde gerçekleşir. Doğrudan saçılma durumunda sinyal aynı yoldan alıcıya ulaşır. Yerden yansiyarak saçılım durumunda radyo dalgaları önce yerden yansır sonra da iyonküreden kırılarak alıcıya ulaşır.

Bir diğer yer tabanlı teknik olan Evre Uyumsuz Geri Saçılım Radarı ile hedefe doğru radyo dalgaları gönderilir ve yansıyan sinyal incelenir. Bu yöntemde hedef iyonküredeki elektronlardır. Her bir elektronun saçtığı enerji miktarı bilindiğinden geri dönen sinyalin gücü elektron miktarını dolayısıyla elektron yoğunluğunu göstermektedir. Spektrumun genişliği iyonküredeki sıcaklığın bir ölçüsüdür. Bu sıcaklık iyonlar ya da elektronlar için farklı olabilmektedir.

İyonküre yüksekliğinin tespiti için yerden yukarı yerel başucu doğrultusunda radyo dalgaları göndermek en iyi yöntemlerden biridir. Fakat bu yöntemle gönderilen sinyalin geri dönüş süresini hesaplamak gerçek yüksekliği bulmak için uygun değildir. Çünkü gönderilen sinyal iyonküre katmanı içinde boşlukta ilerlediğinden daha yavaş ilerlemektedir. Gerçek yükseklik ölçülen yükseklik, frekans, elektron yoğunluğu ve manyetik alanın bir fonksiyonudur. İyonkürenin grup kırılma indisi 1'den büyük olduğundan görünen yükseklik her zaman gerçek yükseklikten daha büyüktür.

### 2.4.2.1 İyonosonda

İyonosondalar iyonküreyi incelemek için geliştirilen özel radarlardır. İyonosondaların çalışma prensibi yeryüzünden iyonküreye yerel başucu doğrultusunda radyo dalgaları gönderilip alınmasına dayanır. Bu yöntemde bir frekans aralığı taranarak plazma frekansına kadar olan sinyaller geri alınarak işlenir. İşaretin gönderilme zamanı ile geri dönme zamanı arasındaki süre ölçülür.

Daha önce bahsedildiği gibi kırılma indisi nedeniyle ölçülen yükseklik gerçek yükseklikten daha fazladır. Plazma frekansına yaklaşıldıkça ölçülen yükseklik sonsuz olur. Bunun nedeni

sinyalin sonlu bir yüksekliği sıfır hız ile geçmesidir. İyonogramlar ölçülen yükseklik ile gönderilen sinyalin frekansı arasında bir ilişki kurabilir.

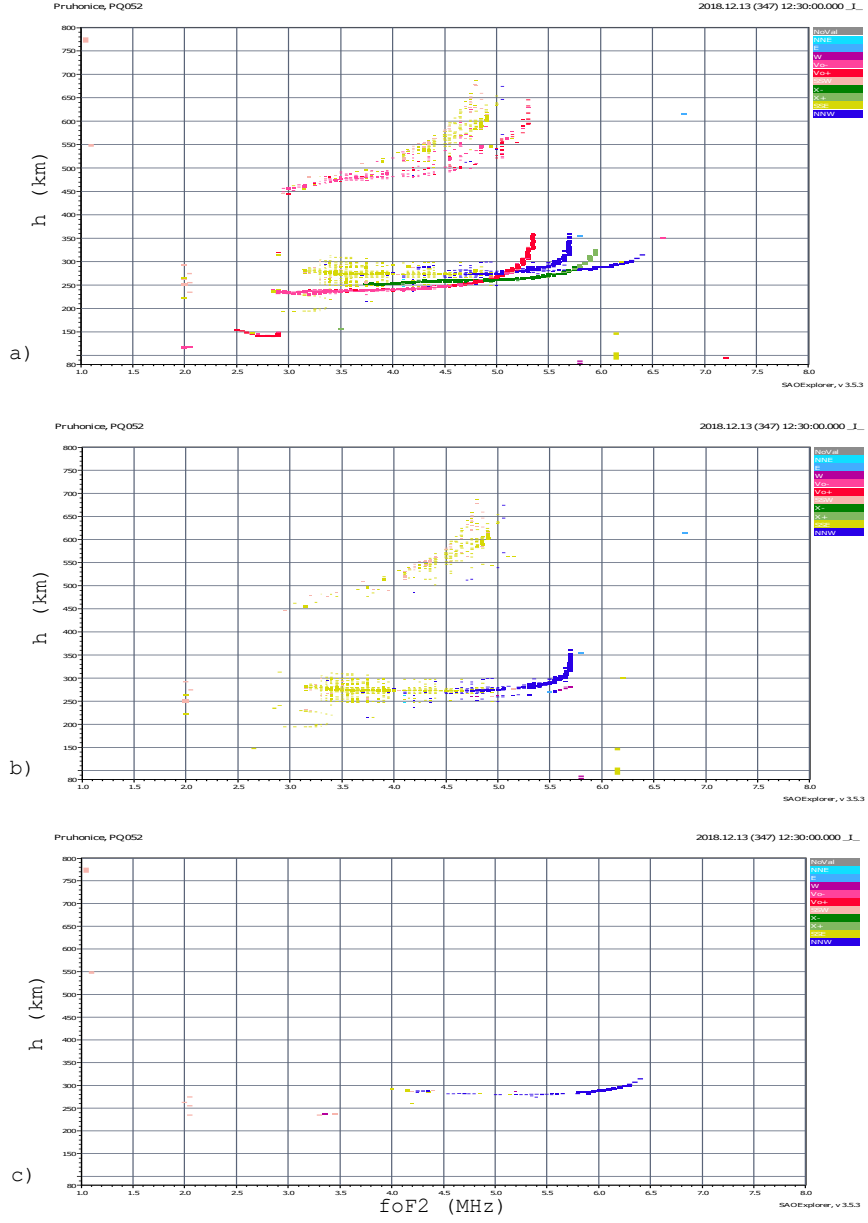
İyonogramlar ile görünen iyonküre yükseklikleri ve kritik frekanslar hesaplanabilir. Radar temeline dayanan yöntemde iyonküreye gönderilen ve yansıyan sinyal alınarak elektronlardan saçılan enerji miktarına göre elektron yoğunluğu bulunur. Spektrumun genişliği iyonküredeki sıcaklığın bir ölçüsüdür. Bu sıcaklık iyonlar ya da elektronlar için farklı olabilmektedir [27,65].

İyonosondalar KD bandında 1 MHz - 20 MHz aralığında darbe dizilerini iyonküreye göndererek gelen sinyallerin yayılma süreleri temel alınarak frekans kestirimi yapmaktadır. İyonkürede iyonlaşmanın en yüksek olduğu F2 katmanından daha fazla bilgi toplanır. İyonosondalar frekans taramalarını ve iyonküreden alınan yansımaları taranan frekans ve geri dönüşlerin alındığı yüksekliğe göre iyonogram adı verilen ölçümler ile sunar. İyonosonda ölçümleri çoğunlukla operatör tarafından el ile düzenlenir. Bunların yanında bazı otomatik düzenleyici programlar da bulunmaktadır.

İyonosondaların ürettikleri frekans yükseklik ilişkilerinin tanımlandığı iyonogramlardan ölçümlere örnek olarak Şekil 2.10'da 12 Aralık 2018 12:30 GS için Pruhonice istasyonundan kaydedilmiş örnek bir iyonogram gösterilmiştir. Şekil 2.10a'da hem dik hem de eğik iyonogram sonuçları verilmiştir. Farklı renkler iyonogramda alınan sinyallerin dik iyonogram için sıradan ve sıradışı dalgaları eğik iyonogram ise dalğanın geliş yönüne göre renklendirilmektedir. Şekil 2.10b'de bu tez çalışmasında kullanılan eğik sıradan dalga iyonogramları ve Şekil 2.10c'de eğik sıradışı dalga iyonogramları frekansa bağlı olarak gösterilmiştir. İyonosonda anten yerleşimleri dik iyonogram elde edilmesine yönelik olarak eniyilenerek kullanılmaktadır [66].

İyonosondalar kurulumu ve idamesi zor ve GPS alıcılarına oranla yüksek maliyetli sistemlerdir. İyonosonda ölçüm sistemlerinden en çok bilinenleri Digisonde ve Dynasonde isimleri verilen sistemlerdir. Bu çalışmada kullanılan Digisonde sistemleri dünya üzerinde yaklaşık olarak 100 adet bulunmakta ve bunlardan sadece 13 adet Avrupa coğrafyası üzerinde bulunmaktadır. İyonosonda ölçümleri konumda yeterli çözünürlüğe sahip değildir. Zamanda ise en fazla 15 dk aralıklar ile ölçüm sunmaktadır.

Bu tez çalışmasında yararlanılan istasyonların listesi Çizelge EK-A.1'de koordinatları ile bir-



Şekil 2.10: Pruhonice iyonosondası 12 Aralık 12 : 30 GS'de kaydedilmiş iyonogram, a) birleşik, b) dikey, c) eğik.



likte sunulmuştur. İyonosonda ölçümleri SAO adı verilen dosyalara kayıt edilmektedir. Çevrimiçi ortamda SAO Explorer isimli özel geliştirilmiş araçlar ile elde edilebilir. Bu çalışmada SAO dosyaları kullanılarak F2 katmanından elde edilen foF2 ve hmF2 verileri kullanılmıştır.

İyonkürede sinyal yayılımı için ortama ait en önemli parametre elektron yoğunluğu olduğu için problemin niteliğine göre elektron yoğunluğu haritaları, elektron içeriği gibi parametrelere ihtiyaç duyulmaktadır. Söz konusu bilgilerin elde edilmesi için iyonküre modelleri, iyonosonda ve GPS alıcıları gibi sistemler kullanılarak elde edilen parametre kestirimleri kullanılmaktadır.

KD sinyal yayılımı çalışmaları kapsamında, sinyalin ilerleyeceği ortamın özelliklerinin bilinmesi gereklidir [16]. İyonkürede sinyalin yansımaya uğradığı frekans ve yükseklikler iyonkürenin anlık durumu ile doğrudan bağlantılıdır. Bu nedenle yakın gerçek zamanda iyonkürenin durumunun kestirilebilmesi için GPS alıcılarından elde edilen TEİ kestirimleri ve iyonosondalardan elde edilen foF2 verileri kullanılabilir.

Bu bölümde tez çalışması kapsamında iyonküre katmanı ve temel fiziksel kavramlar anlatılmıştır. İyonküre modelleri ile inceleme ve modellemede kullanılan ölçümler detaylandırılmıştır. Sonraki bölümde iyonküre ölçümlerinin istatistiksel yönsemeleri incelenmiş ve uzay zamanda istatistiksel özellikleri ile birbirleri arasındaki ilişkiler açıklanmıştır.

### 3. IRI-PLAS İYONKÜRE MODELİNİN YEREL STOKASTİK GÜNCELLENMESİ

Uzayda ve zamanda birçok farklı etkene bağlı değişkenlik gösteren iyonkürenin yapısının anlaşılması ve modellenmesi için kullanılabilir en uygun yöntemlerin başında istatistiksel yöntemler gelmektedir. İyonküre modeli olarak IRI-Plas, uzay-zamanda ampirik, deterministik olan aylık, saatlik ortanca iyonküre değerler sağlar. İyonkürenin temel yönsemeleri uzayda yerel ölçekte noktasal olarak istatistiksel yöntemler ile modellenebilir. IRI-Plas modelinin girdilerinin uzay-zamanda stokastik olarak güncellenmesi ise iyonküre yönsemelerini göstermesi ve temel iyonküre davranışlarını başarılı olarak modellemesi açısından önemlidir. Stokastik modeller elde edildiğinde, iyonkürenin temel yönsemeleri tahmin edilebileceği gibi temel yönsemelerin dışına çıkan beklenmeyen durumlarında belirlenmesinde, takip edilmesinde büyük katkı sağlayacaktır.

İyonkürenin konumda ve zamanda örneklenmesi amacı ile kullanılan ölçümler uzay-zamanda farklı çözünürlüğe sahiptir. Buna ek olarak farklı sistemler ile elde edilen iyonküre ölçümlerinde, iyonkürenin farklı katmanlarından gelen etkiler baskın olmaktadır. İyonkürenin konumda ve zamanda örneklenmesi ile toplanan veriler istatistiksel modeller kullanılarak araştırıldığında yönseme davranışları başarı ile kestirilebilir. Bununla birlikte istatistiksel olarak kısa süreli ya da ölçüm sistemleri kaynaklı etkiler de en aza indirilebilir.

İyonküre davranışının araştırılması kapsamında literatürde yer alan çalışmalar çoğunlukla tekil olarak belirli konumlarda alıcılar ve sınırlı zaman aralıklarında yapılmıştır. foF2 parametresinin uzun dönemli yönsemeleri, zamanda farklı yöntemler ile araştırılmıştır. Literatürde iyi bilinen 11 yıllık güneş döngüsü en önemli yönseme davranışdır [67]. Küresel ölçekte yapılan bir başka çalışmada foF2 ve hmF2 parametrelerinin yönsemeleri incelenmiştir. Yapılan [68] çalışmada ITU modeli temel alınarak iyonosonda konumlarında regresyon analizleri yapılmıştır. Tepe elektron yoğunluğu ilinti analizinin yapıldığı [69] çalışmada doğrusal regresyon ile elektron yoğunluğu araştırılmıştır. Aylık ortanca F10.7 indisi ve foF2 arasında doğrusal olmayan ve konum ile mevsime son derece bağımlı ilişkiler gözlenmiştir [69–71]. İyonkürenin mevsimsel değişkenliği sakin olduğu zamanlarda ve güneş etkinliğinin küçük seviyede olduğu dönemler için incelenmiştir. Gece saatlerinde iyonizasyondaki değişimlerin foF2'nun artmasına sebep olduğu [72] çalışmada belirtilmiştir. İyonküre F2 katmanı gözlemleri kullanılarak Avrupa üzerinde jeomanyetik değişkenlik regresyon analizi

yöntemi ile [73] çalışmasında incelenmiştir. Yerküresel manyetik fırtına görülme olasılığı ile foF2 ve TEİ'nin ortanca değerlerinden sapma miktarları arasındaki ilinti [74] çalışmasında incelenmiştir. Buna göre TEİ ve foF2 arasındaki yüksek ilinti nedeni ile foF2 gibi TEİ'nin de iyonküresel değişkenliği gösterdiği bildirilmiştir. foF2 parametresinin gün içinde yönsemesinin incelendiği başka bir çalışmada polinom fonksiyonları uyumlandırılmıştır [75]. Çalışmalar iyonküre ölçümlerinin belirli zaman aralıklarında ve kısıtlı zamanlardaki incelemelerine dayanmaktadır. Yönsemenin istatistiksel olarak davranışının belirlendiği çalışmalar sadece ölçümler arasındaki ilintinin incelenmesi ile sınırlı kalmıştır.

Toplam elektron içeriği durağan ve durağan olmayan iki rassal sürecin toplamı şeklinde [76] çalışmasında modellenmiştir. Yapılan çalışmada Markov rassal süreçleri kullanılarak TEİ'nin yönseme ve düzgün olmayan bileşenlerine ayrılması üzerinde çalışılmıştır. foF2 ölçümleri rassal değişken olarak düşünülerek saat-içi foF2 değişkenliğinin Gauss tipi rassal değişken olarak uyumlandırılması incelenmiştir. Bu kapsamda saat-içi foF2 istatistiklerinin Gauss biçimli bir rassal değişken ile tam olarak modellenemeyeceği sonucuna varılmıştır [77,78].

Elektron yoğunluğu profili ve iyonküre içinde gerçekleşen farklı süreçlere bağlı olarak katman kalınlığı iyonlaşma ile bağlantılı olduğu bildirilmiştir [79]. İyonküre ölçümleri gibi katman kalınlığının değişkenliğinin incelendiği çalışmalar da yönseme karakteristiği ampirik, deterministik olarak uzun süreli kaydedilmiş verilere dayandırılan çıkarımlar kullanılarak elde edilmektedir. Katman kalınlığının incelenmesi kapsamında farklı veri setleri, farklı zaman ve konumlardan elde edilmiş analizler literatürde bulunmaktadır [48, 80–87]. TEİ'nin GPS alıcılarından foF2'nun ise iyonosondalardan elde edilerek katman kalınlığının hesaplandığı ve katman kalınlığının tekil ölçümler ya da sınırlı zamanlarda değişkenliğinin incelendiği çalışmalar vardır [80, 82, 84, 88].

Orta enlemde gece saatlerinde gözlenen değişim gündüz saatlerine göre daha fazladır. Bu durum güneş etkinliğinin az, orta ve yüksek dereceli durumları için genellenebilir [82, 89]. Hem TEİ hem de foF2 gibi birbiri ile ilinti seviyesi yüksek iki ölçümden hesaplanan katman kalınlığı değerlerinin Avrupa üzerinde güneş etkinliği ve enlem bağımlılığı bakımından TEİ ve katman kalınlığının doğrusal regresyon yöntemi ile incelenmiştir. İki ölçümünde enlem değişimi ve güneş etkinliğine bağlı olmasına rağmen katman kalınlığının bu değişimlerden etkilenmediği rapor edilmiştir [81, 90].

Katman kalınlığının gün içinde özellikle kış mevsimlerinde gece saatlerinde gündüz saatlerine göre çok yüksek olduğu belirtilmiştir [48]. Aynı çalışmada güneşin doğuşundan önce yükselmesi olarak rapor edilen durumda katman kalınlığının güneş doğmadan önce bir tepe noktasına ulaştığı belirtilmiştir. Güney Kore üzerinde katman kalınlığı üzerine yapılan bir araştırmada bahar dönemlerinde daha yüksek katman kalınlığı değerleri elde edildiği gösterilmiştir. Güneşin batışı sonrasında da gün doğumu öncesine benzer şekilde katman kalınlığının arttığı belirtilmiştir. Bu durumun iyonlaşma ve yeniden birleşme süreçlerinin sonucunda gerçekleşebileceği değerlendirilmiştir [84]. Katman kalınlığının Avrupa üzerinde incelendiği bir çalışmada mevsimsel, enleme göre, güneş etkinliğine göre ve gün içi saatlere göre değişim gözlenmiştir. Mevsimsel değişimler kapsamında özellikle gün doğumu öncesi ve gün batımı sonrası artışlar olduğu şeklinde rapor edilmiştir. Orta enlemde kış ve gün-tün eşitliği zamanlarında gece saatlerinde katman kalınlığının mevsimlik ortanca değerinin gündüz saatlerinden yüksek gözleendiği bildirilmiştir. Ayrıca güneş etkinliğinin az olduğu zamanlarda değişimin güneş etkinliği yüksek zamanlardan fazla gözleendiği rapor edilmiştir [87].

İyonküre ölçümlerinin istatistiksel olarak modellenmesi için Olasılık Yoğunluk Fonksiyonları (OYF) kullanılmıştır. OYF'ler rassal değişkenlerin özelliklerinin belirlenmesinde kullanılacak en önemli matematiksel modellerdir [31]. Rassal değişkenin OYF'si ve OYF parametreleri kullanılarak istatistiksel özellikleri ifade edilebilir. İyonküre ölçümlerinin saat-içi parametrik istatistikleri ilk defa TEİ değerleri için ekvatorial, orta enlem ve kutup bölgeleri için  $10^\circ$  enlem aralıklarında elde edilmiştir [91,92]. Saatlik olarak gruplandırılmış TEİ değerlerinin deneysel dağılımları elde edildikten sonra Rayleigh Genlik (RV), Rayleigh Güç (RP), Lognormal (LN), Weibull (WB) ve K-Dağılımlarının (KD) OYF parametreleri (şekil ve ölçek parametreleri) kestirilmiştir. En uygun OYF'nin belirlenebilmesi için verilen parametrik dağılım fonksiyon parametreleri kullanılarak Lognormal OYF'ye Eniyiolabilirlik Oranı hesaplanmıştır. Eniyiolabilirlik Oranının 1'den büyük çıktığı durumda test edilen OYF, 1'den küçük çıktığı durumda Lognormal OYF'ye karar verilmiştir. Bu çalışmada orta enlemde yapılan kestirimlerin çok büyük kısmında Lognormal ve Weibull dağılımları baskın olarak elde edilmiştir.

Orta enlem bölgesinde yer alan Türkiye ve Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti üzerinde TUSAGA ve TUSAGA-Aktif ağından elde edilen konumda, zamanda daha sık ve yüksek çözünürlüklü TEİ kestirimleri istatistiksel olarak incelenmiştir [61,65]. Yapılan çalışmalarda orta

enlemde bölgesel olarak daha sık olarak yerleştirilmiş GPS alıcılarından elde edilmiş veriler kullanılmıştır. Bölgesel olarak enlemde  $2^\circ$  ve boylamda  $3^\circ$  aralıklı ızgara hücreleri içinde yer alan istasyonlardan bölgenin istatistiksel özelliklerini taşıyan, bölge içindeki istasyonların TEİ istatistikleri ile benzer özellikleri gösterebilen temsilci GPS alıcıları seçilmiştir. Bölgesel ve yıllık olarak TEİ istatistiksel özellikleri belirlenmiştir.

Katman kalınlığının istatistiksel modeli de IONOLAB-PDF yöntemi ile elde edilmiştir. Böylece iyonküre incelemede kullanılan temel ölçüm ve kestirimlerin temel yönsemeleri uzay zamanda ve birbirleri arasında ortaya konulmuştur. Ölçümler arasındaki uzay-zamanda çözümlülük ve örnekleme sıklıkları farklılıklar gösterdiği için daha seyrek örneklere sahip verilerin istatistiklerinin daha sık örneklere sahip ölçümler ile desteklenmesinde temel olarak kullanılacak istatistiksel bilgiler elde edilmiştir. IONOLAB-PDF yöntemi Altbölüm 3.1’de anlatılmıştır.

### 3.1 IONOLAB-PDF

Rassal olarak tanımlanan bir değişkenin istatistiksel modelinin elde edilmesi için en iyi yöntem Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (OYF) kestirimidir. OYF, rassal bir değişkenin alabileceği değerlerin olasılıklarını tanımlayan bir fonksiyondur. Rassal değişkenler olan iyonküre ölçümlerinin istatistiksel modelleri OYF’ler ile kestirilebilir. IONOLAB-PDF bir parametrik OYF kestirim yöntemi olarak parametrik OYF’leri ve bunların parametrelerini kestirmektedir.

İyonküre ölçümlerinin saat-içi gruplandırılması ve parametrik OYF kestirim yöntemi anlatılmıştır. Bir  $u$  ölçüm noktasının,  $y$ . yılı,  $s$ . mevsimi,  $m$ . ayı,  $d$ . günü ve  $h$ . saatinden elde edilen ölçümler  $Z_{u,y;d,h}$  olarak tanımlanırsa:

$$Z_{u,y;s,m;d,h} = [Z_{u,y;s,m;d,h}(1) \cdots Z_{u,y;s,m;d,h}(n) \cdots Z_{u,y;s,m;d,h}(N)]^T \quad (3.1)$$

yukarıdaki eşitlikte  $N$  örnek sayısını,  $T$  matris devriğini göstermektedir. Saatlik veriler aylık olarak gruplandırılırsa:

$$Z_{u,y;s,m,h} = [Z_{u,y;s,m;1,h} \cdots Z_{u,y;s,m;n_d,h} \cdots Z_{u,y;s,m;N_d,h}]^T \quad (3.2)$$

yukarıdaki eşitlikte  $N_d$  verilen ay içindeki gün sayısını ifade etmektedir. Mevsimlik olarak gruplandırılan saatlik veriler ise

$$\underline{Z}_{u;y;s;h} = \left[ \underline{Z}_{u;y;s;1;h} \cdots \underline{Z}_{u;y;s;n_{s;m};h} \cdots \underline{Z}_{u;y;s;N_{s;m};h} \right]^T \quad (3.3)$$

yukarıdaki eşitlikte  $N_{s;m}$  mevsim içindeki ayları ifade etmektedir. Gruplandırılan saat-içi veriler kullanılarak elde edilen deneysel dağılımlara Eşitlik 3.4 ile Eşitlik 3.8 arasında tanımlanan Olasılık Yoğunluk Fonksiyonları (OYF) uyumlandırılmıştır.

$$p_{LN}(z; \underline{\Psi}_{LN}) = \frac{1}{z b_{LN} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln z - a_{LN})^2}{2b_{LN}^2}\right) \quad (3.4)$$

$$p_{WB}(z; \underline{\Psi}_{WB}) = \frac{b_{WB}}{(a_{WB})^{b_{WB}}} (z^{b_{WB}-1}) \exp\left(-\left(\frac{z}{a_{WB}}\right)^{b_{WB}}\right) \quad (3.5)$$

$$p_{RV}(z; \underline{\Psi}_{RV}) = \frac{2z}{a_{RV}} \exp\left(-\frac{z^2}{a_{RV}}\right) \quad (3.6)$$

$$p_{RP}(z; \underline{\Psi}_{RP}) = \frac{1}{a_{RP}} \exp\left(-\frac{z}{a_{RP}}\right) \quad (3.7)$$

$$p_{KD}(z; \underline{\Psi}_{KD}) = \frac{2 b_{KD}}{\Gamma(a_{KD})} \left(\frac{z b_{KD}}{2}\right)^{a_{KD}} K_{a_{KD}-1}(z b_{KD}) \quad (3.8)$$

Yukarıdaki eşitliklerde  $z$  rassal değişken olmak üzere;  $\underline{\Psi}_{LN} = [a_{LN} \ b_{LN}]^T$  ve  $\underline{\Psi}_{WB} = [a_{WB} \ b_{WB}]^T$  sırasıyla Lognormal ve Weibull OYF parametreleridir. Rayleigh Güç  $\underline{\Psi}_{RP} = [a_{RP}]$ , Rayleigh Genlik  $\underline{\Psi}_{RV} = [a_{RV}]$  ve K-Dağılımı  $\underline{\Psi}_{KD} = [a_{KD} \ b_{KD}]^T$  IONOLAB-PDF kestirimleridir. Bu parametreler Eniyiolabilirlik Ölçütüne göre kestirilmiştir [55, 62, 92]. İyonküre ölçümlerinin parametrik OYF kestirimi, uyumlandırılan OYF ailesinden büyük çoğunlukla ve baskın olarak Lognormal ve Weibull olarak gözlenmektedir [62, 92]. Lognormal OYF parametreleri Eşitlik 3.10'da verilmiştir

$$\hat{a}_{LN} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \ln Z(n) \quad (3.9)$$

$$\hat{b}_{LN}^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\ln Z(n) - \hat{a}_{LN})^2 \quad (3.10)$$

Yukarıdaki eşitlikte  $Z(n)$  ile verilen ifade de  $n$ . örnek ve  $N$  toplam örnek sayısını göstermektedir.

Weibull OYF parametreleri OYF'nin kapalı bir çözümünün olmaması sebebi ile Momentler Yöntemi kullanılarak kestirilmiştir. Buna göre birinci ve ikinci momentler kullanılarak aşağıda verilen maliyet fonksiyonu eniyilenmiştir.

$$\frac{\Gamma(1 + 2/\widehat{b}_{WB})}{\Gamma^2(1 + 1/\widehat{b}_{WB})} - \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Z^2(n)}{\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Z(n)\right)^2} = 0 \quad (3.11)$$

Yukarıda verilen eşitlikte en küçük değere yakınsayan maliyet fonksiyonu için en uygun  $\widehat{b}_{WB}$  kestirimleri hesaplamalı olarak bulunmaktadır. Yukarıdaki eşitlikte  $\Gamma(\cdot)$  Gama Fonksiyonunu ifade etmektedir. En uygun  $\widehat{b}_{WB}$  kullanılarak  $\widehat{a}_{WB}$  değeri aşağıda verildiği gibi hesaplanmıştır.

$$\widehat{a}_{WB} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Z(n)}{\Gamma(1 + 1/\widehat{b}_{WB})} \quad (3.12)$$

Rayleigh Genlik ve Rayleigh Güç dağılımlarının parametreleri de sırasıyla Eşitlik 3.13 ve Eşitlik 3.14'de verildiği gibi kestirilebilir.

$$\widehat{a}_{RV} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Z(n) \quad (3.13)$$

$$\widehat{a}_{RP} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Z^2(n) \quad (3.14)$$

Momentler yöntemi kullanılarak K-Dağılımı'nın parametreleri kestirilebilir. Buna göre ikinci ve dördüncü derece momentler aşağıda sırasıyla verilmiştir [93, 94].

$$E \{Z^2\} = \left(\frac{2}{\widehat{b}_{KD}}\right)^2 \widehat{a}_{KD} \quad (3.15)$$

$$E \{Z^4\} = 2 \left(1 + \frac{1}{\widehat{a}_{KD}}\right) E^2 \{Z^2\} \quad (3.16)$$

K dağılımı'nın parametreleri yukarıdaki eşitliklerde verilen momentler kestirildikten sonra aşağıda verilen eşitliklerde yerine konularak hesaplanabilir.

$$\hat{a}_{KD} = \frac{2E^2 \{Z^2\}}{E \{Z^4\} - 2E^2 \{Z^2\}} \quad (3.17)$$

$$\hat{b}_{KD} = 2\sqrt{\frac{2E \{Z^2\}}{E \{Z^4\} - 2E^2 \{Z^2\}}} \quad (3.18)$$

En uygun OYF kestirmede kullanılan Eniyiolabilirlik fonksiyonları Eşitlik 3.19'da Weibull OYF için verilmiştir.

$$R_{WB} = \frac{\prod_n^N p_{WB}(z(n), \hat{\Psi}_{WB})}{\prod_n^N p_{LN}(z(n), \hat{\Psi}_{LN})} \quad (3.19)$$

Yukarıdaki eşitliklerde  $R_{WB}$  değerinin 1'den büyük olması Weibull diğer koşullarda Log-normal OYF en uygun dağılım olarak seçilmiştir. Eşitlik 3.20'de ve Eşitlik 3.21'de sırasıyla Rayleigh Genlik ve Rayleigh Güç OYF kestirimleri için Eniyiolabilirlik Oranı verilmiştir.

$$R_{RV} = \frac{\prod_n^N p_{RV}(z(n), \hat{\Psi}_{RV})}{\prod_n^N p_{LN}(z(n), \hat{\Psi}_{LN})} \quad (3.20)$$

$$R_{RP} = \frac{\prod_n^N p_{RP}(z(n), \hat{\Psi}_{RP})}{\prod_n^N p_{LN}(z(n), \hat{\Psi}_{LN})} \quad (3.21)$$

Yukarıdaki eşitliklerde  $R_{RV}$  değerinin 1'den büyük olması Rayleigh Genlik,  $R_{RP}$  değerinin 1'den büyük olması Rayleigh Güç ve diğer koşullarda Lognormal OYF en uygun dağılım olarak seçilmiştir. Yukarıda verilen diğer OYF'lere benzer olarak Eşitlik 3.22'de K-Dağılımı Eniyiolabilirlik oranı verilmiştir.

$$R_{KD} = \frac{\prod_n^N p_{KD}(z(n), \hat{\Psi}_{KD})}{\prod_n^N p_{LN}(z(n), \hat{\Psi}_{LN})} \quad (3.22)$$

Yukarıdaki eşitliklerde  $R_{KD}$  değerinin 1'den büyük olması K-dağılımı diğer koşullarda Log-normal OYF en uygun dağılım olarak seçilmiştir.



Deneysel dağılımın hesaplanmasında kullanılan eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$\underline{p}_E = \underline{Z} \left( \sum_{n=1}^N Z(n) \right)^{-1} \quad (3.23)$$

Eşitlik 3.23’de verilen deneysel dağılıma uyumlandırılan Eşitlik 3.4-Eşitlik 3.8 parametrik OYF’lerinin deneysel dağılıma benzerliği ise OYF’lerin şekilsel karşılaştırılmasında kullanılan Simetrik Kullback-Liebler Mesafesi (SKLD) kullanılarak incelenmiştir [95, 96].

$$\text{SKLD} = \sum_{n=1}^N \left( p_P(Z(n), \hat{\underline{\psi}}) \log \frac{p_P(Z(n), \hat{\underline{\psi}})}{p_E(Z(n))} + p_E(Z(n)) \log \frac{p_E(Z(n))}{p_P(Z(n), \hat{\underline{\psi}})} \right) \quad (3.24)$$

Yukarıdaki eşitlikte  $p_E$  ve  $p_P$  sırasıyla Deneysel Dağılım ve parametrik OYF’yi göstermektedir.

Kestirilen parametrik OYF’lerin parametrik ortalama ve değişimleri Lognormal OYF için sırasıyla Eşitlik 3.25 ve Eşitlik 3.26’da verilmiştir.

$$\hat{\mu}_{LN} = \exp \left( \hat{a}_{LN} + \hat{b}_{LN}^2 / 2 \right) \quad (3.25)$$

$$\hat{\sigma}_{LN}^2 = (\exp(\hat{b}_{LN}^2) - 1) \exp(2\hat{a}_{LN} + \hat{b}_{LN}^2) \quad (3.26)$$

Parametrik Weibull OYF’nin parametrik ortalama ve değişimleri sırasıyla Eşitlik 3.27 ve Eşitlik 3.28’de verilmiştir.

$$\hat{\mu}_{WB} = \hat{a}_{WB} \Gamma(1 + 1/\hat{b}_{WB}) \quad (3.27)$$

$$\hat{\sigma}_{WB}^2 = \hat{a}_{WB}^2 \left( \Gamma(1 + 2/\hat{b}_{WB}) - \Gamma^2(1 + 1/\hat{b}_{WB}) \right). \quad (3.28)$$

Rayleigh Genlik dağılımının parametrik ortalama ve değişimleri sırasıyla Eşitlik 3.29 ve Eşitlik 3.30’da verilmiştir [97].

$$\hat{\mu}_{RV} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \hat{a}_{RV} \quad (3.29)$$

$$\hat{\sigma}_{RV}^2 = \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \hat{a}_{RV} \quad (3.30)$$

Rayleigh Güç dağılımının parametrik ortalama ve değışintileri sırasıyla Eşitlik 3.31 ve Eşitlik 3.32’de verilmiştir [97].

$$\hat{\mu}_{RP} = \hat{a}_{RP} \quad (3.31)$$

$$\hat{\sigma}_{RP}^2 = \hat{a}_{RP}^2 \quad (3.32)$$

K-Dağılımının parametrik ortalama ve değışintileri sırasıyla Eşitlik 3.33 ve Eşitlik 3.34’de verilmiştir [98].

$$\hat{\mu}_{KD} = \frac{\sqrt{\pi} \Gamma(\hat{a}_{KD} + 1/2)}{\hat{b}_{KD} \Gamma(\hat{a}_{KD})} \quad (3.33)$$

$$\hat{\sigma}_{KD}^2 = \frac{2}{\hat{b}_{KD}} \frac{\Gamma(\hat{a}_{KD} + 1)}{\Gamma(\hat{a}_{KD})} \left( \frac{2}{\hat{b}_{KD}} - \frac{\pi \Gamma(\hat{a}_{KD} + 1)}{4 \Gamma(\hat{a}_{KD})} \right) \quad (3.34)$$

Yukarıdaki eşitliklerde  $\Gamma(\cdot)$  Gama Fonksiyonunu ifade etmektedir.

IONOLAB-PDF, Algoritma 3.1’de verilmiştir. IONOLAB-PDF algoritmasında istasyon, tarih aralığı ve saat girdi olarak verildikten sonra, algoritma veritabanında istenen verilerin olmaması durumunda otomatik olarak gerekli verilerin karşıdan çevrimiçi yüklenerek gruplandırılması ile kestirim aşamasına geçmektedir. OYF kestirimi sonucunda elde edilen OYF ve kestirilen OYF’nin şekil, ölçek parametreleri ve deneysel dağılımla kestirim fonksiyonunun benzerliğinin gösteren SKLD değerlerini sunmaktadır. IONOLAB-PDF algoritması akış diyagramı Şekil 3.1’de verilmiştir. Algoritma girdilere göre otomatik olarak kestirimleri gerçekleştirerek kullanıcıya sunmaktadır. IONOLAB-PDF yöntemi kullanılarak TEİ, foF2, hmF2 ve katman kalınlığının istatistiksel modelleri noktasal olarak istasyon bazında kestirilmiştir. Kullanılan GPS alıcısı konumları da Çizelge 3.1’de bulunmaktadır. Ölçüm noktaları hem iyonosonda hem de GPS alıcısının birbirine yakın olduğu ve orta enlemde doğrusal bir hat üzerinde seçilmiştir.

---

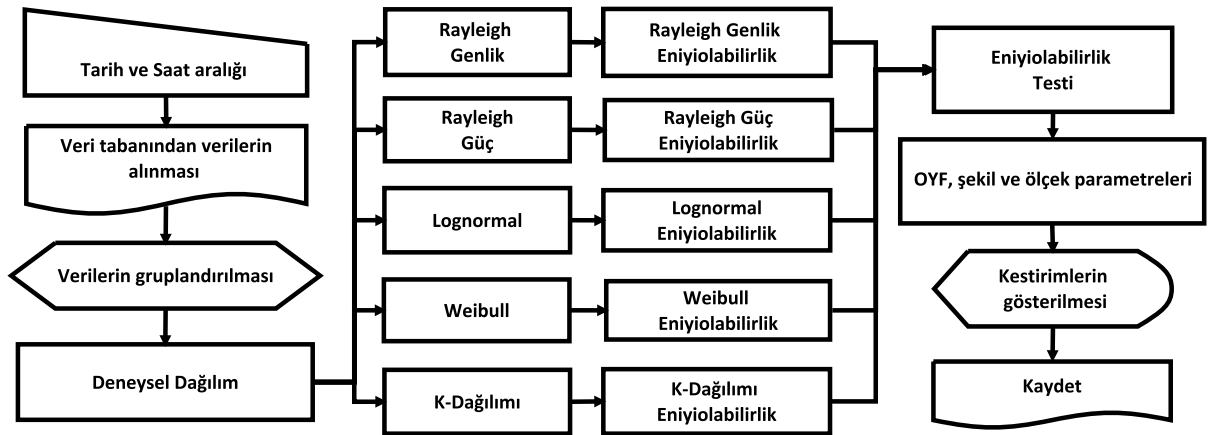
**Algoritma 3.1** IONOLAB-PDF Algoritması

---

**Girdiler:** Tarih aralığı, saat, istasyon

**Çıktılar:** OYF ve parametre kestirimleri, 1. ve 2. Moment, SKLD

1. Tarih ve saat aralığını gir.
2. İstenen saat aralığına göre verileri Eşitlik 3.2'e göre grupta.
3. Eşitlik 3.23'e göre deneysel dağılımı kestir.
4. Eşitlik 3.4, Eşitlik 3.5, Eşitlik 3.6, Eşitlik 3.7, ve Eşitlik 3.8'de verilen OYF parametrelerinin kestirimi.
5. Eşitlik 3.19, Eşitlik 3.20, Eşitlik 3.21 ve Eşitlik 3.22'te verilen Eniyiolabilirlik fonksiyonu hesapla.
6. Eğer  $R_{KD} > 1$  ise K-Dağılımı,  $R_{RV} > 1$  ise Rayleigh Genlik,  $R_{RP} > 1$  ise Rayleigh Güç ve  $R_{WB} > 1$  ise Weibull, diğer koşullarda Lognormal
7. Enuygun OYF, OYF Parametreleri, SKLD hesapla



Şekil 3.1: IONOLAB-PDF akış diyagramı.

İyonküre ölçümlerinin stokastik yönseme modellerinin araştırılması amacı ile güneş etkinliğinin az, orta ve yüksek olduğu sırasıyla 2009, 2012 ve 2014 yılları incelenmiştir [99].

İyonküre ölçümlerinin IONOLAB-PDF yöntemi ile elde edilen saat-içi parametrik OYF kestirimlerinin incelenmesi amacı ile örnek veri setleri ile bunların deneysel dağılımlarına uyan en uygun parametrik OYF'ler gösterilmiştir. Şekil 3.2a'da incelenen istasyonlardan en ku-

Çizelge 3.1: İyonosonda ve GPS alıcılarının coğrafi ve jeomanyetik koordinatları.

İstasyon	Tipi	İstasyon Kodu	Coğrafi Koordinatlar		Jeomanyetik Koordinatlar	
			Enlem (°K)	Boylam (°D)	Enlem (°K)	Boylam (°D)
Juliusruh	İyonosonda	JR055	54.60	13.40	53.97	99.51
Sassnitz Island	GPS	sass	54.51	13.64	53.84	99.69
Pruhonic	İyonosonda	PQ052	50.00	14.60	49.34	98.57
Ondrejov	GPS	gope	49.91	14.79	49.22	98.71
Rome	İyonosonda	RO041	41.90	12.50	41.85	93.66
Rome	GPS	m0se	41.89	12.49	41.84	93.65

zeyde bulunan JR055'in 2009 yılı 0200 – 0300 GS saatleri arasında foF2 verileri gösterilmiştir. foF2'da yıl içinde periyodik bir yönseme bulunmaktadır. Şekil 3.2d'de ise Şekil 3.2a'da gösterilen foF2 verilerinin OYF kestirimi sunulmuştur. Lognormal dağılım kestirilen OYF'nin parametreleri Şekil 3.2d'de gösterilmiştir.

Şekil 3.2b'de daha güneyde PQ052 istasyonu için daha kısa bir veri seti olan bahar mevsimi (Mart-Nisan) 2012 yılı ve 1800 – 1900 GS saatleri arasında foF2 verileri gösterilmiştir. Yıllık veriye oranla daha kısa olmasına rağmen foF2 verileri hem periyodik bir davranış göstermekte hem de genliği 4 MHz'den fazla değişim göstermektedir. Şekil 3.2e'de PQ052 bahar mevsimi foF2 verilerinin OYF kestirimi gösterilmiştir. Bu veri seti için Weibull OYF en iyi uyan dağılımdır. Değişimin arttığı durumlarda kestirilen dağılım Weibull olabilmektedir. Şekil 3.2b'de gösterilen foF2, Şekil 3.2a'da verilen foF2 verilerinden daha yüksek genliklidir. Bunun başlıca sebebi öncelikle iyonlaşmanın yüksek olduğu akşam saatleri olması, daha fazla güneş etkinliği gözlenen bir yıl ve daha güneyde olmasıdır.

Şekil 3.2c'de en güneyde bulunan RO041 istasyonuna ait 2014 yılı Haziran ayı ve 0400 – 0500 GS saatleri arası foF2 gösterilmiştir. Bu veriler incelenen yıllar içinde iyonküre hareketliliğinin en yüksek olduğu yıl ve yıl içinde güneşlenme süresinin en yüksek olduğu yaz mevsiminde bir aylık verilerdir. Öncelikle Şekil 3.2a ve Şekil 3.2b'de verilen foF2 değerlerinden daha yüksektir. İncelenen zaman aralığının kısalması ise değişim aralığının mevsimsel aralığa oranla daha az olmasını sağlamıştır. Şekil 3.2f'de gösterilen OYF kestiriminde ise Lognormal olarak bulunan OYF'nin daha çok değişkenliği gösteren ikinci parametresi yıllık veriden daha küçüktür. Buna ek olarak Şekil 3.2f'de elde edilen birinci parametre iyonlaş-

manın yeni başladığı sabah saatleri olmasına rağmen Şekil 3.2d'de kestirilenden oldukça yüksektir. Bunun sebebi güneş etkinliğinin yüksek olduğu yıl ve en güneyde bulunan istasyon olmasıdır.

Şekil 3.2g'de incelenen istasyonlardan en kuzeyde bulunan JR055'in 2009 yılı 0200 – 0300 GS saatleri arasında hmF2 verileri gösterilmiştir. foF2'da olduğu gibi hmF2 verileri üzerinde de yıl içinde periyodik bir yönseme gözlenmiştir. Buna ek olarak özellikle yıllık verinin orta kısımlarında açıkça foF2 ile ters ilintili davranış gözlenmektedir. Şekil 3.2j'de ise Şekil 3.2g'de gösterilen hmF2 değerlerinin OYF kestirimi ve elde edilen parametreler şekil üzerinde gösterilmiştir.

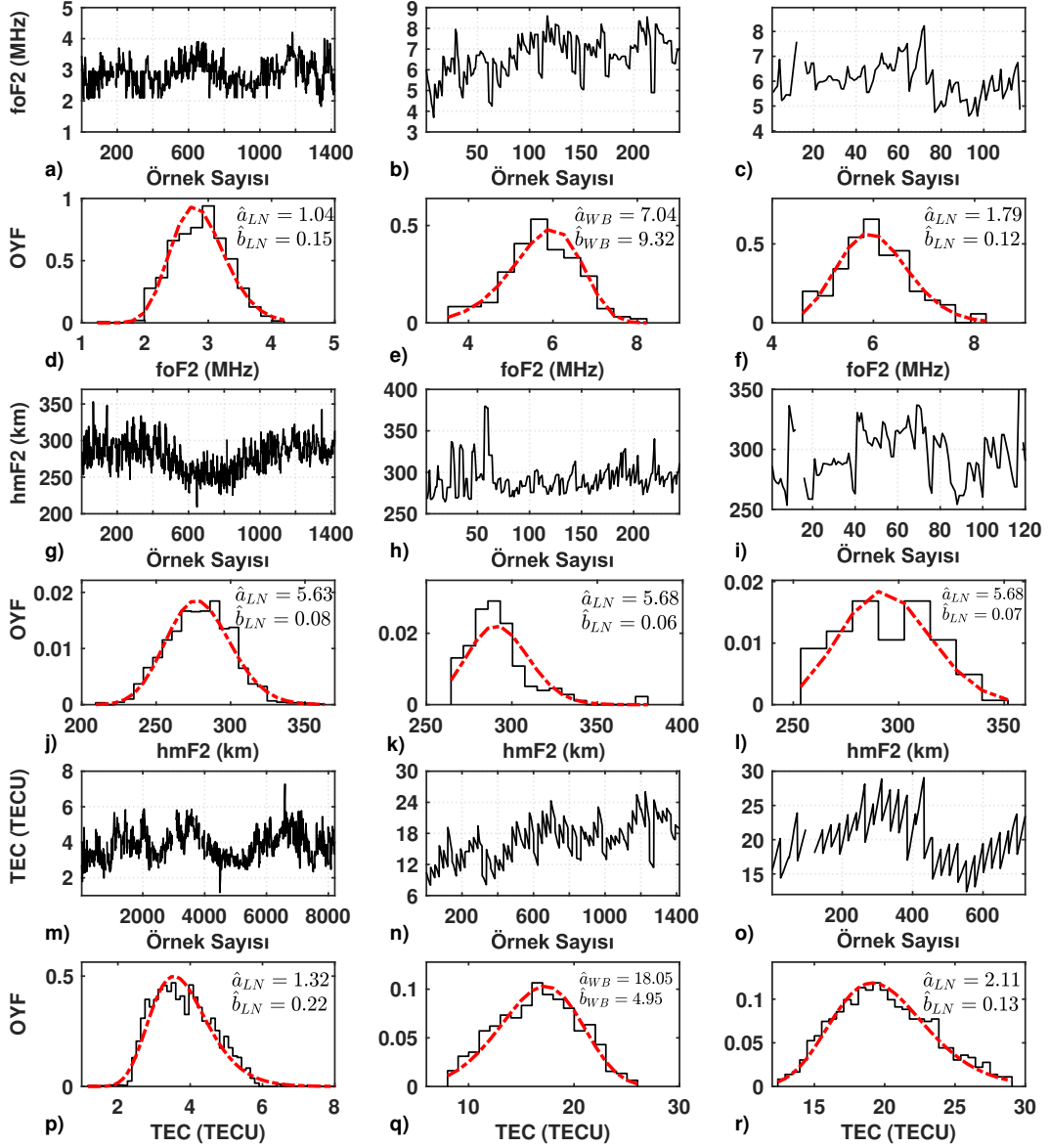
Şekil 3.2h'de daha güneyde PQ052 istasyonu için bahar mevsimi (Mart-Nisan) 2012 yılı ve 1800 – 1900 GS saatleri arasında hmF2 verileri gösterilmiştir. Yaklaşık olarak ilk 70 örnek ile diğer kısım arasında seviye farkı bulunmaktadır. Bu Şekil 3.2k'de gösterilen OYF kestiriminde 400 km'ye yakın kısımda görülmektedir. Buna rağmen Lognormal olarak kestirilen OYF'nin birinci parametresi Şekil 3.2j'de verilen kestirimden yüksek ikinci parametresi ise daha küçüktür.

Şekil 3.2i'de en güneyde RO041 istasyonuna ait 2014 yılı Haziran ayı ve 0400 – 0500 GS saatleri arası hmF2 değerleri gösterilmiştir. Mevsimden aylık veriye geçildiğinde foF2 değerlerinde gözlenene göre belirgin bir seviye artış yoktur. Buna göre Şekil 3.2l'de verilen OYF kestiriminin birinci parametresi Şekil 3.2k'ye göre artmamıştır. Şekil 3.2l'de verilen kestirim yıllık ve mevsimlik kestirimlere benzer olarak Lognormal'dir.

Şekil 3.2m'de JR055'nin 2009 yılı 0200 – 0300 GS saatleri arasında TEİ verileri gösterilmiştir. TEİ verileri ile Şekil 3.2a'da verilen foF2 verileri arasındaki benzer yönseme açıkça görülmektedir. Şekil 3.2p'de yıllık 0200 – 0300 GS saatleri arasında yıllık TEİ verilerinin OYF kestirimi gösterilmiştir.

Şekil 3.2n'de PQ052 istasyonu için bahar mevsimi (Mart-Nisan) 2012 yılı ve 1800 – 1900 GS saatleri arasında TEİ verileri gösterilmiştir. Hem güneyde bulunması hem de güneş etkinliğinin arttığı bir yıl olmasının bir sonucu olarak TEİ değerleri Şekil 3.2m'de verilen değerlere göre 2012 yılında artmıştır. Şekil 3.2b'de verilen değişime benzer olarak Şekil 3.2n'de Mart ayından Nisan ayına gidildikçe TEİ değerleri artmaktadır. Şekil 3.2q'da verilen OYF kestirimi de Şekil 3.2e ile benzer olarak Weibull bulunmuştur.

Şekil 3.2’de son olarak en güneyde RO041 istasyonuna ait 2014 yılı Haziran ayı ve 0400 – 0500 GS saatleri arası TEİ değerleri gösterilmiştir. TEİ değerleri yaklaşık 15 TECU ile 30 TECU arasında değişmektedir. Şekil 3.2’de verilen OYF kestiriminde ise öncelikle aynı istasyon ve zaman aralığı için foF2 verilerinde olduğu gibi TEİ verilerinde de parametrik OYF’nin Lognormal kestirilmiştir. foF2 verilerinden yıllık veriden aylık veri setine gidil-dikçe gözlenen değişim TEİ OYF kestirimlerinde de gözlenmiştir. IONOLAB-PDF yöntemi



Şekil 3.2: foF2, hmF2, ve TEİ örnek verileri birinci, üçüncü ve beşinci satırlar, verilerin deneysel dağılımları (siyah), parametrik OYF kestirimleri (kırmızı kesikli çizgi) ikinci, dördüncü ve altıncı satırlar, birinci sütun JR055 (foF2, hmF2) ve sass (TEİ) 2009 yıllık 0200 – 0300 GS, ikinci sütun PQ052 (foF2, hmF2) ve gope (TEİ) 2012 bahar 1800 – 1900 GS, üçüncü sütun RO041 (foF2, hmF2) ve m0se (TEİ) 2014 Haziran 0400 – 0500 GS.

ile deneysel dağılımlarda gözlenen değişimi takip eden ve istatistiksel özelliklerini gösteren OYF kestirimleri elde edilebilmektedir. İyonküre ölçümlerinin istasyon bazında istatistiksel modelleri güneş etkinliği, uzayda ve zamanda ölçüm noktalarının değişimlerinden kaynaklanan farklılıkları göstermektedir. foF2, TEİ ve hmF2 arasındaki ilişkinin gözlenebilmesi amacı ile parametrik OYF kestirimlerinden hesaplanan momentler kullanılarak parametrik ortalama ve standart sapma kestirimleri karşılaştırılmıştır.

### 3.2 Uzay-Zamanda Yerel İyonküre Ölçümlerinin Yönsemesi

İyonküre ölçümleri yıllık, mevsimlik ve aylık gruplandırılarak IONOLAB-PDF kestirimleri yapılmıştır. Kestirimlerden hesaplanan parametrik ortalama ve standart sapma değerleri kullanılarak istasyonlar hem uzay-zamanda hem de ölçümlerin istatistikleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3.3, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’de 2009 düz çizgi, 2012 kesikli çizgi ve 2014 kesikli noktalı çizgiler ile gösterilen, OYF kestirimlerinin saat-içi ortalama ve standart sapma değerleri gösterilmiştir. TEİ ve foF2 arasında güçlü bir pozitif ilinti, foF2 ile hmF2 arasında ters ilinti vardır. Parametrik ortalamalarda güneş etkinliğinin artması tüm saatlerde seviye artışına sebep olmaktadır. Konumda güneye gidildikçe parametrik ortalamalar foF2 ve TEİ için yükselirken standart sapma değerleri daha çok güneş etkinliği ve saatlere bağlı olarak değişmektedir.

Şekil 3.3a’da en kuzeyde bulunan JR055 iyonosondası ve sss GPS alıcısı için foF2’da 1600 GS saati dolaylarında TEİ’de gözlenmeyen bir dalgalanma gözlenmiştir. F2 katmanının ölçümlerine daha hassas olan iyonosonda ölçümlerinin iyonlaşmada yaşanan değişimlerden etkilenmiştir. Yıllara göre değişim incelendiğinde güneş etkinliğinin en az olduğu 2009’da en yüksek saat 1100 GS etrafında 5.11 MHz olurken TEİ en yüksek 8.3 TECU olarak bulunmuştur. 2012 ve 2014 yıllarında ise foF2 aynı saatte sırasıyla %2 ve %4 artmıştır. Bu artışlar TEİ için sırasıyla %13 ve %24’tür. Artış miktarları kendi içinde ve birbirleri ile orantılıdır. Şekil 3.3b’de verilen parametrik standart sapma değerleri güneşin doğuş ve batış zamanlarında iyonküre etkinliğinin artması ile birlikte artış göstermektedir. Bu durum hem foF2 hem de TEİ standart sapmalarında benzer yönde değişimler gözlenmektedir. Standart sapmanın seviyeleri açısından TEİ daha az eğimle değişirken foF2 değişimlerinin eğimi daha fazladır. Gün içinde 1800 GS saatlerinde en yüksek 1.3 MHz standart sapma gözlenmiştir. Bu değer TEİ için tüm saatlerde 3 TECU’nun altındadır.

Şekil 3.3c’de foF2 ve hmF2 verilerinden elde edilen parametrik ortalamalara yer verilmiştir. hmF2 ortalamaları güneş etkinliğinin artması ile azalmakta fakat yıllara göre değişim Şekil 3.3c kırmızı çizgilerle ifade edilen eğrilerde belirtildiği gibi foF2’ya oranla daha azdır. Şekil 3.3d’de foF2 ve hmf2 parametrik standart sapmaları güneşin doğuşu ve batışı sırasında gözlenen artış hmF2’da standart sapmasında da gözlenmektedir. Güneş etkinliğinin en yüksek olduğu 2014 yılında en fazla değişen standart sapma değerlerinde gece ile gündüz saatleri arasında 15 ile 30 km arasında fark bulunmaktadır.

Şekil 3.3e’de daha güneyde PQ052 iyonosonda ve gope GPS alıcısı için foF2 ve TEİ parametrik ortalama değerleri güneş etkinliğinin artışı ile birlikte foF2 ve TEİ ortalamaları yükselmiştir. Şekil 3.3a’da JR055 istasyonu foF2’da 1600 saati dolaylarında gözlenen dalgalanma PQ052’de görülmemektedir. Konumda güneye inildikçe güneşin etkisini artırması ile beraber küçük ölçekli sayılabilecek değişimler etkisini kaybetmektedir. Yıllara göre değişim incelendiğinde güneş etkinliğinin en az olduğu 2009 yılında öğle saatlerinde en yüksek 7.41 MHz, TEİ en yüksek 26.79 TECU’dur. foF2’da 2012 ve 2014 yıllarında artış sırasıyla %4 ve %8, TEİ’de ise artış sırasıyla %13 ve %17’dir. Yıllara göre artış güneydeki istasyonda kuzeye göre daha azdır. Öte yandan aynı yıl için artış kuzeyde bulunan JR055 istasyonu ile karşılaştırıldığında foF2’nun %45, TEİ’nin ise iki katından daha fazla artmıştır.

Şekil 3.3f’de verilen parametrik standart sapma değerleri kuzeyde bulunan JR055 istasyonunun davranışı ile benzer olarak güneşin doğuş ve batış zamanlarında iyonküre etkinliği ile yükselmiştir. Kuzeyde bulunan istasyon ile karşılaştırıldığında ise gün içindeki standart sapma değişimi foF2 için yaklaşık olarak 0.9 MHz’dan 1.2 MHz’e TEİ için de 3 TECU’dan 8.2 TECU’ya yükselmiştir. Gün içindeki standart sapmanın gün içinde değişim yönsemesi benzer olup güneydeki istasyonda genliği daha fazladır.

Şekil 3.3g’de JR055 ile PQ052 istasyonuna ait ortalamaların birbiri ile ters ilintili olduğu açıkça görülmektedir. Kuzeyde bulunan istasyona göre gün içindeki hmF2 değişimi hem genlik hem de dinamik aralık olarak atmıştır. JR055 istasyonunda 0600 – 1400 GS saatleri arasında 200 km dolaylarında görülen ortalama PQ052 istasyonunda aynı saatlerde yaklaşık 250 km’ye yükselmiştir. Şekil 3.3h’de foF2 ve hmf2 parametrik standart sapmalar karşılaştırıldığında 0600 – 1600 GS saatleri arasında foF2 standart sapması belirli bir seviyede kalırken hmF2 standart sapması azalma eğilimindedir. Fakat 1600 saatinden sonra benzer davranış gösteren değerler 15 km ile 30 km arasında değişmektedir.

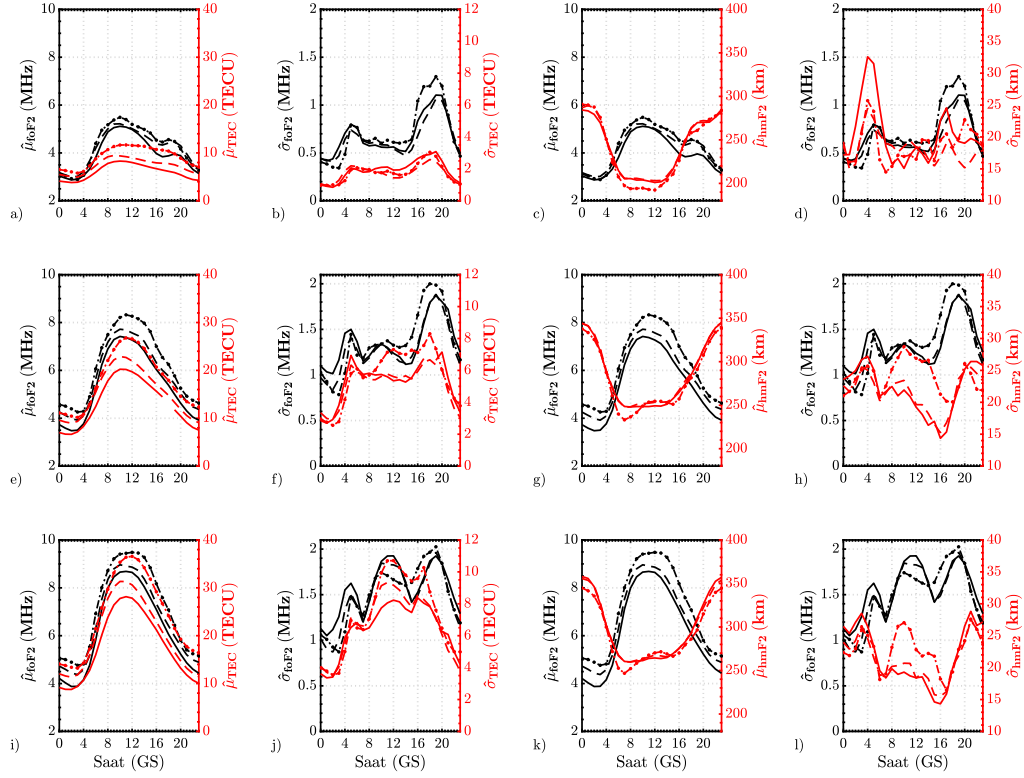


Şekil 3.3i’de en güneydeki RO041 iyonosonda ve m0se GPS alıcısı için foF2 ve TEİ parametrik ortalama değerleri güneş etkinliğinin artışı ile birlikte foF2 ve TEİ diğer daha kuzeydeki iki istasyon ile benzer şekilde ortalamaları da artmıştır. 2014 yılı öğle saatlerinde foF2 en yüksek 9.44 MHz gün içinde en az 4.76 MHz değerindedir. Bu değer aralığı kuzeyde bulunan istasyonlar ile seviye olarak farklı olsa da gün içinde birbirine göre değişim benzer orandadır. Bu durum istasyonların gün içinde değişimlerinin eğimlerinin benzer olmasının ama seviyelerinin farklı olmasının bir sonucudur. Şekil 3.3j’de verilen standart sapma değişimlerinde ise kuzeydeki istasyonlarda bu kadar belirgin olmayan öğle saatlerinde standart sapma hem foF2 hem de TEİ’de artmıştır. 1100 – 1300 GS saatlerinde gözlenen artış güneşin doğuşu ve batışı zamanlarında gözlenen değerlere kadar yükselmiştir. En güneyde güneşin en fazla etkilediği istasyonda gözlenen bu durum farklı mevsimlerin etkileri sebebi ile gözlenmektedir.

Şekil 3.3k’de foF2 ve hmF2 arasında daha kuzeyde bulunan istasyonlardaki ters ilinti gözlenmektedir. Şekil 3.3l’de verilen parametrik standart sapma değerleri incelendiğinde kuzeyde bulunan istasyonlar ile benzer olarak güneşin doğuş ve batış zamanlarında iyonküre etkinliği ile artmaktadır. foF2 kuzeyden güneye inildikçe standart sapma seviyesi artarken hmF2 standart sapma seviyeleri gün içinde benzer davranış göstermektedir.

IONOLAB-PDF ile elde edilen iyonküre ölçümlerinin parametrik ortalama ve parametrik standart sapma kestirimleri uzayda ve zamanda yıllık veriler üzerinden iyonküre yönsemelerini göstermiştir. Yönsemelerin istasyonlar arasında ve ölçümler arasındaki benzerlik ve farklılıkları yıllık olarak fiziksel değişimleri takip etmektedir. Uzay-zamanda yıllık veriler üzerinde aynı yönde ve eğimde değişimler görülmektedir. Şekil 3.4’de yaz mevsimi foF2, TEİ ve hmF2 verilerinden elde edilen OYF kestirimlerinin saat-içi ortalama ve standart sapmaları gösterilmiştir. Yaz mevsiminde de yıllık verilerde görülen foF2 ve TEİ’nin pozitif, foF2 ve hmF2’nun negatif ilintili davranışı bulunmaktadır. Yaz mevsiminde foF2 ve TEİ’nin gündüz saatlerinde yükseldiği değerlerin daha fazlasına güneş batışı saatlerinden sonra da ulaşması önemlidir. Literatürde Orta Enlem Gece Yaz Aykırılığı olarak rapor edilen davranış mevsimsel yönsemelerde ortaya çıkmıştır [100].

Şekil 3.4a incelendiğinde 1800 – 2000 GS saatleri arasında gözlenen değerler öğle saatlerinin üzerinde çıkmıştır. 2014 yılında en yüksek değerini 5.72 MHz ve 2012 yılında aynı saatte yaklaşık %10 azalarak en yüksek 5.36 MHz ve 2009 yılında da %10 azalarak 5.03 MHz ola-



Şekil 3.3: Yıllık veriler üzerinden saat-içi parametrik OYF ortalaması  $\hat{\mu}$  ve standart sapma  $\hat{\sigma}$  kestirimleri: foF2 (siyah), hmF2 ve TEİ (kırmızı), 2009 (düz çizgi), 2012 (kesikli çizgi), 2014 (kesikli noktalı), birinci satır: JR, ikinci: PQ ve üçüncü satır: RO.

rak bulunmuştur. Yıllara göre değişim diğer istasyonlarda da benzer artışadır. Şekil 3.4b’de verilen standart sapma değerleri incelendiğinde Şekil 3.3b’de verilen yıllık standart sapmalarda gözlenen yükseliş yaz mevsiminde gözlenmemiştir. Standart sapmada gözlenen yıllara göre mevsimsel farklılıklar diğer mevsimlerde yaşanan değişimlerden kaynaklanmaktadır.

Şekil 3.4c’de foF2 ve hmF2 parametrik ortalama kestirimleri karşılaştırılmıştır. Şekil 3.3c’de yıllık verilerin parametrik ortalamalarında gözlenmeyen 1800 – 2000 GS saatleri arasında bir tepe noktası bulunmaktadır. Bu tepe noktasının da Orta Enlem Gece Yaz Aykırılığı kaynaklı olduğu söylenebilir. Şekil 3.4d’de foF2 ve hmF2 standart sapma değerleri arasında belirgin bir ilinti gözlenmemiştir. Öte yandan yıllık standart sapma değerlerinin yönseme davranışlarının benzer olduğu gözlenmiştir. Standart sapmanın gün içindeki dinamik aralığı Şekil 3.3d’de verilen yıllık standart sapmadan azdır.

Şekil 3.4e’de PQ052 ve gope için parametrik ortalama kestirimleri verilmiştir. JR055 istasyonu ile benzer şekilde 1800 – 2000 GS saatleri çevresinde örnek olarak 2014 yılı için 7.96

MHz'dir. Bu değer aynı saat ve yıl için kuzeydeki JR055 istasyonundan %40 daha fazladır. Şekil 3.4f'de foF2 ve TEİ'nin saat-içi standart sapma değerleri güneşin doğuşu zamanında artmakta ve 2000 GS saatlerine kadar dalgalanma gözlenirse de bu sınırlı kalmaktadır.

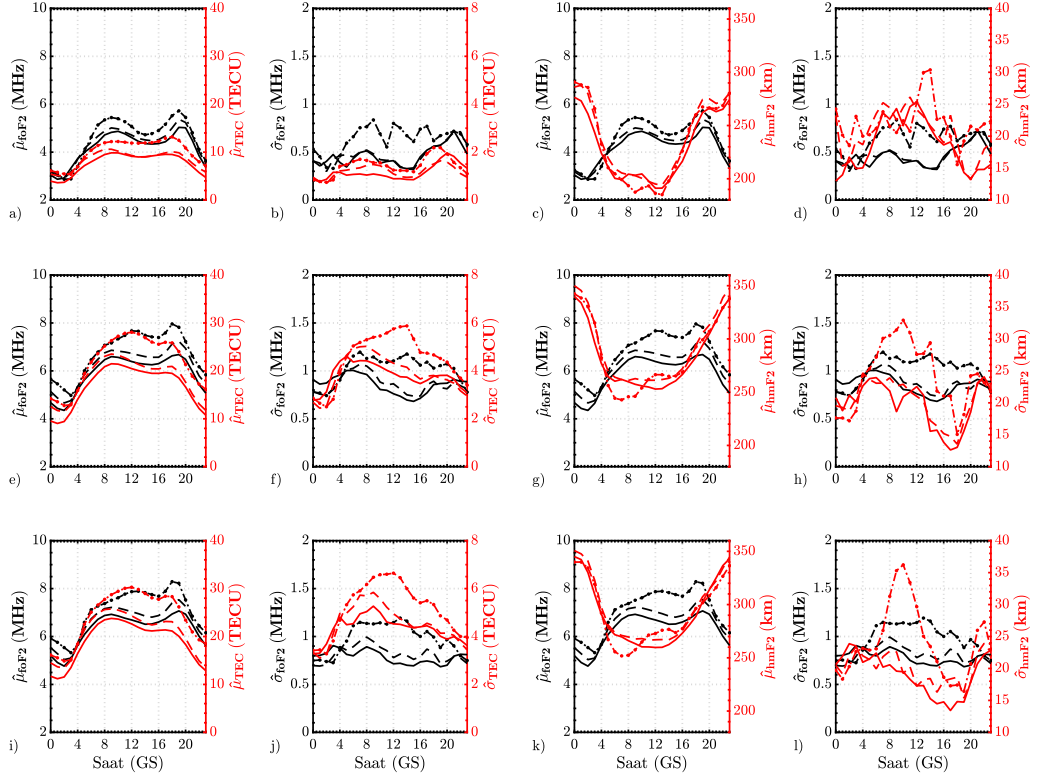
Şekil 3.4g'de verilen foF2 ve hmF2 parametrik ortalamaları Şekil 3.4c'de daha kuzeydeki istasyondan elde edilenler ile benzerdir. Güneye gidildikçe ortaya çıkan fark, yıllık analizlerde olduğu gibi seviye olarak 50 km artışla sınırlıdır. Şekil 3.4h'de verilen standart sapma değerleri ise hmF2'da yıllık standart sapma ile benzerdir.

Şekil 3.4i'de en güneyde bulunan RO041 ve m0se istasyonu parametrik ortalama değeri foF2 için en güneydeki istasyonda 2009 yılında 6.94 MHz ve sırasıyla 2012 ve 2014 yıllarında 7.39 ve 8.28 MHz'dir. PQ052 istasyonundan elde edilen değerler ile yakın fakat en kuzeydeki JR055 istasyonu ile yaklaşık %40 daha fazladır.

Şekil 3.4j'de TEİ standart sapma değerleri öğle saatlerinde en yüksek seviyeye ulaşırken foF2 standart sapma değerleri güneşin doğuşu ve batışı saatleri arasında benzer seviyelerde fakat dalgalanma gözlenmektedir. Şekil 3.4k'de hmF2 ortalama ve Şekil 3.4l'de hmF2 standart sapma kuzeyde bulunan PQ052 ve JR055 ile benzer seviyededir. Yıllık verilerde gözleendiği gibi mevsimlik verilerde de IONOLAB-PDF ile elde edilen ortalama ve standart sapma kestirimleri iyonküre yönsemelerini göstermiştir. Ayrıca Orta Enlem Gece Yaz Aykırılığı yönseme kestirimlerinde de başarı ile gözlenmiştir.

Mevsimsel analizlerde de verilerin yönsemelerinde farklılıklar gözlenmesi ve iyonküre modellerinde aylık kestirimlerin literatürde daha yaygın kullanılması dikkate alınarak iyonküre ölçümleri aylık gruplandırılmıştır. Bunlara örnek olarak yaz mevsimi içinde ve yaz gün dönümünü içine alan Haziran ayı incelenmiştir. Yıllık veri setinden aylık veri setine gidildikçe genel olarak standart sapmanın dinamik aralığında azalma gözlenmektedir. Şekil 3.5'de Haziran ayı verileri kullanılarak iyonküre ölçümlerinden elde edilen OYF kestirimlerinin saat-içi ortalama ve standart sapma değerleri gösterilmiştir. Şekil 3.5a'da Haziran ayı JR055 ve sass verileri kullanılarak kestirilen saat-içi parametrik ortalamalarında hem TEİ hem de foF2'da güneş etkinliğine göre artmıştır. Öğle saatlerinde gözlenen çukur bölge hem TEİ hem de foF2'da tüm yıllarda gözlenmektedir. Şekil 3.5b'de foF2 üzerinde en fazla değişkenlik 2014 yılındadır.

Şekil 3.5c'de hmF2 ve foF2 arasındaki ters ilinti aylık parametrik ortalama değerleri üzerinde



Şekil 3.4: Yaz mevsiminde elde edilen veriler üzerinden saat-içi parametrik OYF ortalaması  $\hat{\mu}$  ve standart sapma  $\hat{\sigma}$  kestirimleri: foF2 (siyah), hmF2 ve TEİ (kırmızı), 2009 (düz çizgi), 2012 (kesikli çizgi), 2014 (kesikli noktalı), birinci satır: JR055, ikinci: PQ052 ve üçüncü satır: RO041.

de açıkça görülmektedir. Şekil 3.5d'de standart sapma değerleri 2014 yılında en fazladır. Diğer yıllarda ise değişkenlik 10 ile 25 km aralığındadır.

Şekil 3.5e'de daha güneyde bulunan PQ052 ve gope istasyonları için parametrik foF2 ve TEİ ortalamaları gösterilmiştir. Şekil 3.5a'da öğle saatlerinde gözlenen çukur bölge PQ052 istasyonunda daha belirgindir. Şekil 3.5f'de gösterilen standart sapma değerleri hem foF2 hem de TEİ için gündüz saatlerinde artmaktadır. Buna foF2 2009 yılı standart sapması uymamış akşam saatlerine 0.6 MHz dolaylarında sabit bir yönseme göstermiştir.

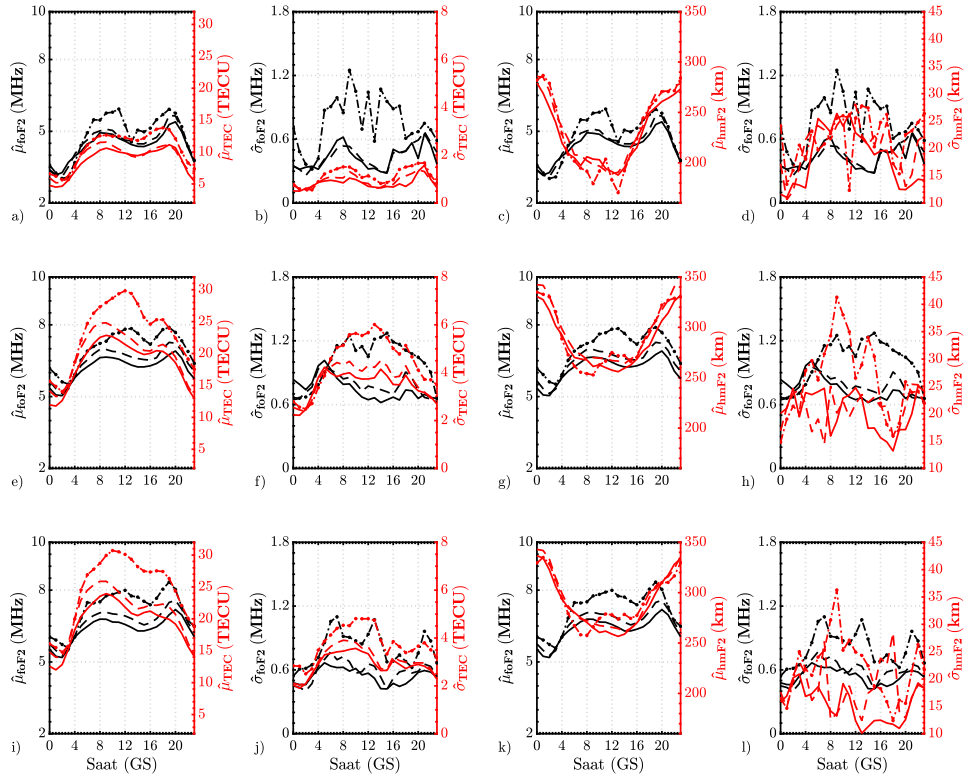
Şekil 3.5g'de diğer yıllar, mevsimlerde olduğu gibi hmF2 ve foF2 ters ilinti bulunmaktadır. Şekil 3.5c'de verilen hmF2 parametrik ortalamalarına göre 50 km artış bu ayda da ortaya çıkmıştır. Şekil 3.5h'de verilen standart sapma değerlerinde belirgin bir yönseme yoktur. En fazla değişkenlik 2014 yılında gözlenmektedir.

Şekil 3.5i'de en güneyde bulunan RO041 ve m0se istasyonlarından elde edilen parametrik or-

talama kestirimleri verilmiştir. Diğer iki istasyonla karşılaştırıldığında en güneyde hem foF2 hem de TEİ seviyeleri artmıştır. Aynı istasyonun yaz mevsimi değerleri ile karşılaştırıldığında ise artış bulunmaktadır. Bu durum aylık analizlerin yıllık ve mevsimlik analize oranla daha gürbüz olduğunu belirtmektedir. Şekil 3.5j'de gösterilen standart sapma değerleri TEİ için gün içinde 5 TECU, foF2 için ise 0.6 MHz'den azdır. Değişkenliğin başarılı bir şekilde takip edilmesinin bir sonucu olarak standart sapma değerleri mevsimlik ve yıllık değerlerine göre daha azdır.

Şekil 3.5k'de hmF2 parametrik ortalama değeri gün içinde 250 km üzerinden 100 km dinamik aralıkta değişmiştir. Şekil 3.5l'de verilen standart sapma değerlerinde hmF2'nun değişkenliği 2009 yılında diğer istasyon ve yıllara göre en azdır.

Şekil 3.3'de verilen yıllık, Şekil 3.4'de verilen mevsimlik ve Şekil 3.5 verilen aylık saat-içi parametrik OYF kestirimlerinin iyonkürenin değişkenliğini diğerlerine göre daha iyi takip ettiği gözlenmiştir. Uzay-zamanda istatistiksel özellikler en iyi aylık saatlik analizlerde ortaya çıkmaktadır. İyonküre değişimlerinin aylık zaman dilimlerinde de farklı davranışlar göste-



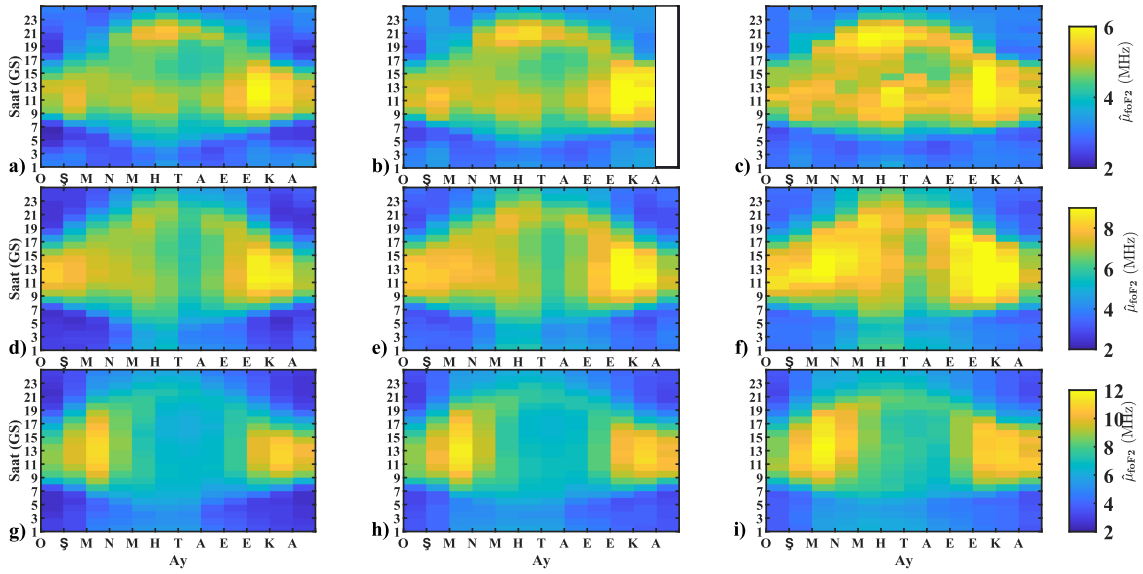
Şekil 3.5: Haziran ayından elde edilen veriler üzerinden saat-içi parametrik OYF ortalaması  $\hat{\mu}$  ve standart sapma  $\hat{\sigma}$  kestirimleri: foF2 (siyah), hmF2 ve TEİ (kırmızı), 2009 (düz çizgi), 2012 (kesikli çizgi), 2014 (kesikli noktalı), birinci satır: JR, ikinci: PQ ve üçüncü satır: RO.

rebilmesi sebebi ile incelenen tüm istasyon ve yılların aylık saat-içi OYF kestirimlerinden aylık saatlik parametrik ortalama ve standart sapma değerleri kestirilmiştir.

Şekil 3.6'da foF2 aylık saat-içi parametrik ortalama değerleri gösterilmiştir. Şekil 3.6a'da en kuzeyde bulunan JR055 istasyonu 2009 yılı parametrik foF2 ortalamaları yıl içinde en yüksek değerini Ekim ayı 0800 – 1500 GS saatleri arasında ve 5 MHz'in üzerinde ortalama değer bulunmuştur. En küçük değerleri aldığı zaman aralığı ise kış ayları Ocak ve Aralık ayında 1900 ve 0600 GS saatleri 2 MHz çevrelerindedir. Yıl içinde 2.12 ve 6.07 MHz aralığında gözlenen foF2 yaz aylarında 0500 GS ile 2100 GS saatleri arasında geniş saat aralığında diğer zaman aralıklarına göre yüksek değerler göstermektedir. Orta Enlem Gece Yaz Aykırılığı da 2000 – 2100 saatleri arasında görülmektedir. Şekil 3.6b'de daha güneyde bulunan PQ052 istasyonu 2009 yılında Aralık ayına ait veri bulunmamaktadır. JR055 ile benzer davranış gösteren bu istasyonda da Orta Enlem Gece Yaz Aykırılığı gözlenmiştir. JR055 istasyonunda 6.07 MHz 1100 – 1200 GS saatinde PQ052'de 6.26 MHz'dir. Kuzeydeki istasyona göre %3 artış bulunmaktadır. Şekil 3.6c'de en güneyde RO041 2009 yılında diğer iki istasyondan daha yüksek değerler vardır. Daha kuzeyde belirgin olarak gözlenmeyen Temmuz ve Ağustos aylarında yaklaşık olarak 1500 – 1700 GS saatleri arasında 1 MHz dolaylarında azalma vardır.

Şekil 3.6d'de JR055 istasyonu 2012 yılına ait parametrik ortalama değerleri gösterilmiştir. 2009 yılına oranla en yüksek değerlerde %40'tan fazla artış bulunmaktadır. En yüksek değerleri Ekim ve devamında Kasım aylarında alan foF2 öğle saatlerinde yüksek 8.73 MHz'e ulaşmıştır. Şekil 3.6e'de PQ052 istasyonu Şekil 3.6d'de verilen istasyona benzer davranıştır. Şekil 3.6f'de ise en güneydeki RO041 istasyonunda artış belirgin şekilde tüm aylardadır. Özellikle Temmuz ayında foF2 2100 GS saati sonrasında da düşmemiştir.

Şekil 3.6g'de güneş etkinliğinin en yüksek olduğu 2014 yılında foF2 11.14 MHz'e kadar yükselmiştir. Ekinoks dönemlerinde belirgin şekilde foF2 en yüksek değerlere öğle saatlerinde ulaşmaktadır. Yaz aylarında ise daha az seviyelerde fakat daha uzun sürelerde foF2 gözlenmektedir. Şekil 3.6h'de PQ052'de 2014 yılı JR055 ile benzerlikle gösterse de Nisan ayında daha yüksek değerler öğle saatlerinde 7.57 MHz gözlenmiştir. Şekil 3.6i'de Nisan ayında artış güneydeki istasyonda açıkça görülmektedir. Bir önceki istasyonun öğle saatinde aldığı değerden %16 artarak 8.75 MHz olmuştur. Şekil 3.7'de foF2 ile ters ilintiye sahip olan hmF2 saat içi aylık parametrik ortalama değerleri gösterilmiştir. Şekil 3.7a'da 2009 yılı



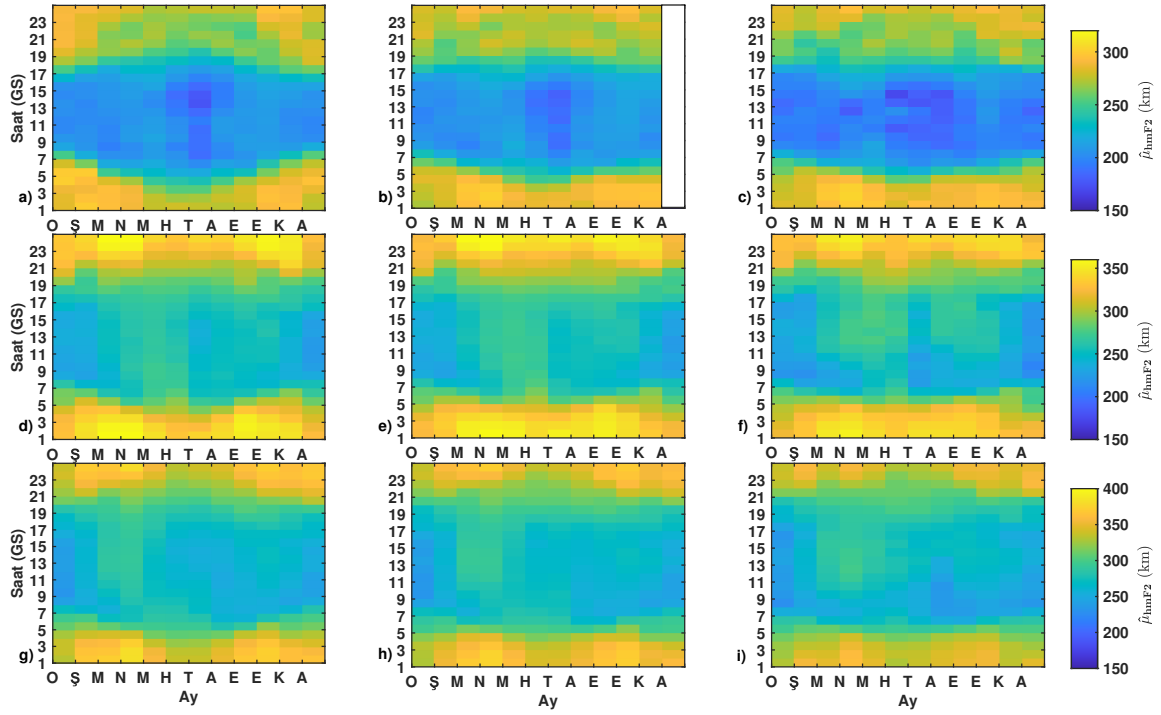
Şekil 3.6: Saat-içi aylık foF2 parametrik OYF ortalama kestirimleri  $\hat{\mu}_{foF2}$ , birinci sütun (a-d-g): JR, ikinci sütun (b-e-h): PQ, üçüncü sütun (c-f-i): RO; birinci satır (a-b-c): 2009, ikinci satır (d-e-f): 2012, üçüncü satır (g-h-i): 2014.

hmF2 parametrik ortalamaları gece saatlerinde güneşin etkisi olmayan zamanlarda artış eğilimindedir. Güneşin etkisini gösterdiği saatlerden itibaren batışına kadar geçen sürede ise foF2 ile ters ilintili olarak azalmaktadır. Kış ve gece saatlerinde 290 km'nin üzerinde çıkan hmF2 Temmuz ayı öğle saatlerinde 175.5 km'ye kadar azalmıştır. Şekil 3.7b'de daha güneydeki PQ052 istasyonunda da JR055 ile benzer davranış gözlenmektedir. Şekil 3.7c'de RO041 istasyonunda da benzer şekilde Temmuz ayında en küçük 189 km'ye kadar azalmıştır. Güneş etkinliğinin az olduğu yılda bir başka bulgu ise Mart ve Nisan aylarında 0000 – 0200 GS saatlerinde yılın diğer tüm ayları ve saatlerinden fazladır.

Şekil 3.7d'de 2012 yılı JR055, hmF2 parametrik ortalamaları 2009 yılına göre 50 km'den fazla artmıştır. Yıl boyunca 0000 – 0400 GS ve 2200 – 2400 GS saatleri arasında güneşin etkisinin yüksek olduğu zamanlarda ise azdır. Şekil 3.7e'de PQ052 istasyonu için elde edilen değerler JR055 istasyonu ile benzerdir. Şekil 3.7f'de RO041 istasyonu Mayıs-Haziran ve Eylül-Ekim aylarında 1100 – 1600 GS saatleri arasında diğer aylara göre %20 daha yüksektir.

Güneş etkinliğinin en yüksek olduğu 2014 yılı için Şekil 3.7g'de verilen JR055, Şekil 3.7h'de verilen PQ052 ve Şekil 3.7i'de RO041 istasyonu parametrik ortalamaları diğer yıllardan gün içinde tüm zaman aralıklarında daha yüksek fakat birbirine benzerdir. İstasyonlar arasındaki

enlem farkının hmF2 parametrik ortalamaları üzerinde belirgin bir etkisi bulunmamaktadır.



Şekil 3.7: Saat-içi aylık hmF2 parametrik OYF ortalama kestirimleri  $\hat{\mu}_{hmF2}$ , birinci sütun (a-d-g): JR, ikinci sütun (b-e-h): PQ, üçüncü sütun (c-f-i): RO; birinci satır (a-b-c): 2009, ikinci satır (d-e-f): 2012, üçüncü satır (g-h-i): 2014.

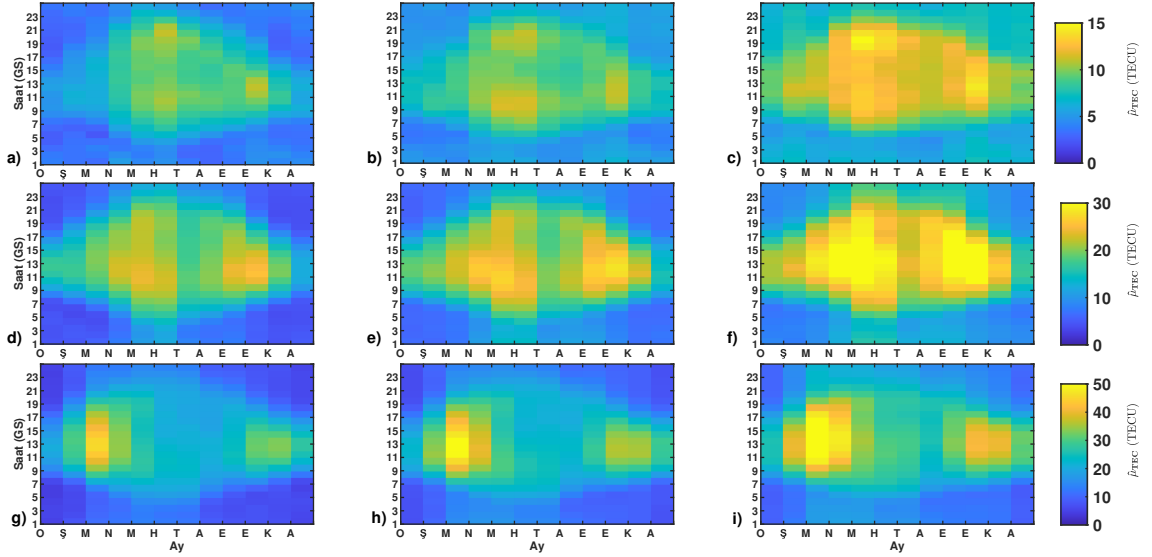
Şekil 3.8'de TEİ aylık saat-içi parametrik ortalama değerleri gösterilmiştir. Şekil 3.8a'da TEİ değerleri yaz aylarında 10 TECU'dan fazla değerlere güneş etkinliğinin az olduğu 2009 yılında ulaşmıştır. Saat açısından değerlendirildiğinde 1100 GS çevresinde artmaya başlayan TEİ yaklaşık olarak 1900 GS saatine kadar yüksek kalmaktadır. Bu durum foF2 verilerinde daha uzun zaman aralıklarında ve daha belirgin gözlenmektedir. Mayıs ve Temmuz ayları arasında yıl içindeki en yüksek seviyelerine ulaşmaktadır. Şekil 3.8b'de verilen PQ052 istasyonunda JR055 ile benzer bir davranış gözlenirken Şekil 3.8c'de verilen RO041 istasyonunda Nisan ayından başlayarak Kasım ayına kadar TEİ seviyeleri özellikle öğle saatlerinde yüksektir. RO041 istasyonunun en güneyde olması sebebi ile TEİ seviyeleri genel olarak yıl içi her gün ve her saatte daha yüksektir.

Şekil 3.8d'de orta seviyeli güneş etkinliği gözlenen 2012 yılına ait en kuzeydeki JR055 parametrik TEİ ortalamaları 2009 yılından farklı olarak Mayıs ayında yükselmeye başlamaktadır. Buna ek olarak Eylül ve Ekim aylarında da öğle saatlerinde 25 TECU'dan yüksektir. 2009 yılına oranla iki kat artış ve saat aralıklarında genişleme gözlenmekle beraber yaz ayları daha



azdır. Şekil 3.8e’de daha güneydeki PQ052 istasyonunda hem TEİ seviyeleri hem de TEİ’nin yükseldiği saat aralıkları genişlemektedir. Şekil 3.8f’de RO041 için TEİ ortalamaları en güneydeki istasyon için en yüksektir. Ayrıca 2009 yılında gözlenen değerlerden seviye olarak %80 yüksek fakat TEİ’nin yüksek olduğu zaman aralıkları benzerdir.

Şekil 3.8g’de 2014 yılı JR055 parametrik TEİ ortalamaları sunulmuştur. Diğer yıllardan farklı olarak gün-tün eşitliği zamanlarını içine alan aylarda öğle saatlerinde TEİ oldukça yüksek değerlerdedir. Aynı yıl ve istasyon için foF2 parametrik ortalamalarında da gözlenen davranış TEİ’de de belirgindir. Şekil 3.8h’de daha güneyde bulunan PQ052 istasyonu ve Şekil 3.8i’de en güneydeki RO041 istasyonu parametrik TEİ ortalamaları benzer yönsemelere sahiptir. RO041 istasyonu Mart Nisan ayları öğle saatlerinde 50 TECU’nun üstünde değerlere sahiptir.



Şekil 3.8: Saat-içi aylık TEİ parametrik OYF ortalama kestirimleri  $\hat{\mu}_{TEC}$ , birinci sütun (a-d-g): JR, ikinci sütun (b-e-h): PQ, üçüncü sütun (c-f-i): RO; birinci satır (a-b-c): 2009, ikinci satır (d-e-f): 2012, üçüncü satır (g-h-i): 2014.

İyonküre ölçümlerinin parametrik ortalamalarına ait aylık saat-içi analizlerden sonra Şekil 3.9’da foF2 saat-içi aylık standart sapma değerleri gösterilmiştir. Şekil 3.9a’da gösterilen foF2 standart sapması yıl içinde günün tüm saatlerinde 0.7 MHz’in altındadır. Yaz aylarında gece saatlerinde artış gözlenirse de güneş etkinliğinin az olduğu 2009 yılı en kuzeydeki JR055 istasyonunda belirgin bir artış bulunmamaktadır. Yaz ayları gece saatlerinde standart sapma Şekil 3.9b’de verilen PQ052 istasyonu daha kuzeydeki istasyondan yüksektir. Şekil 3.9c’de RO041 istasyonunda ise 2009 yılında özellikle Haziran ve Temmuz ayında günün neredeyse

tüm saatlerinde değişkenlik diğer istasyonlara göre yüksektir. Özellikle 0900 – 1500 GS saatleri arasında 0.6 MHz'in üstünde ve en yüksek ise 1.4 MHz'dir.

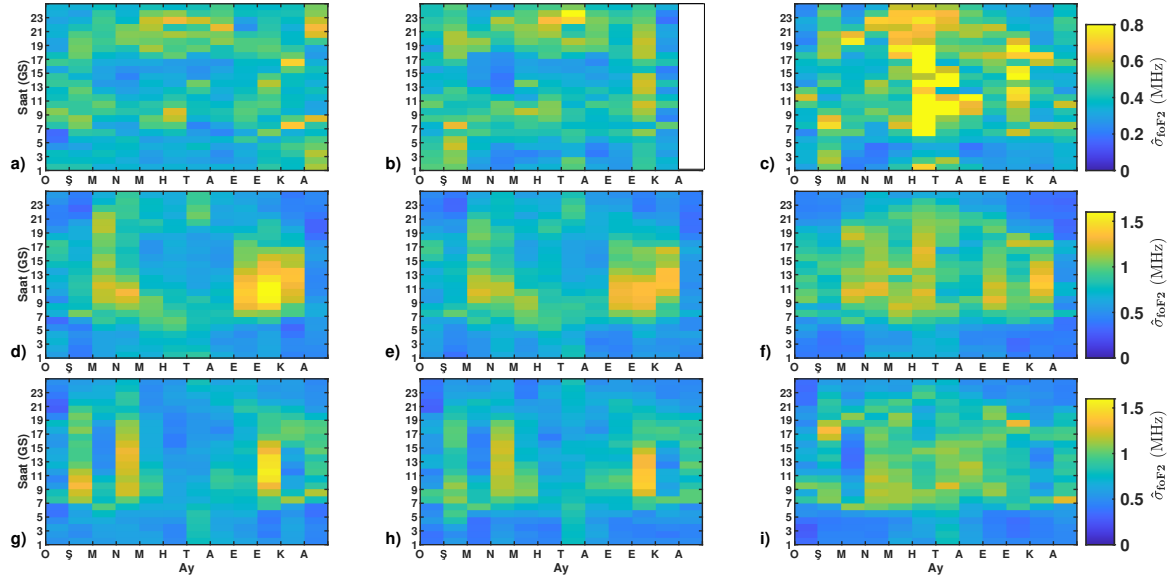
Şekil 3.9d'de 2012 yılında JR055 istasyonu standart sapması Mart-Nisan ve Eylül-Ekim aylarında öğle saatlerinde genellikle 1 MHz'in üzerindedir. Ekinoks aylarını içine alan mevsimlerde iyonküre değişkenliği arttığı için standart sapma değerleri yükselmiştir. Şekil 3.9f'de en güneydeki RO041 istasyonunda standart sapmanın yüksek olduğu zaman aralıkları güneşin etkisinin yüksek olduğu saatlerde gözlenmektedir. Diğer istasyonlara göre yüksek değerler kestirilse de 2012 yılında tüm saat ve aylarda standart sapma değerleri 1.5 MHz'in altındadır.

Şekil 3.9g'de yüksek güneş etkinliği yılı olan 2014 yılı için JR055 istasyonu standart sapma değerleri verilmiştir. Nisan ayında ve Ekim ayında öğle saatlerinde standart sapma yüksektir. Nisan ayında Şekil 3.9h'de de JR055 istasyonuna benzer olarak PQ052 istasyonunda da Nisan ve Ekim aylarında 1.2 MHz değerinin üzerindedir. Şekil 3.9i'de en güneydeki RO041 ve 2014 yılı içinde standart sapma değerleri 1.5 MHz'nun altında sınırlı kalmıştır.

Güneş etkinliğinin az olduğu yıllarda ve kuzey istasyonlarda genellikle 0.7 MHz altında kalmıştır. Güneş etkinliği arttıkça kuzeydeki istasyonlarda ekinoks aylarında artış gözlenirken en güneydeki istasyonda yaklaşık olarak yılın tamamında özellikle gündüz saatlerinde standart sapma yükselmektedir.

Şekil 3.10'da hmF2 saat-içi aylık parametrik standart sapma değerleri verilmiştir. Yıllar ve istasyonlara göre standart sapma değerleri 35 km'nin altındadır. Öğle saatlerinde ve en güneydeki istasyonda standart sapma değerleri yüksektir. Bu durum güneş etkinliğinin artmasından bağımsız olarak enlemde güneye gidildikçe gözlenmektedir. Şekil 3.10a'da kış ve bahar aylarında öğle saatlerinde, yaz aylarında ise gece saatlerinde hmF2 standart sapma daha azdır. Şekil 3.10b'de PQ052 istasyonu da benzer davranıştır. Diğer yandan Şekil 3.10c'de RO041 istasyonu için yaz aylarında gece saatlerinde de hmF2 standart sapması yüksek seviyelerde kalmıştır. Güneş etkinliğinin az olduğu yılda istasyonların parametrik OYF'lerinden elde edilen standart sapma gün içinde 7 ile 35 km arasında sınırlı kalmaktadır.

Şekil 3.10d, Şekil 3.10e ve Şekil 3.10f'de 2012 yılı yaz aylarında ve öğle saatlerinde standart sapmada sınırlı bir artış gözlenmiştir. Bu değerler sırasıyla 27 km, 32 km ve 38 km'dir. Şekil 3.10g'de özellikle kış ayları ve gece saatlerinde hmF2 standart sapma değerleri 35 km sınır seviyelerindedir. Şekil 3.10h'de PQ052 de kış ayları ve gece saatlerinde gözlenen yüksek

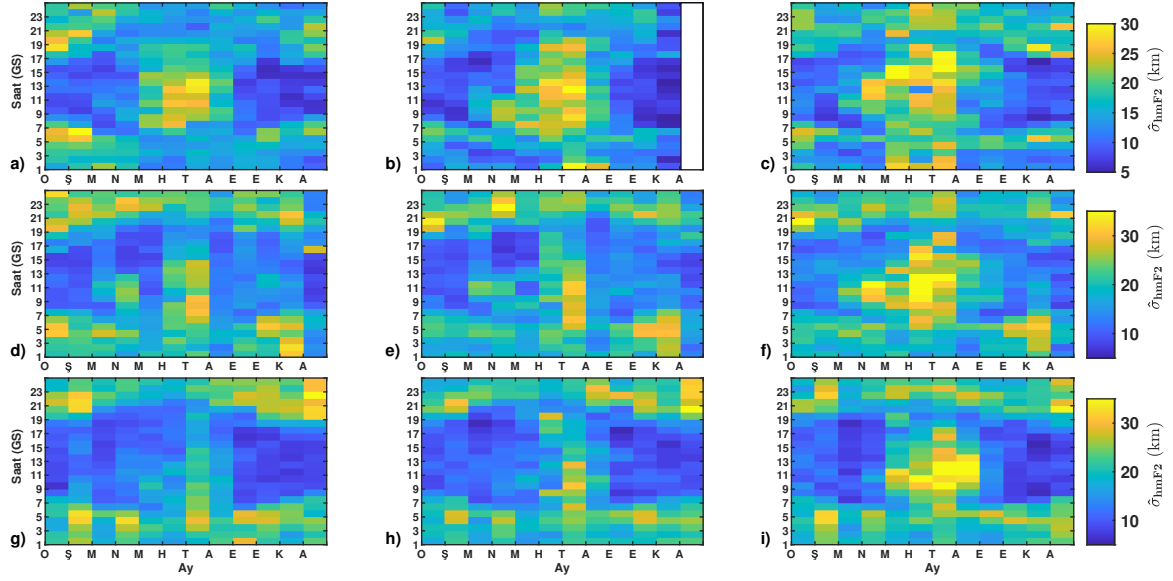


Şekil 3.9: Saat-içi aylık foF2 parametrik OYF standart sapma kestirimleri  $\hat{\sigma}_{foF2}$ , birinci sütun (a-d-g): JR, ikinci sütun (b-e-h): PQ, üçüncü sütun (c-f-i): RO; birinci satır (a-b-c): 2009, ikinci satır (d-e-f): 2012, üçüncü satır (g-h-i): 2014.

değerler azalırken yaz ayları ve öğle saatlerinde artmaktadır. Yaz ayları ve öğle saatlerinde 30 km dolaylarında standart sapma gözlenmiştir. Şekil 3.10i'de ise yaz aylarında başlayan artış en güneydeki RO041 için en yüksek 38 km'ye ulaşmıştır. Güneş etkinliği arttıkça yaz ayları ve öğle saatlerinde kuzeydeki istasyonlarda standart sapma daha azdır. Güneydeki istasyonda güneş etkinliği ile belirgin bir artış bulunmamaktadır.

Şekil 3.11'de TEİ değerleri için kestirilen parametrik standart sapma saat-içi aylık olarak sunulmuştur. Standart sapmanın yıl içinde saat-içi davranışları da foF2 standart sapma ile benzerdir. Şekil 3.11a-c'de 2009 yılında farklı enlemlerde bulunan üç GPS alıcısından elde edilen parametrik standart sapma değerleri 2 TECU'nun altındadır. Şekil 3.11c'de diğer istasyonlardan m0se için artış sınırlıdır. Şekil 3.11d'de 2012 yılı sass istasyonu için parametrik foF2 standart sapma değerlerinde gözlemlendiği gibi Eylül-Kasım ayları arasında öğle saatlerinde TEİ'nin standart sapması 6 TECU'dur.

Şekil 3.11e'de gope istasyonu için ise sass ile benzer yönsemede fakat standart sapma seviyelerinin 1 TECU arttığı gözlenmiştir. Şekil 3.11f'de ise m0se istasyonunda 7.4 TECU'ya çıkan standart sapma Eylül-Kasım aylarında belirgindir. Buna ek olarak Mart ve Haziran aylarında da TEİ standart sapma değerleri artmıştır. Mart ayındaki artışın gün-tün eşitliği Haziran ayında ise Orta Enlem Yaz Aykırılığı kaynaklı olduğu değerlendirilmiştir.

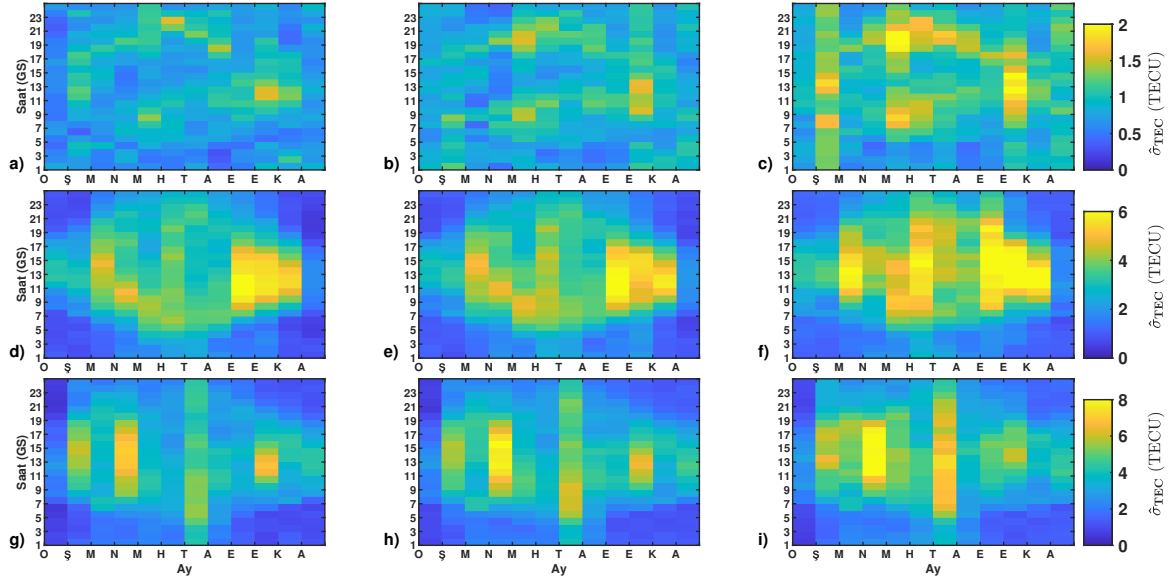


Şekil 3.10: Saat-içi aylık hmF2 parametrik OYF standart sapma kestirimleri  $\hat{\sigma}_{hmF2}$ , birinci sütun (a-d-g): JR, ikinci sütun (b-e-h): PQ, üçüncü sütun (c-f-i): RO; birinci satır (a-b-c): 2009, ikinci satır (d-e-f): 2012, üçüncü satır (g-h-i): 2014.

Şekil 3.11g’de sass istasyonunda Nisan ve Ekim aylarında 1200 – 1400 GS saatleri arasında 6.5 TECU’nun üzerinde standart sapma vardır. Şekil 3.11h’de gope istasyonunda standart sapma Temmuz ayında artış göstermiştir. Şekil 3.11i’de ise Nisan-Temmuz ve Ekim aylarında standart sapma 8 TECU’ya kadar yükselmiştir. Standart sapma 2014 yılı içinde de en yüksek 8.5 TECU çevresindedir. Ortalama değerlerin 50 TECU seviyesinin üzerine çıktığı saatlerde standart sapma da 8.5 TECU’yu geçmemiştir.

İyonküre ölçümlerinin istatistiksel özellikleri saat içinde yıllık, mevsimlik ve aylık analiz edilerek yıl içi ve saat-içi davranışları ile birbirleri arasındaki ilintisi istatistiksel olarak araştırılmıştır. Önceki bölümde tanımlanan foF2 ve TEİ kullanılarak hesaplanmış katman kalınlığının da uzay-zamanda istatistiksel analizleri yapılmıştır. Bu analizler kapsamında katman kalınlığı hesaplanmasında kullanılan TEİ değerleri GPS alıcılarından elde edilmiş, foF2 ölçümleri ise iyonosondalardan elde edilmiştir. Şekil 3.12’de örnek olarak farklı zaman aralıklarında gruplandırılmış katman kalınlığı verisinin deneysel dağılımına uyan en uygun parametrik OYF’ler ve kestirilen parametreler gösterilmiştir. Diğer iyonküre ölçümlerinde olduğu gibi katman kalınlığının OYF kestirimleri de büyük çoğunlukla Lognormal ve Weibull olarak kestirilmiştir.

Şekil 3.12a’da JR055 istasyonu 2012 yılında Haziran ayı 1800 – 1900 GS saatleri arası kat-

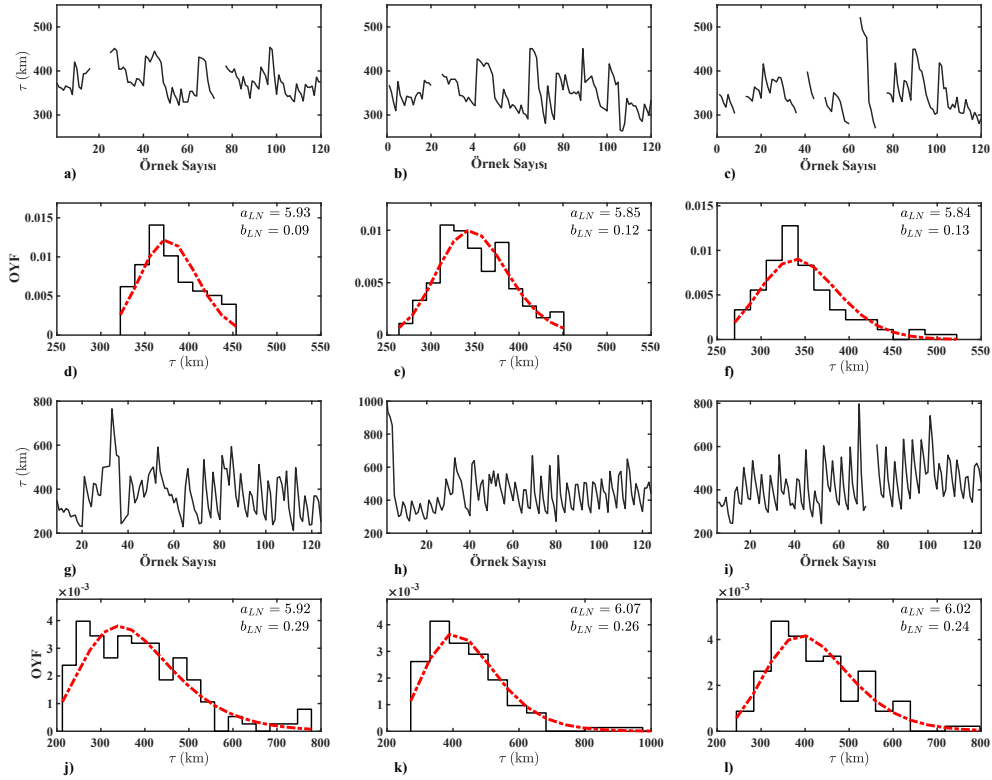


Şekil 3.11: Saat-içi aylık TEİ parametrik OYF standart sapma kestirimleri  $\hat{\sigma}_{TEC}$ , birinci sütun (a-d-g): JR, ikinci sütun (b-e-h): PQ, üçüncü sütun (c-f-i): RO; birinci satır (a-b-c): 2009, ikinci satır (d-e-f): 2012, üçüncü satır (g-h-i): 2014.

man kalınlığı değerleri verilmiştir. Katman kalınlığı değerleri 320 km ile 455 km arasında değişmektedir. Şekil 3.12d’de ise üstte verilen katman kalınlığının deneysel dağılımı ve OYF kestirimi verilmiştir. Deneysel dağılıma en uygun parametrik Lognormal OYF’nin parametreleri şekil üstünde verilmiştir. Şekil 3.12b’de PQ052 istasyonu aynı ay ve saat içinde katman kalınlığı verileri gösterilmiştir. Daha güneydeki PQ052 istasyonunda katman kalınlığının dinamik aralığı genişlemiştir. Şekil 3.12e’de PQ052 için verilen deneysel dağılım ve parametrik OYF kestirimi de Lognormal olarak bulunmuştur. İkinci parametrenin Şekil 3.12d’de verilenden yüksek olması değişkenliğin arttığını göstermektedir. Şekil 3.12c’de en güneyde RO041 istasyonu katman kalınlığı verilmiştir. Katman kalınlığı daha yüksek değerler almıştır. Şekil 3.12f’de verilen parametrik OYF kestiriminde değişkenliğin PQ052’den daha fazla olduğu söylenebilir.

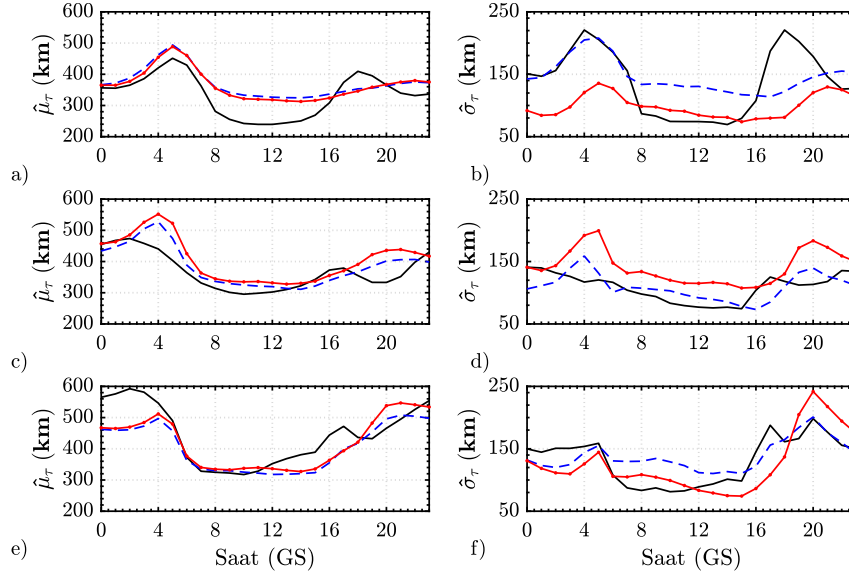
Şekil 3.12g’de JR055 istasyonu 2012 yılında Ekim ayı sabah saatleri 0500 – 0600 GS için katman kalınlığı verileri gösterilmiştir. Bu zaman aralıkları gün-tün eşitliği zamanlarını içine alan değişkenliğin arttığı zamanlardır. Şekil 3.12j’de Şekil 3.12g’de gösterilen katman kalınlığından kestirilen parametrik OYF verilmiştir. İkinci parametre değişkenlik ile paralel olarak yüksek çıkmıştır. Şekil 3.12h’de daha güneyde bulunan PQ052 istasyonu katman kalınlığı aynı saat ve yıl için sunulmuştur. Katman kalınlığının dinamik aralığında artış gözlenmekte-

dir. Şekil 3.12k'de verilen parametrik OYF kestiriminde ise ikinci parametre Şekil 3.12j'de verileden azdır. Şekil 3.12h'de verilen grafikte katman kalınlığı genel olarak 600 km seviyesinin altındadır. Şekil 3.12i'de en güneyde bulunan RO041 istasyonu katman kalınlığı PQ052 ile benzerlik göstermektedir. Şekil 3.12l'de RO041 katman kalınlığı için verilen parametrik OYF kestiriminde Lognormal parametrelerinin her ikisi de PQ052'den daha az bulunmuştur. İyonküre değişkenliğinin yüksek olduğu hem sabah saatleri hem de Ekim ayı için tüm kestirimler Lognormal olarak bulunmuştur.



Şekil 3.12: Katman Kalınlığı OYF kestirimi örnekleri, 1. satır Haziran 2012, 1800-1900 GS ve 3. satır Ekim 2012, 0500-0600 GS verileri, 2. ve 4. satırlar örnek verilerin deneysel dağılımlar (siyah düz çizgi) ve parametrik OYF kestirimleri (kesikli noktalı kırmızı çizgi). Birinci Sütun JR ve sass, ikinci sütun PQ, üçüncü sütun RO.

Şekil 3.13'da 2009 siyah, 2012 mavi ve 2014 kırmızı eğrileri ile veri setlerinden elde edilen OYF kestirimlerinin saat-içi ortalama ve standart sapma değerleri gösterilmiştir. Şekil 3.13a'da JR055 istasyonu saat-içi parametrik ortalaması sunulmuştur. Katman kalınlığı 0800 – 1600 GS saatleri arasında azalmaktadır. 2012 ve 2014 yıllarında 320 km çevresinde gözlenirken 2009 yılında 250 km'nin altına düşmüştür. Ayrıca yıllık olarak bakıldığında 2009 da daha fazla olmak üzere 0500 GS ve 1800 GS saatleri etrafında artmaktadır. Şe-



Şekil 3.13: Yıllık veriler üzerinden  $\tau$  saat-içi parametrik OYF ortalaması  $\hat{\mu}$  ve standart sapma  $\hat{\sigma}$  kestirimleri: 2009 (düz çizgi), 2012 (kesikli çizgi), 2014 (kesikli noktalı), birinci satır: JR, ikinci: PQ ve üçüncü satır: RO.

Şekil 3.13b’de JR055 istasyonu parametrik standart sapma verilmiştir. Şekil 3.13a ile benzer olarak 0500 GS ve 1800 GS saatleri etrafında artan standart sapma en yüksek 230 km değerlerine 2009 ve 2012 yıllarında ulaşmıştır. 0800 – 1600 GS saatleri arasında diğer saatlere göre daha az ve göreceli olarak sabit seviyelerde kalmıştır.

Şekil 3.13c’de daha güneyde olan PQ052 istasyonu her üç yılda da gözlenen saat-içi değerler birbirine yaklaşmıştır. JR055 istasyonuna göre 2009 yılında tepe noktaları kaybolmuş fakat 2012 ve 2014 yıllarında gözlenmiştir. Şekil 3.13d’de verilen parametrik standart sapma değerlerinin dinamik aralığı JR055 istasyonuna göre daha azdır. 2014 yılında 0500 GS ve 1900 GS saatleri etrafında en yüksek 220 km’ye çıkmıştır. 0800 – 1600 GS saatleri arasında ise 2009 ve 2012 yıllarında katman kalınlığının standart sapması 100 km altındadır.

Şekil 3.13e’de en güneyde bulunan RO041 istasyonu katman kalınlığı parametrik ortalama değerleri gösterilmiştir. RO041 istasyonda yıllık verilerde gece saatlerinde katman kalınlığının 450 km üzerine çıktığı gözlenmiştir. Bu değerler gündüz saatlerinde de 300 km’nin altına inmemektedir. Şekil 3.13f’de verilen parametrik standart sapma değerlerinde ise gece 2000 GS saatinde her üç yıl içinde tepe noktası bulunmaktadır. Bu tepe noktası 2014 yılı için 250 km’ye ulaşmıştır.

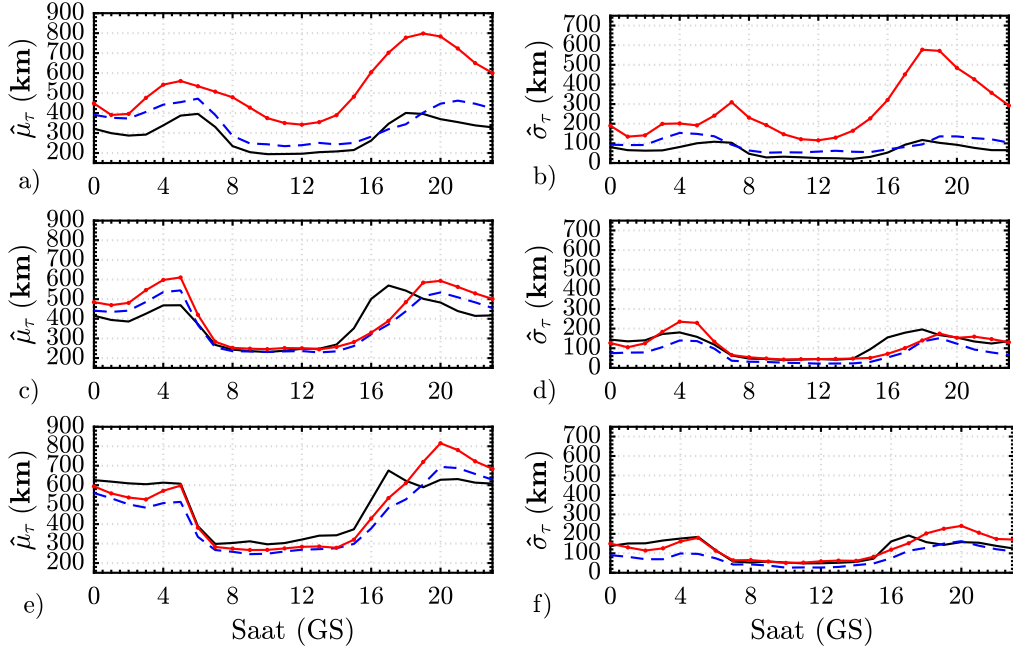
Şekil 3.14'de kış mevsimi için parametrik OYF kestirimlerinden elde edilen ortalama ve standart sapma değerleri verilmiştir. Şekil 3.14a'da JR055 istasyonu saat-içi parametrik ortalaması sunulmuştur. 0800 – 1600 GS saatleri arasında katman kalınlığının parametrik ortalaması 2009 ve 2012 yıllarında yakın değerler almasına rağmen 2014 yılında belirtilen saat aralıklarında 100 km'den fazla artmıştır. 2014 yılında 1800 GS saatlerinde 800 km değerine ulaşmıştır. Bu değer Şekil 3.13'de verilen yıllık ortalama gözlenmemiştir. Bunun sebebi diğer ay ve mevsimlerden gelen etkenlerin ortalamasının azalmasına sebep olmasıdır. Bu durum iyonküre de yaşanan mevsimsel değişimlerin çok farklı seviyelere ulaşabildiğinin bir göstergesidir. Şekil 3.14b'de verilen parametrik standart sapma 3.14a'da verilen zaman aralığına benzer olarak 2014 yılında 1800 GS etrafında 600 km'ye kadar artmıştır. 2009 ve 2012 yıllarında saat-içi standart sapma değerleri günün tüm saatlerinde 150 km altında kalmıştır.

Şekil 3.14c'de daha güneyde olan PQ053 istasyonu parametrik ortalaması 0800 – 1600 GS saatleri arasında bir plato bölgesinde 200 km etrafında kalmıştır. Güneş etkinliğine göre seçilen üç yılda da sınırlı değerler gözlenmiş en yüksek değerler 2014 yılında 0500 ve 1800 saatlerinde gözlenmiştir. 3.14d'de standart sapma değerleri ise 0800 – 1600 GS saatleri arasında 30 km'ye kadar azalmış ve belirli bir bant içinde değişmiştir.

Şekil 3.14e'de en güneyde RO041 istasyonu parametrik ortalamaları 1800 GS saatlerinden sonra farklılaşmış diğer saatlerde ise her üç yıl için belirli bir bant içinde değişmiştir. Şekil 3.14f'de verilen standart sapma değerleri Şekil 3.14d'de verilenlerden daha azdır. Özellikle 0800 – 1600 GS saatleri arasında 30 km altında standart sapma gözlenmiştir.

Yıllık, mevsimlik analizler de gözlenen değişimlerin aylık olarak farklılıklar içermesinden dolayı diğer iyonküre ölçümleri gibi katman kalınlığı da aylık saat-içi istatistiksel olarak incelenmiştir. Şekil 3.15'de Haziran ayı verilerinden elde edilen parametrik OYF kestirimlerinin ortalama ve standart sapma değerleri sunulmuştur. Parametrik ortalama değerleri tüm istasyonlar ve tüm yıllar için 0800 – 1600 GS saatleri arasında 400 km dolaylarında değişmektedir. Buna ek olarak standart sapma değerleri ise tüm istasyonlar ve tüm yıllarda aynı saatlerde 100 km etrafında değerler göstermiştir. Şekil 3.15a'da en kuzeyde bulunan JR055 istasyonu parametrik ortalama ve Şekil 3.15b'de parametrik standart sapma değerleri verilmiştir. 2012 ve 2014 yılları ortalama benzer yönsemelere sahip olmuştur. 2009 ve 2012 yılı standart sapma değerleri Şekil 3.15b'de 0600 GS saatine kadar farklı davranıştır.



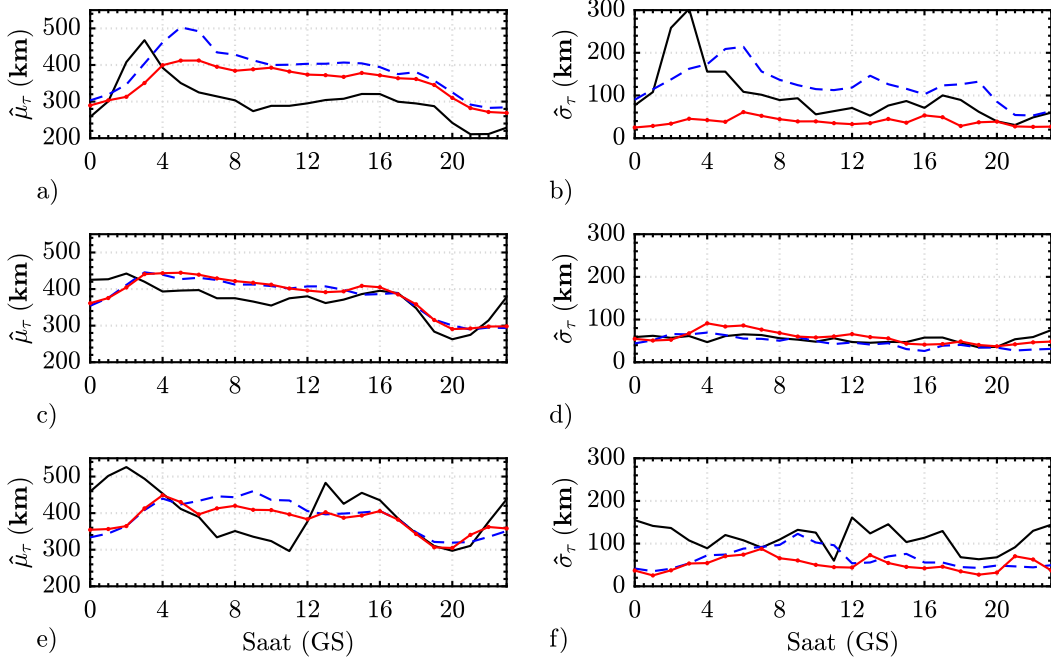


Şekil 3.14: Kış mevsiminden elde edilen veriler üzerinden  $\tau$  saat-içi parametrik OYF ortalaması  $\hat{\mu}$  ve standart sapma  $\hat{\sigma}$  kestirimleri: 2009 (düz çizgi), 2012 (kesikli çizgi), 2014 (kesikli noktalı), birinci satır: JR, ikinci: PQ ve üçüncü satır: RO.

Şekil 3.15c'de PQ052 istasyonu için gösterilen parametrik ortalama 2012 ve 2014 yılları birbirine günün tüm saatlerinde çok yakındır. Tüm yıllarda en yüksek 450 km gözlenmiştir. Şekil 3.15d'de tüm yıllarda standart sapma 100 km altında ve sınırlıdır.

Şekil 3.15e'de en güneydeki RO041 istasyonu parametrik ortalama değerleri Şekil 3.15c'de PQ052 için verilen şekile benzer olarak 2012 ve 2014 çok benzer davranmış 2009 yılında ise özellikle günün ilk yarısında farklılaşmıştır. Şekil 3.15f'de verilen standart sapma 2009 yılı farklı davranmasına rağmen 2012 ve 2014 yıllarında sadece 0800 – 1000 GS saatleri arasında 100 km üzerine çıkmıştır.

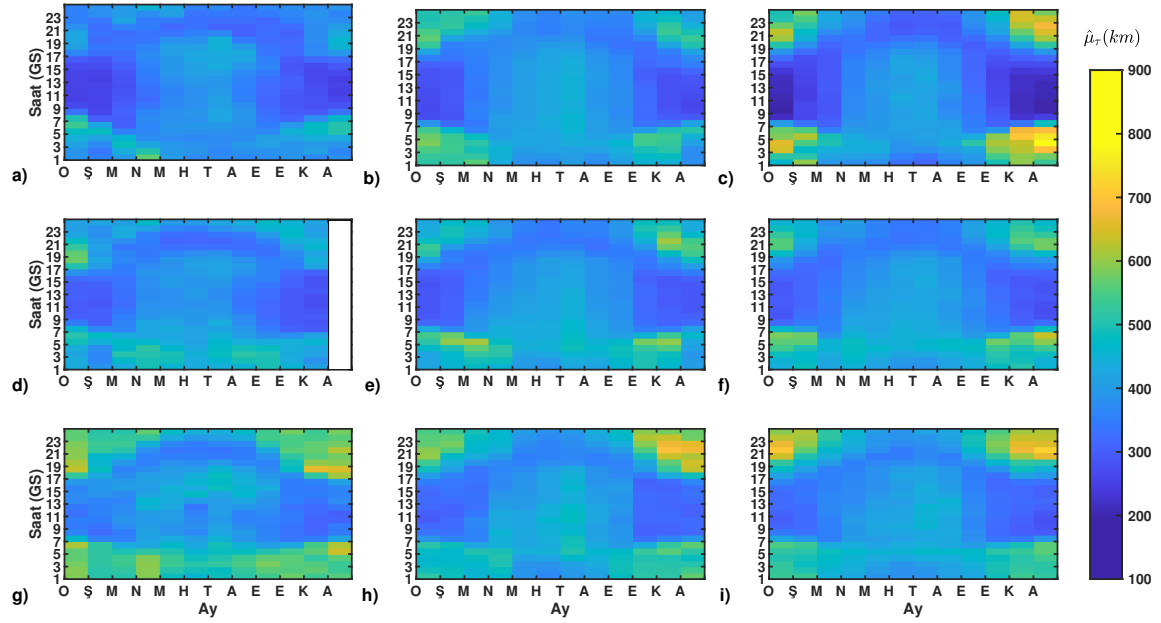
Aylık saatlik inceleme sonucunda standart sapma değerlerinin sınırlı ve benzer seviyelerde kalmasına ek olarak yıllık ve mevsimlik incelemelerde ortaya çıkmayan durumların gözlenmesi iyonküre incelemelerinin aylık saatlik yapılmasının önemini ortaya koymaktadır. Şekil 3.16'da aylık ve saatlik parametrik ortalama ve Şekil 3.17'de aylık saatlik standart sapma değerleri katman kalınlığı için incelenen tüm yıllar ve istasyonlarda gösterilmiştir. Aylık saatlik parametrik ortalama değerleri tüm istasyonlar ve tüm yıllarda 900 km'nin üzerine çıkmamaktadır. Şekil 3.16'da verilen değerlerin hepsinde ay ve saat içinde gözlenen değişimler benzer yönsemelere sahiptir.



Şekil 3.15: Haziran ayından elde edilen veriler üzerinden  $\tau$  saat-içi parametrik OYF ortalaması  $\hat{\mu}$  ve standart sapma  $\hat{\sigma}$  kestirimleri: 2009 (düz çizgi), 2012 (kesikli çizgi), 2014 (kesikli noktalı), birinci satır: JR, ikinci: PQ ve üçüncü satır: RO.

Şekil 3.16a'da JR055 istasyonu 2009 yılı saat-içi aylık parametrik ortalamaları sunulmuştur. Kış aylarında ve öğle saatlerinde 200 km seviyesine kadar azalan katman kalınlığı ortalamaları gece saatlerinde yükselmektedir. Buna ek olarak yaz aylarında öğle saatlerinde de yaklaşık 100 km artış vardır. Şekil 3.16b'de daha güneydeki PQ052 istasyonunda kış ayları gece saatlerinde katman kalınlığı daha yüksektir. Şekil 3.16c'de ise en güneydeki istasyon olan RO041'de gece saatlerinde ve kış aylarında 800 km'ye kadar yükselen katman kalınlığı ortalaması bulunmaktadır. Enlemde kuzeyden güneye gidildikçe kış aylarında katman kalınlığı değerlerinin gün içindeki dinamik aralığı artmaktadır.

Şekil 3.16d'de 2012 yılında ait JR055 istasyonu parametrik ortalama değerleri verilmiştir. Aralık ayında veri bulunmayan istasyonun kış aylarında ve gece saatlerinde artışı 2009 yılına benzer olup seviyeleri daha yüksektir. Diğer yandan yaz ayları ve öğle vakitlerinde katman kalınlığının parametrik ortalama seviyesi benzerdir. Şekil 3.16e'de PQ052 istasyonu parametrik ortalaması yaz aylarında daha yavaş değişmekle birlikte diğer aylarda özellikle güneşin doğuşu ve batışı zamanlarında artmıştır. Şekil 3.16f'de verilen RO041 istasyonu için parametrik ortalama enlemde güneye gidildikçe yükselmiştir.



Şekil 3.16: Saat-içi aylık  $\tau$  parametrik OYF ortalama kestirimleri  $\hat{\mu}_\tau$ , birinci sütun (a-d-g): JR, ikinci sütun (b-e-h): PQ, üçüncü sütun (c-f-i): RO; birinci satır (a-b-c): 2009, ikinci satır (d-e-f): 2012, üçüncü satır (g-h-i): 2014.

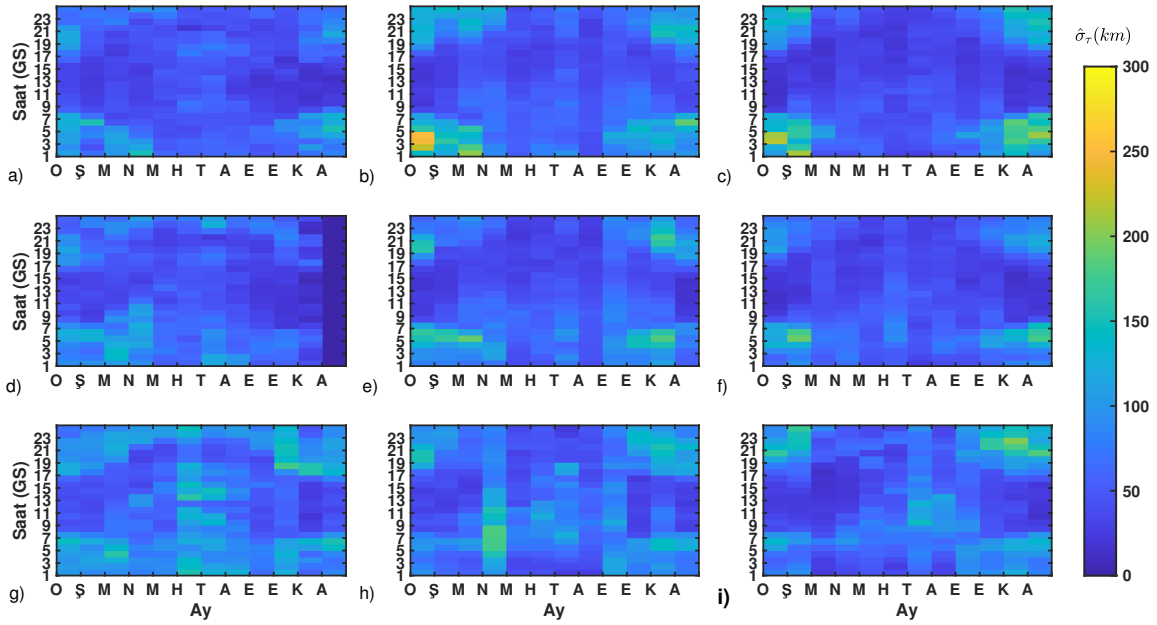
Şekil 3.16g’de güneş etkinliğinin en yüksek olduğu 2014 yılında JR055 istasyonu için kış aylarında diğer yıllarda gözlenen artış belirgin şekilde gözlenmiştir. Güneş etkinliğinde değişiklik katman kalınlığını kuzey bölgelerde daha fazla etkilemektedir. Şekil 3.16h’de PQ052 istasyonunda özellikle kış Ekim-Aralık ayları arasında 1900 – 2400 GS saatleri arasında yıl içinde en yüksek değerlere ulaşmıştır. Şekil 3.16i’de verilen en güneydeki RO041 istasyonu en yüksek güneş etkinliği yılı 2014 yılında Ocak ve Aralık aylarında 1900 – 2400 GS saatleri arasında tepe noktalarında gözlenmiştir.

Enlemde kuzeyden güneye gidilmesi ve buna ek olarak güneş etkinliğindeki değişimler de dikkate alındığında bu etkenlerin kış ayları ve gece saatlerinde belirgin şekilde ortaya çıktığı sonucuna varılmıştır. Yaz ayları ve öğle saatlerinde güneşin baskın etkisi güneşlenme süresine bağlı olarak gece ve kış aylarına oranla katman kalınlığının ortalama değerleri bir plato üzerinde küçük değişimler göstermektedir.

Şekil 3.17’de katman kalınlığının OYF kestirimlerinden elde edilen aylık saatlik parametrik standart sapma değerleri gösterilmiştir. Verilen standart sapma değerleri güneyde bulunan istasyonlarda 100 km altında değerler almaktadır. Şekil 3.17a’da JR055 istasyonu 2009 yılı, Şekil 3.17d’de 2012 yılı ve Şekil 3.17g’de 2014 yılı standart sapmalar incelendiğinde ku-

zeyde bulunan istasyon için kestirilen değerler güneş etkinliği ile artış gözlenirse de üç yılda da aylık olarak gün içinde tüm saatlerde sınırlıdır.

Şekil 3.17b’de PQ052 istasyonu için verilen parametrik standart sapma değerleri incelendiğinde Ocak ayında 0200 – 0500 GS saatleri arasında yüksek değerler gözlenmiştir. Şekil 3.17c’de RO041 içinde Ocak ayında 0300 – 0500 GS saatleri arasında artmıştır. En kuzeyde bulunan istasyonda ise gözlenmeyen bu durumun kış aykırılığı kaynaklı olabileceği değerlendirilmiştir. Şekil 3.17e ve Şekil 3.17f’de de 2012 yılında görülen benzer davranışlar öncelikle kış ayları ve gece saatlerinde standart sapmanın artışı olarak göze çarpmaktadır. Şekil 3.17h ve Şekil 3.17i’de 2014 yılında standart sapmanın aylık saat-içi değişimleri benzerlik göstermektedir.



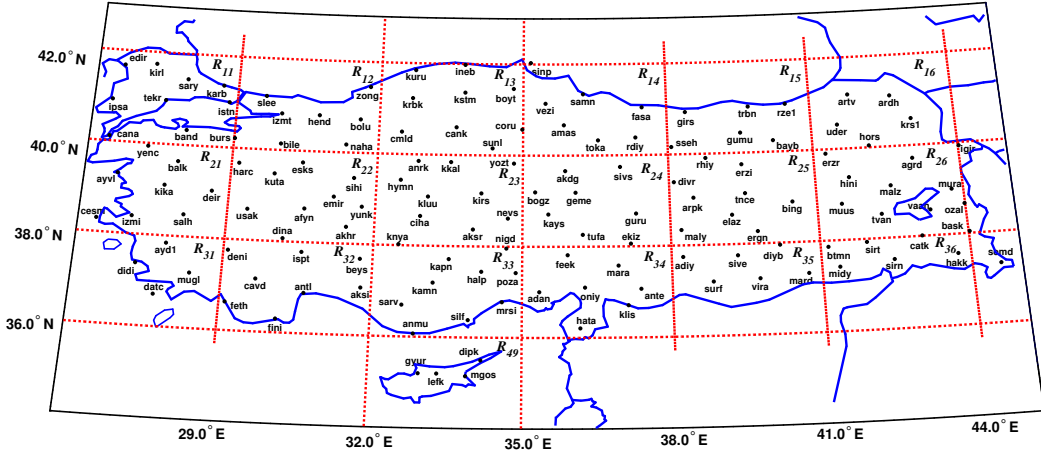
Şekil 3.17: Saat-içi aylık  $\tau$  parametrik OYF standart sapma kestirimleri  $\hat{\mu}_\tau$ , birinci sütun (a-d-g): JR, ikinci sütun (b-e-h): PQ, üçüncü sütun (c-f-i): RO; birinci satır (a-b-c): 2009, ikinci satır (d-e-f): 2012, üçüncü satır (g-h-i): 2014.

İyonkürenin konumda ve zamanda istatistiksel incelenmesi amacı ile TEİ, foF2, hmF2 ve katman kalınlığı ölçüm ve kestirimlerinin saat-içi parametrik Olasılık Yoğunluk Fonksiyonları (OYF) IONOLAB-PDF yöntemi kullanılarak kestirilmiştir. Ayrıca parametrik OYF’ler kullanılarak ortalama ve standart sapma değerleri elde edilmiştir. Saat-içi istatistiksel bilgiler uzayda ölçüm noktasının konumu kullanılarak enlem ve boylama göre zamanda yıllık, mevsimlik ve aylık olarak incelenmiştir. Konumda ve zamanda foF2’nun TEİ ve hmF2 arasındaki ilişkisi de incelenmiştir. İyonküre ölçümlerinin istatistiksel davranışının ortaya

konulduğu [101] çalışması Radio Science’da yayınlanmıştır.

### 3.3 Uzay Zamanda Bölgesel İyonküre Ölçümlerinin Yönsemesi

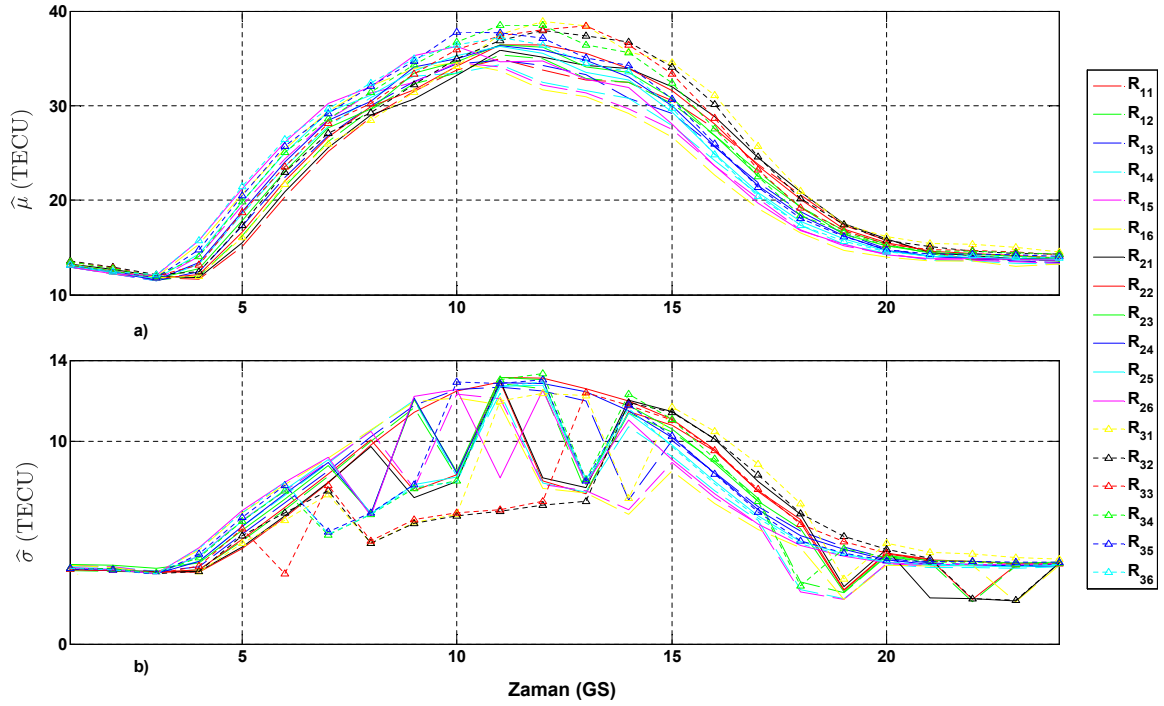
IONOLAB-PDF yöntemi Türkiye üzerinde bulunan TUSAGA-Aktif ağından elde edilen TEİ kestirimlerine uygulanmıştır. TEİ kestirimleri Şekil 3.18’de verilen TUSAGA-Aktif ağına bağlı istasyonlardan mevsimsel ve bölgesel olarak gruplandırılarak incelenmiştir. Mevsimsel gruplandırılmış TEİ verilerinin OYF kestirimleri kapsamında tüm mevsimler ve istasyonlarda Lognormal ve Weibull dağılımlar bulunmuştur. Bu sonuç orta enlem için daha önce yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçları daha sık ve bölgesel bir ağı ile doğrulamıştır.



Şekil 3.18: TUSAGA-Aktif Ağı için Türkiye üzerinde belirlenmiş bölgeler.

Enlemden güneye doğru ölçek parametresi, şekil parametresi ise gün içinde öğle saatlerinde artmıştır. Bölgesel ve mevsimsel olarak gruplandırılmış TEİ verilerinin Deneysel Dağılımlarına uyumlandırılan parametrik OYF'lerin yıllık olarak elde edilenlerden daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 3.19’da örnek olarak 2011 yılı bahar mevsimi (Mart, Nisan) için bölgesel olarak gruplandırılmış TEİ verileri kullanılarak IONOLAB-PDF kestirimleri gösterilmiştir. Tüm saatlerde bölgeler için kestirilen parametrik ortalama ve standart sapma değerleri gün içindeki değişimleri yıllık analizlere oranla daha iyi göstermiştir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan mevsimsel ve bölgesel olarak Türkiye üzerinde IONOLAB-PDF yönteminin uygulanması ve elde edilen sonuçlar ulusal ve uluslararası konferans, kurtay ve Turkish Journal of Electrical and Electronics’de yayınlanmıştır [62, 102, 103].

Bu bölümde iyonküre ölçümlerinin orta enlemden uzay-zamanda istatistiksel özellikleri in-



Şekil 3.19: TUSAGA-Aktif Ağı, 2011 yılı bahar mevsimi (Mart-Nisan) TEİ verilerinin bölgesel IONOLAB-PDF kestirimlerinden elde edilen parametrik ortalama ve standart sapma kestirimleri, a)  $\hat{\mu}$ , b)  $\hat{\sigma}$ .

celenmiştir. Ölçümler yıllık, mevsimlik ve aylık olarak gruplandırılarak bütün saat aralıkları için saat içinde toplanan verilerin deneysel dağılımlarına IONOLAB-PDF yöntemi ile parametrik OYF uyumlandırılarak, en uygun dağılımın parametreleri kestirilmiştir. İstatistiksel özellikleri hem ölçümlerin kendi içinde hem de ölçümler arasında gerçekleştirilmiştir. İyonküre ölçümlerinin IONOLAB-PDF yöntemi ile elde edilen yönseme modellerinin uzay zamandaki davranışı iyonküre değişkenliğinin yönsemesini takip etmektedir.

### 3.4 IRI-Plas Modelinin Rassal İyonküre Benzetimleri ile Güncellenmesi

IONOLAB-PDF yöntemi kullanılarak elde edilen kestirimlerde bütün iyonküre ölçümlerinin saat içinde OYF kestirimleri Lognormal ya da Weibull olarak bulunmuştur. Kestirilen parametreler kullanılarak 2009, 2012 ve 2014 yılları ve kuzeyde güneye doğru JR055-sass, PQ052-gope ve RO041-m0se iyonosonda ve GPS alıcı konumlarında kestirim parametreleri ve SKLD değerleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre iyonküre parametreleri IONOLAB-PDF yöntemi ile rassal olarak modellenebilmektedir. Uzay-zamanda noktasal olarak ölçüm istasyonlarından elde edilen değerlerin parametrik OYF'leri elde edilerek IRI-

Plas iyonküre modeline girdi olarak sağlanmıştır. Buna göre istatistiksel olarak güncellenmiş IRI-Plas ile elde edilen elektron yoğunluğu profillerinin gerçek ölçümler ile elde edilen elektron yoğunluğu profillerine yakınsayarak iyonkürenin durumunu daha iyi göstermiştir.

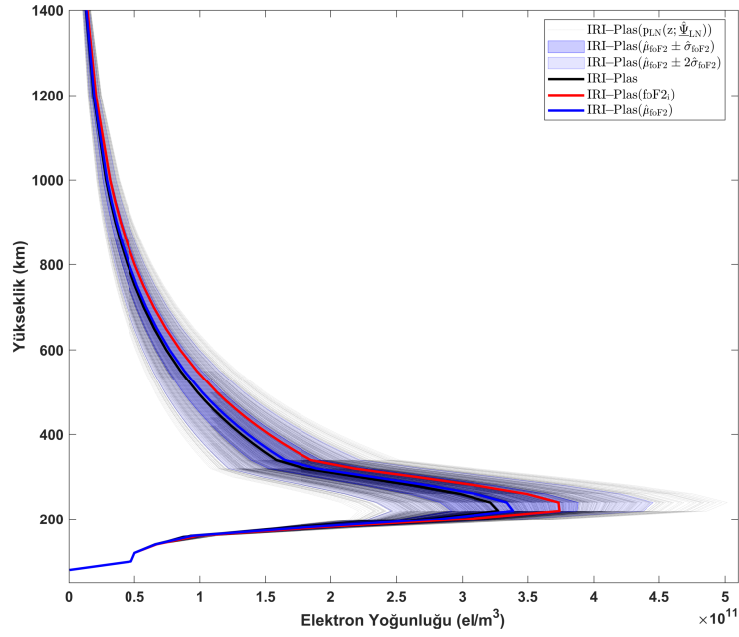
Modelin başarımının gözlenmesi amacı ile IONOLAB-PDF yöntemi ile elde edilen kestirim parametreleri kullanılarak saat-içinde ve aylık olarak iyonküre ölçümleri kestirilmiş ve IRI-Plas modeline girdi olarak sağlanmıştır. Kestirimler  $\hat{\mu} \pm \hat{\sigma}$  zarf aralığında gerçek ölçümler ve IRI-Plas modeli ile karşılaştırılmıştır. IONOLAB-PDF parametreleri ve OYF kestirimleri kullanılarak en az 1,000 adet koşum yapılarak iyonküre elektron yoğunluğu profili benzetimleri rassal olarak üretilmiştir.

Şekil 3.20'de verilen örnekte 15 Aralık 2009 tarihi 1200 GS'de güneş etkinliğinin az olduğu yılda en kuzeyde JR055 istasyonu için IONOLAB-PDF kestirimleri IRI-Plas programına girdi olarak beslenmiştir. Bu saatte kestirilen OYF Lognormal'dır. Bu kapsamda elektron yoğunluğu profilleri belirtilen gün ve saatte üretilmiştir. IRI-Plas'a girdi verilmediği durum siyah düz çizgi ile gösterilmiştir. IRI-Plas aylık ve saatlik ortanca değerler üzerinden kestirim yapmıştır. Kırmızı düz çizgi ise 1200 GS için iyonosonda ölçümünün IRI-Plas'a girdi olarak beslenmesi ile elde edilmiştir. Kırmızı ve siyah düz çizgiler ile verilen elektron yoğunluğu profilleri farklılık göstermektedir.

IONOLAB-PDF kestirimleri kullanılarak 1,000 rassal foF2 tahmini IRI-Plas'a girdi olarak verilmiş ve siyah noktalı olarak gösterilmiştir. Buna ek olarak IONOLAB-PDF ile elde edilmiş ortalama ve standart sapma kestirimleri kullanılarak ortalama etrafında bir ve iki standart sapma mavi taralı alanlar ile gösterilmiştir. Toplam koşum sayısının 0.7 kadarı ortalama etrafında bir standart sapma ve 0.9 kadarı ortalama etrafında iki standart sapma içinde kalmaktadır. Benzer şekilde kestirilen OYF ve parametreleri kullanılarak aynı aralıkta elektron yoğunluğu kestirim olasılığı ise sırasıyla 0.69 ve 0.94 olarak hesaplanmaktadır.

IRI-Plas orta enlemde elektron yoğunluğu profilini takip etse de ampirik deterministik olduğu için iyonosondaya uymamaktadır. Stokastik olarak elde edilen IONOLAB-PDF kestirimleri IRI-Plas'a girdi olarak verilmesi durumunda IRI-Plas ampirik deterministik kestirim yerine ampirik-stokastik elektron yoğunluğu tahminini 0.7 olasılıkla yönsemesine uygun olarak kestirmektedir.

Şekil 3.21'de verilen örnekte 15 Mart 2012 tarihi 1200 GS'de güneş etkinliğinin orta sevi-



Şekil 3.20: 15 Aralık 2009 1200 GS JR055 istasyonu IRI-Plas elektron yoğunluğu profili (IONOLAB-PDF kestirimleri kullanılarak üretilmiş rassal profiller (1,000 koşum) siyah noktalı çizgiler, IRI – Plas: siyah düz çizgi, IRI – Plas(foF2<sub>i</sub>) kırmızı düz çizgi, IRI – Plas( $\hat{\mu}_{foF2} \pm \hat{\sigma}_{foF2}$ ): mavi taralı alan ve IRI – Plas( $\hat{\mu}_{foF2} \pm 2 \hat{\sigma}_{foF2}$ ): açık mavi taralı alan.

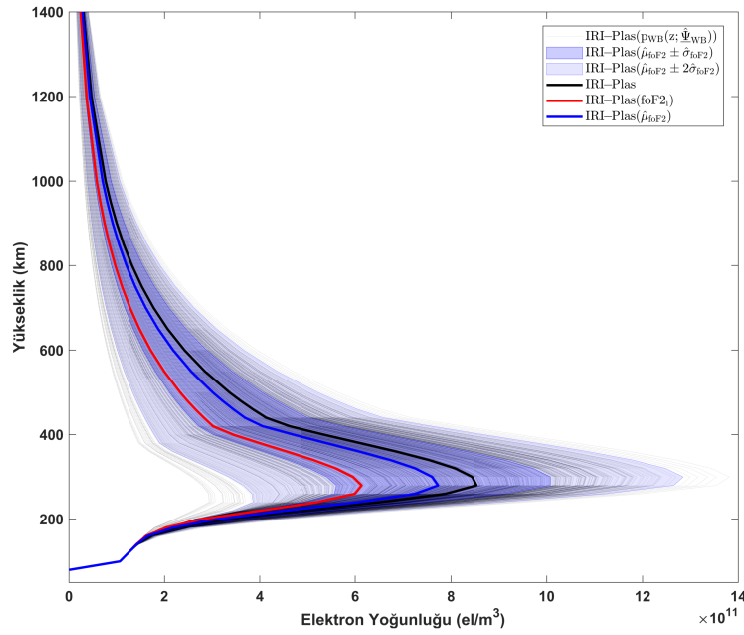
yede olduğu yılda PQ052 istasyonu için IONOLAB-PDF kestirimleri IRI-Plas programına girdi olarak beslenmiştir. Bu saat için kestirilen OYF, değişkenliğin arttığı Mart ayı için Weibull'dur. IRI-Plas'a girdi verilmediği durum siyah düz çizgi ile gösterilmiştir. IRI-Plas aylık ve saatlik ortanca değerler üzerinden kestirim yapmıştır. Kırmızı düz çizgi ise 1200 GS için iyonosonda ölçümünün IRI-Plas'a girdi olarak beslenmesi ile elde edilmiştir. Kırmızı ve siyah düz çizgiler ile verilen elektron yoğunluğu profilleri farklılık göstermektedir.

IONOLAB-PDF kestirimleri kullanılarak 1,000 rassal foF2 tahmini IRI-Plas'a girdi olarak verilmiş ve siyah noktalı olarak gösterilmiştir. Buna ek olarak IONOLAB-PDF ile elde edilmiş ortalama ve standart sapma kestirimleri kullanılarak ortalama etrafında bir ve iki standart sapma eklenmesi ve çıkarılması ile elde edilen elektron yoğunluğu profilleri de sırasıyla mavi taralı alanlar ile verilmiştir. Toplam koşum sayısının 0.7 kadarı ortalama etrafında bir standart sapma ile taralı alan arasında kalmaktadır. Toplam koşum sayısının 0.9 kadarı ortalama etrafında iki standart sapma taralı alan içinde kalmaktadır. Benzer şekilde kestirilen OYF ve



parametreleri kullanılarak aynı aralıkta elektron yoğunluğu kestirim olasılığı sırasıyla 0.68 ve 0.95 olarak hesaplanmaktadır.

Elde edilen sonuçlara göre IONOLAB-PDF kestirimlerinin IRI-Plas'a girdi olarak verilmesi durumunda IRI-Plas ampirik deterministik kestirim yerine ampirik-stokastik elektron yoğunluğu tahminini ortalama etrafında bir standart sapma aralığında 0.7 olasılıkla yönsemesine uygun olarak kestirmektedir. Şekil 3.20 ile karşılaştırıldığında orta dereceli güneş etkinliğinin olduğu yılda IRI-Plas tahmininin daha yüksek olduğu gözlenmiştir.



Şekil 3.21: 15 Mart 2012 1200 GS PQ052 istasyonu IRI-Plas elektron yoğunluğu profili (IONOLAB-PDF kestirimleri kullanılarak üretilmiş rassal profiller (1,000 koşum) siyah noktalı çizgiler, IRI – Plas: siyah düz çizgi, IRI – Plas(foF2<sub>i</sub>) kırmızı düz çizgi, IRI – Plas( $\hat{\mu}_{foF2} \pm \hat{\sigma}_{foF2}$ ): mavi taralı alan ve IRI – Plas( $\hat{\mu}_{foF2} \pm 2 \hat{\sigma}_{foF2}$ ): açık mavi taralı alan.

Şekil 3.22'de verilen örnekte 15 Haziran 2009 tarihi 1400 GS'de güneş etkinliğinin yüksek seviyede olduğu yılda en güneydeki RO041 istasyonu için IONOLAB-PDF kestirimleri IRI-Plas programına girdi olarak beslenmiştir. Bu saatte kestirilen OYF değişkenliğinin arttığı Mart ayı için Weibull'dur. IRI-Plas'a girdi verilmediği durum siyah düz çizgi ile gösterilmiştir. IRI-Plas aylık ve saatlik ortanca değerler üzerinden kestirim yapmıştır. Kırmızı düz çizgi ise 1400 GS için iyonosonda ölçümünün IRI-Plas'a girdi olarak beslenmesi ile elde

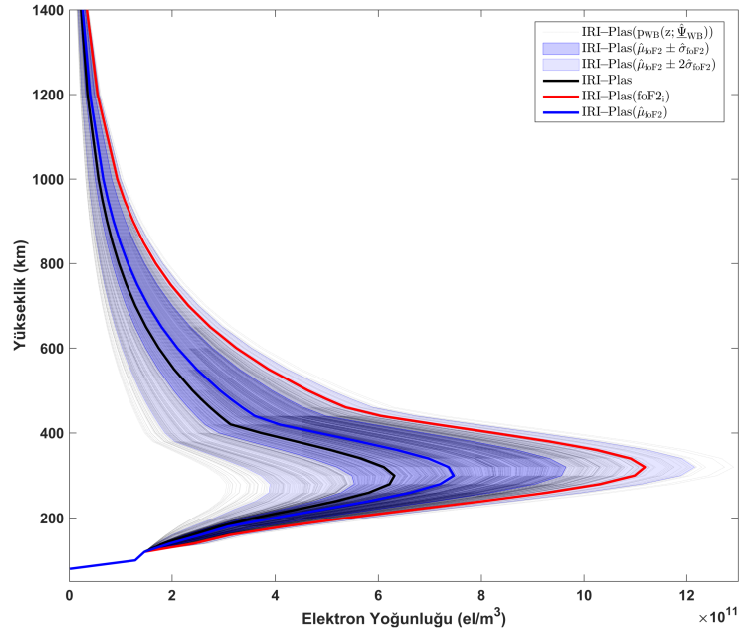
edilmiştir. Kırmızı ve mavi düz çizgiler ile verilen elektron yoğunluğu profilleri farklılık göstermektedir.

IONOLAB-PDF kestirimleri kullanılarak 1,000 rassal foF2 tahmini IRI-Plas'a girdi olarak verilmiş ve siyah noktali olarak gösterilmiştir. Buna ek olarak IONOLAB-PDF ile elde edilmiş ortalama ve standart sapma kestirimleri kullanılarak ortalama etrafında bir ve iki standart sapma eklenmesi ve çıkarılması ile elde edilen elektron yoğunluğu profilleri de mavi tarali alanlar ile verilmiştir. Toplam koşum sayısının 0.71 kadari ortalama etrafında bir standart sapma için ve 0.93 kadari ortalama etrafında iki standart sapma arasında kalmaktadır. Benzer şekilde kestirilen OYF ve parametreleri kullanılarak aynı aralıkta elektron yoğunluğu kestirim olasılığı sırasıyla ise 0.7 ve 0.9 olarak hesaplanmaktadır.

Güneş etkinliğinin yüksek olduğu, Yaz ayı ve Güney enlemlerde de ortalama etrafında iki standart sapma içinde hem IRI-Plas hem de IRI-Plas'a iyonosonda ölçümü girildiği durumu göstermiştir. Sonuçlara göre IONOLAB-PDF kestirimlerinin IRI-Plas'a girdi olarak verilmesi durumunda IRI-Plas ampirik deterministik kestirim yerine ampirik-stokastik elektron yoğunluğu profili tahmini olasılığı ile birlikte elde edilebilmektedir.

Bu bölümde ortaya konulan sonuçlar ile iyonkürenin uzay-zamanda istatistiksel bir modelinin oluşturulabilmesi için yönseme istatistikleri noktasal ölçüm istasyonu konumlarında edilmiştir. Yönseme istatistiklerinin uzay-zamanda davranışı iyonküre dinamiklerini takip etmiştir. Buna ek olarak iyonküre ölçümlerinin uzay-zamanda aradeğerlenerek haritalanması için ölçümlerin davranışlarını ve birbirleri arasındaki ilintinin ortaya konulmuştur. foF2 ve TEİ'nin uzay-zamanda çok yüksek ilintiye sahip iki ölçüm olduğu fakat bunlardan hesaplanan katman kalınlığının farklı yönsemelere sahip olduğu sonucuna varılmıştır. foF2 ve TEİ arasındaki ilinti yüksek olmasına rağmen iyonkürenin farklı katmanlarından da bilgi taşıdıkları için yönseme istatistiklerinin farklılaştığı noktalar da bulunmaktadır.

Geliştirilen yöntem herhangi bir zaman serisinin istatistiksel özelliklerini elde edebilecek şekilde otomatik hale getirilmiştir. Bu yöntemde kullanıcı tarafından istenen zaman aralığı ve istasyon seçilerek otomatik olarak gruplandırılan verilerin OYF kestirimleri ve kestirilen OYF'nin parametrelerinin sunulduğu IONOLAB-PDF yöntemi olarak adlandırılmıştır. IONOLAB-PDF yöntemi ile seçilen bir istasyon, saat ve tarih aralığında bir iyonküre ölçüm veri setinin yönseme istatistikleri OYF kestirimleri ve bunlardan elde edilen parametrik



Şekil 3.22: 15 Haziran 2012 1400 GS RO041 istasyonu IRI-Plas elektron yoğunluğu profili (IONOLAB-PDF kestirimleri kullanılarak üretilmiş rassal profiller (1,000 koşum) siyah noktalı çizgiler, IRI – Plas: siyah düz çizgi, IRI – Plas(foF2<sub>i</sub>) kırmızı düz çizgi, IRI – Plas( $\hat{\mu}_{foF2} \pm \hat{\sigma}_{foF2}$ ): mavi taralı alan ve IRI – Plas( $\hat{\mu}_{foF2} \pm 2 \hat{\sigma}_{foF2}$ ): açık mavi taralı alan.

ortalama ve standart sapma kestirimleri otomatik olarak gerçekleştirilebilmektedir. OYF kestirimi sonucunda yönsemenin alacağı değerler olasılıkları ile birlikte hesaplanabilmektedir. Elde edilen kestirimlerin IRI-Plas'a girdi olarak sağlandığı durumda ionkürenin yerel ampirik deterministik kestirimlerine stokastik özellikleri eklenerek ionküre yönseme davranışlarını uzay-zamanda daha başarılı takip edebilmektedir. foF2 ve TEİ verileri kullanılarak orta enlemde yüksek çözünürlüklü foF2 ve katman kalınlığı haritalarının elde edilmesi Bölüm 4'de örnekleri ile anlatılmıştır.

#### 4. EŞ-KRİGLEME İLE F2 KATMANI KRİTİK FREKANS HARİTALAMASI

Krigleme yöntemi yerküresel istatistiksel sinyallerin aradeğerlenmesinde en çok kullanılan yöntemdir. Uzay zamanda alınan örneklerin aradeğerlenerek haritalanmasında kullanılır [104]. Krigleme yönteminin farklı çeşitleri bulunmaktadır. Ortalamalı, Ortalamasız, Evrensel ve Eş-Krigleme en çok bilinen türleridir [27, 105].

İyonküre ölçümleri iyonkürenin farklı katmanlarından daha fazla bilgi taşımakla beraber hem uzayda hem de zamanda değişen çözünürlüktedir. Örnek olarak iyonosonda ve GPS alıcıları gösterilebilir. İyonosondalar uzay zamanda seyrek olarak ölçüm alabilen sistemlerdir. Diğer yandan GPS alıcıları ise çok daha sık ve daha fazla sayıdadır.

İyonosonda ve GPS alıcısı gibi farklı kaynaklardan elde edilen iyonküre ölçümleri birbirleri ile ilintili olduğundan uzay zamanda seyrek elde edilen ölçümler farklı kaynaklar ile elde edilmiş ölçümler ile birlikte yüksek çözünürlüklü olarak aradeğerlenebilir. İyonküre ölçümleri rassal modaliteler olarak tanımlanırsa Krigleme yöntemleri kullanılarak uzay-zamanda yüksek çözünürlüklü aradeğerlenmiş haritalar elde edilebilir.

İyonküre ölçümlerinden foF2, IRI-Plas modelinin başlıca girdi parametresi ve uzayda, zamanda seyrek örneklendiği için yüksek çözünürlüklü olarak haritalanması önemlidir. Bu kapsamda GPS alıcılarından uzayda ve zamanda sık elde edilen IONOLAB-TEC kestirimleri ile birlikte Kriglenerek yüksek çözünürlüklü foF2 haritaları elde edilebilir. foF2 birinci modalite, TEİ ise ikinci modalite olarak tanımlanırsa Eş-Krigleme yardımı ile uzay-zamanda yüksek çözünürlüklü foF2 haritaları bulunabilir.

İyonkürenin bölgesel olarak Krigleme yöntemleri ile aradeğerlenerek haritalaması çalışmaları literatürde yapılan çalışmalardandır. İyonosonda verilerinden foF2 değerleri kullanılarak [106] çalışmasında Krigleme yöntemi ile foF2 haritaları elde edilmesi amacı ile Çin üzerinde uygulanmıştır. Haritalama da kullanılan Krigleme yöntemi sonucunda RMS hata değerleri IRI modeli ile karşılaştırıldığında 1.5 MHz değerlere kadar hatalar gözlenmiştir. ETEİ verileri üzerine [107] çalışmasında Krigleme yöntemi çeşitlerinin de literatürde örnekleri gözlenmiştir. Başka bir çalışmada ise foF2 verilerinin Kriglemesi belirli bir sınırlı bölge içinde gösterilmiştir [108]. foF2 ve TEİ değerleri  $5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  ve 1 s aralıklı olarak Krigleme yöntemi ile oluşturulmuştur [109]. WAAS sistemleri için iyonküre kestirim algoritmaları ola-

arak Krigleme yöntemleri uygulanmıştır [110]. TEİ haritalaması kapsamında seyrek örneklenmiş TEİ verilerinin sıkıştırılmış algılama yöntemleri kullanılarak aradeğerlendiği [111] çalışması bulunmaktadır. Sentetik yüzeyler kullanılarak yöntemin başarımı Ortalamasız Krigleme ile karşılaştırmıştır. Sıkıştırılmış algılama yöntemleri kullanılarak bir bölge içinde TEİ haritalamaları için örnek bulunmayan dış aradeğerleme noktalarında Ortalamasız Krigleme'ye göre daha başarılı olduğu rapor edilmiştir.

Krigleme yöntemi ölçüm noktalarından alınan değerlerin arasındaki uzaklığa bağlı ilinti kullanılarak değeri bilinmeyen bir noktanın kestirimi ölçümlerin doğrusal ağırlıklandırılarak yapılması esasına dayanır [112, 113]. Ölçüm noktalarından alınan değerler kullanılarak bilinmeyen herhangi bir noktanın değerinin kestirilmesine olanak sağlayan iyi yansız kestiricidir [104, 113]. Kestirim değişintisini en aza indiren ağırlıklar ile ölçüm değerlerinin doğrusal ağırlıklandırılarak toplanması ile bulunmaktadır.

Eş-Krigleme, değeri bilinmeyen bir noktanın kestiriminde birden fazla türde modalitenin birlikte kullanılmasına dayanmaktadır. Genellikle kestirimi yapılacak birinci modalite uzay zamanda daha seyrek olduğunda aynı bölgede daha sık örneklenmiş ve ilintili ikinci bir modalite ile birlikte kestirim başarımı artırılabilir. Kestirimin başarısı kullanılan modalitelerin örnekleme sayısı ve düzenlerine ek olarak birbirleri arasındaki uzaysal ilintiye bağlıdır.

Krigleme yöntemleri sentetik haritalar kullanılarak incelenmiş ve TEİ değerlerine uygulanmıştır [27, 28]. Yapılan çalışmada sentetik haritalar kullanılarak farklı örnekleme düzenlerinin Krigleme performansına etkisi incelenmiştir. Belirli bir bölge içinde bölgenin alanının %10'undan fazla örnek sayısı kullanıldığında tek modalitenin başarı ile aradeğerlendiği gösterilmiştir. Buna ek olarak farklı örnekleme düzenlerinden karesel ızgara üzerindeki kesişim noktalarında aradeğerleme yapılmasının yeterli performansta olduğu bildirilmiştir [27, 28].

Bir başka çalışmada GPS alıcılarından elde edilmiş TEİ verileri IONOLAB grubu tarafından geliştirilen IONOLAB-MAP yöntemi ile haritalama yapılmıştır [105, 114]. Türkiye üzerinde TUSAGA-Aktif ağından kestirilen TEİ verileri Ortalamasız ve Evrensel Krigleme yöntemleri ile aradeğerlenmiştir. IONOLAB-MAP yöntemi iki aşamalı bir aradeğerleme uygulamaktadır. Buna göre ilk aşamada deterministik olarak uzaklığın karesi ile ters orantılı ağırlıklandırma yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem ile elde edilen sonuçlar Evrensel ya da Ortalamasız (OKr) Krigleme ile ikinci aşamada aradeğerlenmektedir. Aradeğerleme çözünürlüğü

örnekleme noktalarının aralarındaki uzaklık bilgilerinden yararlanılarak yarı değişinti serimi kestiriminin eniyilenmesi ile elde edilmiştir [114].

IONOLAB-MAP yöntemi kullanılarak uzay-zamanda daha sınırlı bir istasyon ve veri seti üzerinden Eş-Krigleme (EKr) uyumlandırılmıştır [115]. Eş-Krigleme de foF2 ve TEİ verileri Avrupa üzerinde ionosonda ve GPS alıcısı konumları kullanılarak uygulanmıştır. İyonküre verilerinden TEİ ve foF2 değerlerine bu çalışmada uyumlandırılan Eş-Krigleme yöntemi ilk defa uygulanmıştır [115].

İyonküre, içerisinde gerçekleşen bütün dinamiklerin takip edildiği uzay-zamanda yetkin bir modele sahip değildir. Aylık saatlik ortanca değerler sağlayan ampirik deterministik modeller iyonkürenin baskın yönsemelerini gösterebilirken iyonkürede uzay-zamanda değişken ve kısa süreli olayları içermemektedir. İyonkürenin değişkenliği tam olarak yansıtan bir modele sahip olmaması ve uzay-zamanda yeterli örnekleme yapılamaması sebebi ile sentetik iyonküre parametreleri kullanılarak aradeğerleme algoritmalarının başarımı test edilebilir. İstatistiksel olarak incelemenin başlıca avantajı iyonkürenin tüm fiziksel değişikliklerinin içerilmesi ve stokastik modele dayalı ileriye dönük tahmin yapılabilmesine olanak sağlamasıdır [29].

İyonküre ölçümlerinin hem baskın yönsemelerini gösteren hem de kısa süreli olayları takip edecek şekilde Eşitlik 1.3'de verilen toplam olarak ifade edilmiş modelde doğrudan  $Z(\underline{x}, t)$  şeklinde aradeğerlenebilir. Böylece uzay-zamanda yönsemeleri ve kısa süreli olayları gösteren Krigleme yöntemi ile aradeğerleme haritaları elde edilebilir. Bu çalışmada IONOLAB-MAP yönteminde deterministik olan uzaklığı karesi ile ters ağırlıklandırma yöntemi Ortalamasız Krigleme yöntemi ile güncellenerek iki aşamalı Ortalamasız Krigleme yöntemi haline getirilmiştir. Buna ek olarak ikinci aşamada kullanılan Ortalamasız Krigleme yöntemi iki modaliteyi Eş-Krigleme yapabilen çok değişkenli aradeğerleme yapacak şekilde geliştirilmiştir. Evrensel Krigleme yöntemi bir yönseme yüzeyi üzerinde aradeğerleme yapan ve kestirimler ile yönseme yüzeyinin uyumlu olması durumunda iyi aradeğerleme performansı gösterebilen yöntemdir. Ortalamasız Krigleme ise herhangi ön bilgi olmadan doğrudan aradeğerleme yapıldığı için farklı yönseme davranışlarında da temel düzeyde de olsa aradeğerleme yapılabilen yöntemdir.

IONOLAB-CK olarak adlandırılan yöntemde iki aşamalı yapılan Krigleme, ilk aşamasında

iki modaliteyi kendi içinde Ortalamasız Krigleme ile aradeğerlendikten sonra iki modalite- nin verilerinin Eş-Kriglenmesi sonucunda yüksek çözünürlüklü birinci modalite haritası elde edilmektedir. Bu yöntem konumda seçilen bir bölge için birinci ve ikinci modalite verilerinin otomatik olarak çevrimiçi indirerek aradeğerleme yapabilmektedir.

IONOLAB-CK yönteminin sentetik yüzeyler kullanılarak hata metrikleri üzerinden başarımı ve limitleri incelenmiştir. Modalitelerin benzer ve farklı davranışları metrik hata değerleri üzerinden incelenmiştir. İyonkürenin farklı durumları için bir bölge için iyonküre ölçümleri kullanılarak IONOLAB-CK haritaları elde edilmiştir.

Bu bölümde aradeğerlenmesi amacı ile  $Z(\underline{x};t)$  sürekli zamanda konum ve zamanın bir rassal fonksiyonu olarak tanımlanan modaliteler tanımlanmıştır. Altbölüm 4.1’de ızgara yapısı ve leksikografik dizinleme anlatılmıştır.

#### 4.1 Izgara Yapısı ve Dizinleme

Uzay ve zaman boyutlarında tanımlanan iyonküre parametreleri genel olarak sürekli za- manda  $Z(\underline{x};t)$  çok değişkenli fonksiyonu ile gösterilmiştir. Burada  $\underline{x} = [\theta \ \phi]^T$ ,  $\theta$  enlemi ve  $\phi$  boylamı göstermektedir.  $T$  ise matris devriği operatörüdür.  $t$  zamanı ifade etmektedir.

Kullanılan ızgara yapısı [27, 28, 105, 114] kaynaklarını temel alarak oluşturulmuştur. Izgara- nın başlangıç noktası  $(\theta_i, \phi_i)$  ızgara aralıkları ise enlem ve boylamda sırasıyla  $\Delta\theta$  ve  $\Delta\phi$ ’dir. Izgarada herhangi bir  $[n_\theta, n_\phi]$  noktası:

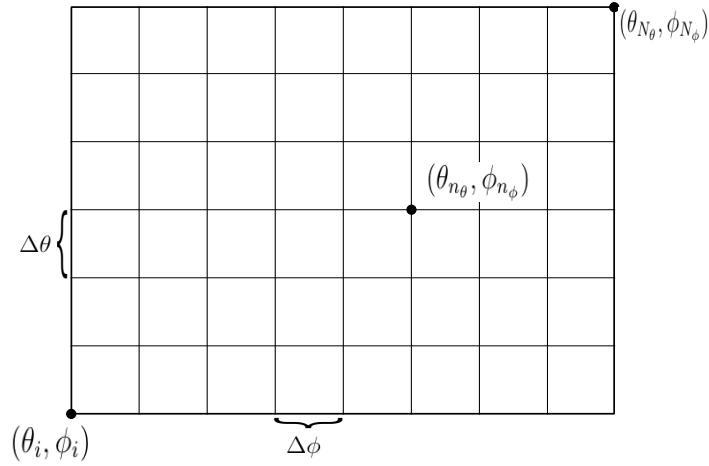
$$\theta_{n_\theta} = \theta_i + n_\theta \Delta\theta \quad (4.1)$$

$$\phi_{n_\phi} = \phi_i + n_\phi \Delta\phi \quad (4.2)$$

olarak tanımlanabilir. Burada  $1 \leq n_\theta \leq N_\theta$  ve  $1 \leq n_\phi \leq N_\phi$ ’dir.  $N_\theta$  ve  $N_\phi$  sırasıyla enlem ve boylamda toplam ızgara noktası sayısını ifade etmektedir. Yukarıda tanımlanan ızgara yapısı Şekil 4.1’de şematik olarak gösterilmiştir. Buna ek olarak sırasıyla enlem ve boylamda toplam ızgara noktası sayısı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$N_\theta = \frac{\theta_{N_\theta} - \theta_i}{\Delta\theta} \quad (4.3)$$

$$N_\phi = \frac{\phi_{N_\phi} - \phi_i}{\Delta\phi} \quad (4.4)$$



Şekil 4.1: Yüzey kestiriminde kullanılan ızgara yapısı.

Yukarıda verilen ızgara tanımında her  $[n_\theta, n_\phi]$  noktası  $n_t$  anında leksikografik konum olarak:

$$l = n_\theta + (n_\phi - 1)N_\theta + (n_t - 1)N_\theta N_\phi \quad (4.5)$$

tanımlanabilir. Burada  $1 \leq n_t \leq N_t$ 'dir.  $N_t$  ise zamanda örnek sayısını göstermektedir. Aşağıdaki eşitlikte gösterilen tanımlar bu tez kapsamında geçişmeli olarak kullanılmaktadır. Sürekli zamanda tanımlı  $Z(\underline{x}; t)$  fonksiyonunun, ızgara üzerinde  $(\theta_{n_\theta}, \phi_{n_\phi}; n_t)$  noktasındaki değeri Eşitlik 4.6'da verilmiştir.

$$Z_s[n_\theta, n_\phi; n_t] = Z(\theta_{n_\theta}, \phi_{n_\phi}; n_t) \quad (4.6)$$

Konum-zamanda tanımlanan  $Z_s[n_\theta, n_\phi; n_t]$ ,  $Z(\underline{x}; n_t)$ 'nin ayrık zamanda  $[n_\theta, n_\phi; n_t]$  ızgara noktasındaki örneğidir. Leksikografik olarak sıralanarak tek boyutta ifade edilirse,

$$Z_s(l) = Z_s[n_\theta, n_\phi; n_t] \quad (4.7)$$

Leksikografik ızgara ve zaman dizinleri  $n_\theta$ ,  $n_\phi$  ve  $n_t$  arasındaki dönüşümler aşağıda tanımlanmıştır.

$$n_\theta = (l)_{N_\theta} \quad (4.8)$$

$$n_\phi = \left( \frac{l - n_\theta}{N_\theta} \right)_{N_\phi} + 1 \quad (4.9)$$

$$n_t = \left( \frac{l - n_\theta - (n_\phi - 1)N_\theta}{N_\theta N_\phi} \right)_{N_t} + 1 \quad (4.10)$$

$$(4.11)$$



Yukarıdaki eşitlikte  $(.)_N$  modülo  $N$  işlevini göstermektedir. Bu çalışmada verilen yöntem ve eşitlikler verilen belirli bir zaman için gösterilecektir. Bu nedenle  $n_t$  zaman değişkeni kullanılmayacaktır. Konumda birinci modalite  $Z(\underline{x})$  ve ikinci modalite  $Y(\underline{x})$  olarak tanımlanmıştır. Bölüm 4.1’de tanımlanan  $\theta$  ve  $\phi$  gösterimine göre  $0.01^\circ$  aralıklı ızgarada iyonkürenin yönsemelerini gösteren sentetik yüzeyler Altbölüm 4.2’de anlatıldığı gibi oluşturulmuştur.

## 4.2 Sentetik Yüzey

Konumda yeterli örneklemenin sağlanabilmesi ve değişkenliğin tam olarak gösterilmesi için aradeğerleme yönteminin başarımı sentetik yüzeyler kullanılarak incelenebilir. Sentetik yüzeyler iki boyutlu bir ızgara üzerinde analitik fonksiyonlar kullanılarak hesaplanan iyonkürenin temel yönsemelerine benzer yüzeyler olarak oluşturulabilir. İyonkürede gün-tün döngüsü, konumda enlem ve boylama göre temel yönsemeler bulunmaktadır. Buna ek olarak temel yönsemelerin üzerinde kısa süreli ve belirli bir yönseme karakteristiği göstermeyen bozulmalar gözlenmektedir. İyonkürede gün-tün döngüsü, konuma göre gözlenen farklılıklar gibi temel dinamikler analitik yönseme fonksiyonları ile gösterilmiştir. Buna ek olarak iyonkürede meydana gelebilecek bozulmalar kısa süreli olaylar ise küçük ölçekli değişimler olarak yönseme yüzeylerine eklenmiştir.

Sentetik yüzeylerin oluşturulmasında iyonkürenin bu temel yönsemeleri ve kısa süreli değişimlerini yansıtacak yüzeyler seçilmiştir. Aşağıdaki eşitlikte sentetik yüzey oluşturulması için Eşitlik 4.12’de verilen fonksiyon kullanılabilir. Buna göre bir yönseme fonksiyonu ile küçük ölçekli hızlı değişen fonksiyonun toplamı şeklinde tanımlanmıştır.

$$Z(\underline{x}) = A_\eta Z_\eta(\underline{x}) + A_\varepsilon Z_\varepsilon(\underline{x}) \quad (4.12)$$

Eşitlik 4.12’de  $Z_\eta(\underline{x})$  yönseme fonksiyonu,  $A_\eta$  yönseme fonksiyonunun genliği,  $Z_\varepsilon(\underline{x})$  kısa süreli değişim fonksiyonu ve  $A_\varepsilon$  ise kısa süreli değişim fonksiyonunun genliğini ifade etmektedir. Benzer şekilde Eşitlik 4.12 kullanılarak  $Y(\underline{x})$ ’de tanımlanabilir. Modaliteleri sentetik olarak üretmek için kullanılan fonksiyonları Eşitlik 4.13 sabit, Eşitlik 4.14 düzlemsel, Eşitlik 4.15 karesel, Eşitlik 4.16 Gauss biçimli ve Eşitlik 4.17 sinüs biçimli fonksiyonlar olarak

tanımlanmıştır.

$$Z_c(\underline{x}) = k_1 \quad (4.13)$$

$$Z_p(\underline{x}) = k_1 + k_2\theta + k_3\phi \quad (4.14)$$

$$Z_q(\underline{x}) = k_1 + k_2\theta + k_3\phi + k_4\theta^2 + k_5\phi^2 \quad (4.15)$$

$$Z_g(\underline{x}) = k_1 + k_2 \exp\left(-\left(\frac{\theta - k_3}{k_4}\right)^2 - \left(\frac{\phi - k_5}{k_6}\right)^2\right) \quad (4.16)$$

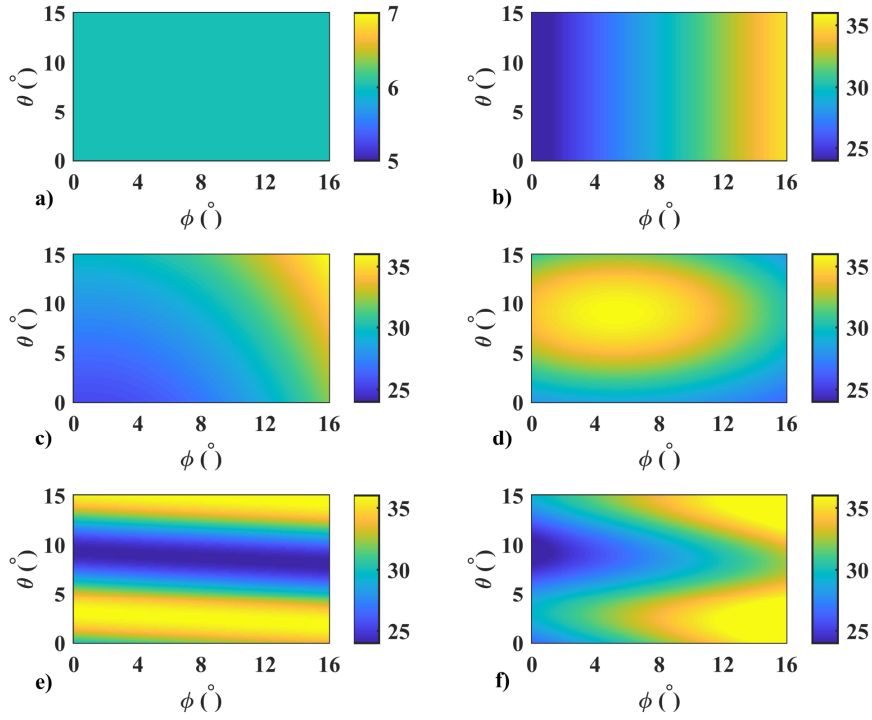
$$Z_s(\underline{x}) = k_1 + k_2 \cos(2\pi(k_3(\theta - k_4) + k_5(\phi - k_6))) \quad (4.17)$$

Yukarıdaki eşitliklerde kullanılan katsayılar Çizelge 4.1’de verilmiştir. Katsayılar kullanılarak sentetik yüzeyler 0 ile 1 arasında değişecek şekilde oluşturulduktan sonra bir dinamik aralık değeri  $A_\eta$  ile ölçeklendirilerek pozitif olacak şekilde yanlılık eklenmiştir. Eşitlik 4.13 - 4.17’de tanımlanan yüzeyler farklı yönseme fonksiyonları ile iyonkürenin davranışlarını benzeterek şekilde Çizelge 4.1’de verilen katsayılar kullanılarak oluşturulmuştur. Şekil 4.2’de verilen örnek sentetik yüzeyler gösterilmiştir. Sentetik yüzeylerin sıfırdan her zaman pozitif

Çizelge 4.1: Örnek sentetik yüzeylerin oluşturulmasında kullanılan katsayılar.

Katsayılar	Sabit	Düzlemsel	Karesel	Gauss Biçimli	Sinüs Biçimli
$k_1$	1	0	0	0	0.5
$k_2$	–	0	–0.012	1	0.5
$k_3$	–	0.063	$7.11 \times 10^{-4}$	49	–0.08
$k_4$	–	–	$3.68 \times 10^{-4}$	9.38	4.69
$k_5$	–	–	$2.4 \times 10^{-3}$	4.33	$-6.3 \times 10^{-3}$
$k_6$	–	–	–	13.33	10

değerler almasını sağlamak için katsayılardan  $k_1$  yanlılık olarak tanımlanmıştır. Şekil 4.2a ve Şekil 4.2b’de sırasıyla sabit ( $A_\eta = 6$ ) ve düzlemsel yönsemeli ( $k_1 = 24$ ;  $A_\eta = 12$ ); Şekil 4.2c ve Şekil 4.2d’de sırasıyla Gauss biçimli ( $k_1 = 24$ ;  $A_\eta = 12$ ) ve karesel ( $k_1 = 24$ ;  $A_\eta = 12$ ); Şekil 4.2e ve Şekil 4.2f’de sırasıyla sinüs biçimli ( $k_1 = 24$ ;  $A_\eta = 12$ ) ve düzlemsel yönsemeye küçük ölçekli sinüs biçimli yönseme eklenmiş ( $k_1 = 24$ ;  $A_\eta = 8$  ve  $A_\epsilon = 4$ ) örnek sentetik yüzeyler verilmiştir. İyonküre yönsemelerine göre oluşturulan sentetik yüzeyler birinci ve ikinci modalite örnekleme noktalarında örneklenecek aradeğerleme yapılmıştır. Örnekleme noktalarının seçimi ve örnekleme düzeni Altbölüm 4.3’de detaylandırılmıştır.



Şekil 4.2: Sentetik olarak Çizelge 4.1’de verilen katsayılar ve Eşitlik 4.13 ve Eşitlik 4.17 verilen fonksiyonlara örnek yüzeyler, a) Sabit, b) Düzlemsel, c) Gauss biçimli, d) Karesel, e) sinüs biçimli, f) Düzlemsel yönseme ve sinüs biçimli.

### 4.3 Örnekleme Düzeni

Ölçüm noktaları konumda düzgün ve sık yerleştirilmemiştir. Bu durum kullanılacak örnek sayısında kısıtlamaya neden olmaktadır. Konumda örnekleme noktalarının seçimi kapsamında düzgün ve kümeli örnekleme düzenleri ile örnek sayısının aradeğerlemeye etkileri incelenmiştir [27, 28]. Düzgün örnekleme yapıldığı durumda kümeli örnekleme göre hata metriklerinin daha küçük elde edildiği rapor edilmiştir. Kümeli örnekleme de örnek sayısı ile hatanın değişimi de farklı örnek sayıları ile incelenmiştir. Örnek sayısının örnekleme yapılan bölgenin alanına oranı açısından %7.6 (20 örnek) ile %26.5 (70 örnek) incelendiğinde 40 örnek noktasından (%15.2) itibaren hata değerlerinde gözlenen azalma genel olarak bir platoda kalmaya başladığı gösterilmiştir [27, 28]. Bu çalışmada kullanılan örnek sayısı ve örnek noktalarının belirlenmesinde 40°K-55°K enlemleri ve -1°D-15°D boylamları arasında bulunan iyonosonda ve GPS alıcısı konumlarından yararlanılmıştır. Örnek sayısının bölgenin alanına oranı için GPS alıcısı konumlarından yararlanılarak ikinci modalite için %36.48 (40 örnek),

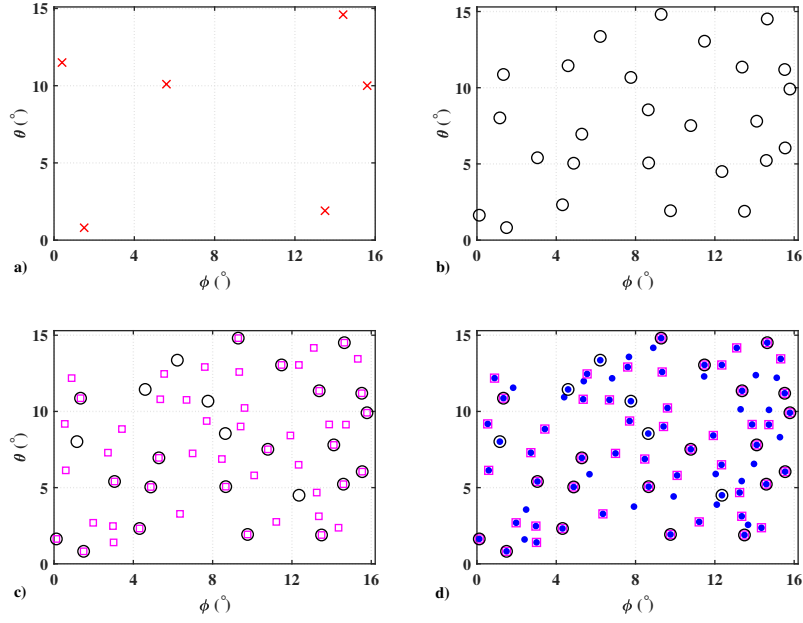
%54.48 (60 örnek) ve bölge içindeki istasyonların tamamı olan 80 örnek noktasının aradeğerleme performansına etkisi hata metrikleri kullanılarak incelenmiştir. Birinci modalite için bölge içindeki iyonosonda konumlarından yararlanılarak (6 örnek) %2.5 kullanılmıştır. Eş-Krigleme yapılarak yüksek çözünürlüklü aradeğerleme yapılmasına ihtiyaç duyulmasının ana sebeplerinden biri de birinci modalitenin uzayda yeterli seviyede örneklenememesidir.

İkinci modalite için örnek noktalarının belirlenmesinde sistematik uzaysal örnekleme kullanılmıştır [116, 117]. Bu çalışmada bölgeyi  $\theta$  ve  $\phi$ 'de eşit aralıklı bölünmüş ızgaranın her bir hücresi içinde kalan noktalardan hücrenin merkezine en yakın olan örnek noktası olarak belirlenmiştir. Sistematik örnekleme düzeni yardımıyla mevcut olan örnek noktaları arasından bütün bölgeyi mümkün olduğunca kapsayan düzgün dağılmış bir örnekleme düzeni seçilmiştir [118]. Krigleme yönteminde kestirim yapılacak noktaya en yakın noktaların aynı birbirine yakın uzaklıkta olması bu noktaların ağırlıklarının birbirini tersleyecek şekilde bulunması ile sonuçlanmaktadır. Literatürde ekranlama etkisi olarak tanımlanan bu durum kestirimlerin hatalı olmasına yol açmaktadır [104, 113]. Deniz üstü bölgelerde adalara konuşlu olanlar dışından GPS alıcısı yoktur. Örnek olarak ızgara aralıkları bir derece olacak şekilde seçildiğinde bölge içinde bulunan tüm 80 örnek noktası seçilir. Aradeğerleme en iyi performansı uzayda ölçüm noktalarının tanımladığı çokgen yüzey içinde vermektedir. Bu nedenle örnek sayısı belirlenirken bölgeyi çerçeveleyen sınırlara en  $0.5^\circ$ 'den daha yakın istasyonlar korunmuştur. Böylece bölgeyi çerçeveleyen bir örnek noktası kümesi belirlenmiştir.

Belirlenen örnek noktaları Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Şekil 4.3a'da birinci modalite için kullanılan seyrek (6 örnek), Şekil 4.3b'de ikinci modalite için az (40 örnek), Şekil 4.3c'de orta (60 örnek), Şekil 4.3d'de sık örnekleme nokta sayısı olarak 80 sunulmuştur. Bölgenin sınırlarında yer alan noktalar korunmuştur. Örnek noktaları seçilirken korunan noktalar örnek sayısının artışı ile birlikte gösterilmiştir.

Konumda birinci modalite  $Z(\underline{x})$  ve ikinci modalite  $Y(\underline{x})$  olarak tanımlanmıştır. Birinci ve ikinci modalitenin konumda örnek sayısı ve dağılımına göre aradeğerleme başarımı incelenmiştir.

Daha önceki çalışmalarda karesel, üçgensel, beşgen ve altıgen biçimli ızgaralarda aradeğerleme başarımı incelenmiştir. Buna göre en az hata karesel ve üçgensel ızgara ile yapılan aradeğerlemede elde edilmiştir [27, 28]. Bu çalışmada leksikografik olarak dizinlenmiş düzgün



Şekil 4.3: Örnekleme noktaları, a) Birinci modalite, seyrek (6 örnek), İkinci modalite: b) az (40 örnek), c) orta (60 örnek), d) sık (80 örnek).

dikdörtgenel ızgara üzerindeki tüm kesişim noktalarındaki değerler kestirilmiştir. Bu ızgaranın tüm köşe ve kesişim noktalarında birinci ve ikinci modalite kestirimleri kullanılarak kestirim yüzeyleri oluşturulmuştur. Kestirim ve sentetik yüzeyler kullanılarak aradeğerleme başarımı Alt bölüm 4.4’de anlatılan hata metrikleri ile incelenmiştir.

#### 4.4 Başarım Kriterleri

Kestirim yüzeylerinden ve sentetik yüzeylerden alınan örnekler eşleştirilerek yüzeylerin hata metrikleri hesaplanmıştır. Hata metrikleri hesaplanmasında  $Z(\underline{x})$  ölçüm noktalarının tanımladığı çokgen çerçeve temel alınmıştır. Uzayda örnek noktası olmayan ve aradeğerleme yapılan bölgenin sınırlarına yakın noktalarda örnek noktası olmaması sebebi ile hata artmaktadır.

Izgara üzerinde kestirim yapılan leksikografik dizinlenmiş bir noktadaki kestirim  $\widehat{Z}_s(l)$  olarak tanımlanır. Sentetik yüzeyden ızgara üzerinde aynı noktadaki değer  $Z_s(l)$  olarak tanımlanır. Böylece tüm ızgara üzerinde ölçüm noktalarının tanımladığı çokgen çerçevede bulunan kestirim noktalarının sayısı  $N_l$  olarak ifade edilirse  $\underline{Z}_s$  ve kestirim noktaları  $\widehat{\underline{Z}}_s$  vektörleri  $N_l \times 1$  boyutlu olarak yazılabilir.

Kullanılan hata metriklerinden Eşitlik 4.18 ile L2 norm aşağıda verilmiştir.

$$L2N = \|\widehat{\underline{Z}}_s - \underline{Z}_s\| = \sqrt{\sum_{n_l=1}^{N_l} \left(\widehat{Z}_s(n_l) - Z_s(n_l)\right)^2} \quad (4.18)$$

Eşitlik 4.19 ve Eşitlik 4.20 ile verilen sırasıyla karekök ortalama hata ve düzgelenmiş karekök ortalama hatadır.

$$RMS = \frac{\|\widehat{\underline{Z}}_s - \underline{Z}_s\|}{\sqrt{N_l}} = \sqrt{\frac{1}{N_l} \sum_{n_l=1}^{N_l} \left(\widehat{Z}_s(n_l) - Z_s(n_l)\right)^2} \quad (4.19)$$

$$NRMS = \frac{\|\widehat{\underline{Z}}_s - \underline{Z}_s\|}{\|\underline{Z}_s\|} = \sqrt{\frac{\sum_{n_l=1}^{N_l} \left(\widehat{Z}_s(n_l) - Z_s(n_l)\right)^2}{\sum_{n_l=1}^{N_l} Z_s^2(n_l)}} \quad (4.20)$$

Eşitlik 4.21’de ortalama mutlak hata verilmiştir.

$$MAE = \frac{1}{N_l} \sum_{n_l=1}^{N_l} \left| \widehat{Z}_s(n_l) - Z_s(n_l) \right| \quad (4.21)$$

SKLD hesaplanması için kestirimler altında kalan alanın bire eşit olacak şekilde düzgelmesi gereklidir. Bunun için Eşitlik 4.22’de verilen düzgeleme işlevi kullanılabilir.

$$\underline{Z}_p = \underline{Z}_s \left( \sum_{n_l=1}^{N_l} Z_s(n_l) \right)^{-1} \quad (4.22)$$

Sentetik yüzeylerden alınan örnekler ve kestirimler düzgelendikten sonra SKLD Eşitlik 4.23’de verildiği şekilde hesaplanabilir.

$$SKLD = \sum_{n_l=1}^{N_l} \left( Z_p(n_l) \log \left( \frac{Z_p(n_l)}{\widehat{Z}_p(n_l)} \right) \right) + \sum_{n_l=1}^{N_l} \left( \widehat{Z}_p(n_l) \log \left( \frac{\widehat{Z}_p(n_l)}{Z_p(n_l)} \right) \right) \quad (4.23)$$

Örnek noktalarındaki ölçümlerin doğrusal ağırlıklandırılması ile leksikografik dizinlenmiş tüm ızgara noktalarındaki değerlerin kestirmede kullanılan aradeğerleme yöntemleri Altbölüm 4.5 ve Altbölüm 4.6 ’de anlatılmıştır.

#### 4.5 Ortalamasız Krigleme

Ortalamasız Krigleme (OKr) yöntemi  $Z(\underline{x})$  fonksiyonu ile gösterilen iyonküre parametrelerinin aradeğerlemesinde kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında kullanılan Ortalamasız Krigleme yöntemi [27, 105, 114] kaynaklarını temel alarak oluşturulmuştur. Aradeğerlemenin ilk aşamasında uzaklığın karesi ile ters ağırlıklandırma ikinci aşamada ise Ortalamasız Krigleme yöntemi olan iki aşamalı bir algoritma uygulandığı IONOLAB-MAP [105, 114] yöntemi temel alınmıştır. Bu çalışmada ise Ortalamasız Krigleme yöntemi arka arkaya iki aşamalı olarak kullanılmıştır. Krigleme yönteminde ölçüm noktaları arasında bulunan ilişkinin uzaklığa bağlı belirlenmesinde eşdeğişinti işlevleri ve jeofizikte yaygın olarak kullanılan yarı değişinti serimi kullanılmaktadır.

Uzay-zamanda  $Z(\underline{x})$  fonksiyonunun beklenen değeri ve değişintisi rassal değişken özellikleri gösterir [104]. Eşitlik 4.24 ve Eşitlik 4.25’de verilen eşitliklerde noktalar arasındaki uzaklığa bağlı olarak İkinci dereceden durağanlık koşullarına göre beklenen değer ve değişinti tanımlanmıştır [29]. İkinci dereceden durağan, eşdeğişinti fonksiyonu tanımlı  $Z(\underline{x})$  rassal alanı için jeofizikte değişintinin uzaklığa bağlı olarak tanımlandığı en çok kullanılan araç olan yarı değişinti serimi kullanılabilir:

$$E \{Z(x) - Z(x+h)\} = 0 \quad (4.24)$$

$$E \left\{ (Z(x) - Z(x+h))^2 \right\} = 2\gamma(h) \quad (4.25)$$

Yukarıdaki eşitliklerde  $x$  ve  $h$  sırasıyla konum ve Öklid mesafesidir. Eşitlik 4.25’de  $\gamma(h)$  yarı değişinti serimi fonksiyonunu ifade etmektedir.  $\gamma(h)$  fonksiyonunun deneysel yarı değişinti serimi kestirimi Eşitlik 4.26’da gösterildiği gibi hesaplanır. Yarı değişinti serimi, uzaysal benzerliğin uzaklık ile değişimi gösteren bir değişinti olarak tanımlanır. Yarı değişinti serimi kestirimi ve modellenmesi [27, 105]’de detaylı olarak anlatılmış olup bu çalışmada da kullanılmıştır. Yön bağımsız tek değişkenli olarak tanımlanan yarı değişinti serimi aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{n_h=1}^{N(h)} (Z(x_{n_h}) - Z(x_{n_h} + h))^2 \quad (4.26)$$

Eşitlik 4.26'da  $N(h)$  birbirinden  $h$  Öklid mesafesi uzaklıkta bulunan ölçüm çiftleri sayısını ifade etmektedir. Deneysel yarı değişinti serimine, aradeğerlemede kullanılabilmesi için bir yarı değişinti serimi modeli uyumlandırılmalıdır. Literatürde çeşitli yarı değişinti serimi modelleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada IONOLAB-MAP yönteminde kullanılan Matérn fonksiyonları uyumlandırılmıştır [105, 114]. Matérn fonksiyonlarının uyumlandırılmasında uzaysal ilinti uzaklık ile ters orantılı değiştiği için yakın noktalar daha fazla ağırlıklandırılmıştır.

$$\gamma_{ZZ}(h) = \begin{cases} 0 & , |h| = 0 \\ \rho_m + \zeta_m^2 \left( \frac{2h^\nu}{(2r)^\nu \Gamma(\nu)} K_\nu \left( \frac{h}{r} \right) \right) & , |h| > 0 \end{cases} \quad (4.27)$$

Yukarıdaki eşitlikte gösterilen Matérn fonksiyonunun külçe değeri  $\rho_m$ , kısmi eşik değeri  $\zeta_m$ , ölçüm noktaları arasındaki uzaklık  $|h|$  ve  $r$  ise yapısal uzaklıktır. Rassal değişkenler arasındaki uzaklığa bağlı ilişkinin sona erdiği nokta yapısal uzaklık olarak tanımlanır.  $K_\nu(\cdot)$  ise ikinci dereceden  $\nu$  mertebesinde düzenlenmiş Bessel fonksiyonunu ifade ederken,  $\Gamma(\cdot)$  Gamma fonksiyonudur. [105, 114] çalışmasında detaylandırılmış olan Eşitlik 4.26'da verilen deneysel yarı değişinti serimi fonksiyonları kestirilmiş ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ile deneysel yarı değişinti serimine en iyi uyumlandırılmış Eşitlik 4.27'de verilen Matérn fonksiyonunun parametreleri kestirilmiştir. Elde edilen kestirimler kullanılarak uyumlandırılmış yarı değişinti serimi fonksiyonu,  $\gamma(h)$  hesaplanmıştır. Uyumlandırılmış yarı değişinti serimlerinin tek değişkenli hali Ortalamasız Krigleme, iki değişkenli hali ise Eş-Krigleme yönteminde kullanılmıştır.

Ortalamasız Krigleme yönteminde rassal alanın beklenen değerinin sabit olduğu fakat bilinmediği kabul edilmektedir. Bu jeofiziksel aradeğerleme tekniğinde aradeğerleme yapılacak alan içinde bir noktanın değerinin kestirimi aynı alanda bulunan tüm ölçüm noktalarının doğrusal ağırlıklandırılmış toplamı olarak hesaplanmaktadır.

Krigleme yönteminin yansız olabilmesi için Eşitlik 4.28 sağlanmalıdır.

$$E \left\{ \widehat{Z}_s(l) - \sum_{n_z=1}^{N_z} w_{l;n_z} Z_{n_z}(x_{n_z}) \right\} = 0 \quad (4.28)$$

Yukarıdaki eşitlikte  $n_z$  noktasındaki Krigleme ağırlığı  $w_{l;n_z}$  olarak tanımlanır.



En iyi doğrusal yansız kestiricinin hata değışintisi:

$$\sigma_l^2 = E \left\{ \left( \widehat{Z}_s(l) - \sum_{n_z=1}^{N_z} w_{l;n_z} Z_{n_z}(x_{n_z}) \right)^2 \right\} \quad (4.29)$$

Buna göre Eşitlik 4.29 sağlanması için tüm Krigleme ağırlıkları  $\sum_{n_z=1}^{N_z} w_{l;n_z} = 1$  olmalıdır [112, 113]. Yukarıdaki eşitliğin çözümü ile en az hata değışintisini sağlayan yansız çözüme ait Krigleme ağırlıkları bulunabilir. Altbölüm 4.1'da anlatılan gösterim kullanılarak leksi-kografik dizinlenmiş noktalarda ölçüm değerlerinin ağırlıklandırılmış doğrusal toplamı

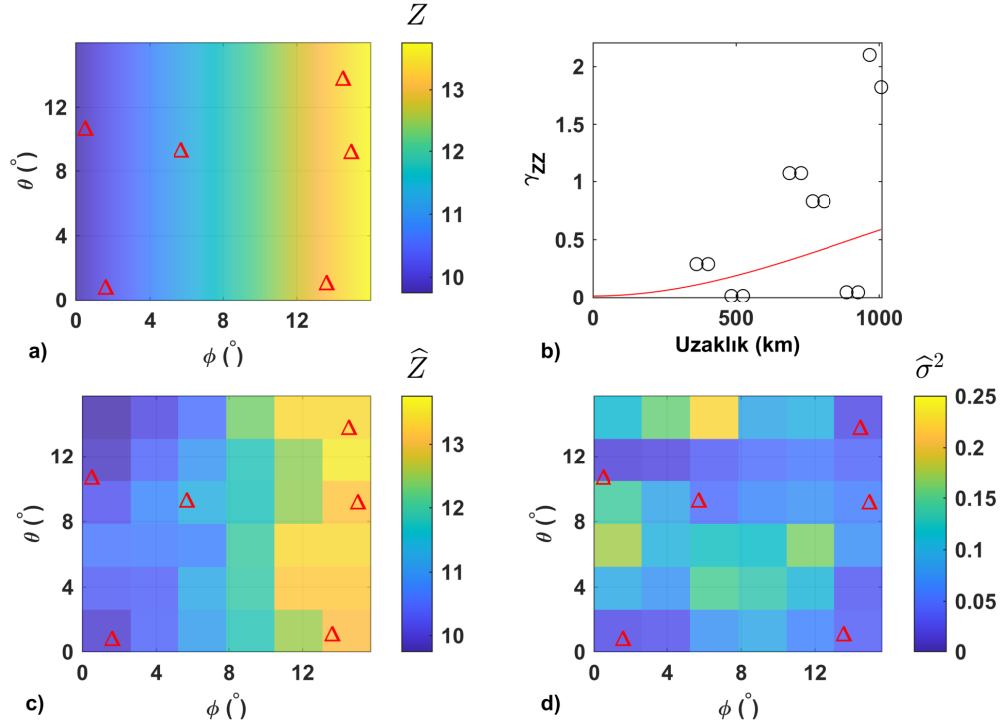
$$\widehat{Z}_s(l) = \sum_{n_z=1}^{N_z} w_{l;n_z} Z_{n_z}(x_{n_z}) \quad (4.30)$$

olarak yazılabilir. Yukarıdaki eşitlikte  $l$ . ızgara noktasında kestirim  $\widehat{Z}_s(l)$ ,  $N_z$  kestirim de kullanılan ölçüm noktalarının toplam sayısı ve  $w_{l;n_z}$  ise  $n_z$ . ölçüm noktasında ait Krigleme ağırlığıdır. Yukarıdaki eşitliklerde verilen  $l$ . ızgara noktasında kestirim  $\widehat{Z}_s(l)$ , tüm ızgara noktalarında hesaplanarak  $\theta$  ve  $\phi$ 'de iki boyutlu yüzey elde edilebilir.

Şekil 4.4'de örnek olarak düzlemsel yönsemeli sentetik yüzeyden seyrek örneklenmiş birinci modalite ve OKr aradeğerleme kestirimleri gösterilmiştir. Şekil 4.4a'da 6 örnek noktası, Şekil 4.4b'de deneysel yarı değışinti serimi ve uyumlandırılmış Matérn fonksiyonu sunulmuştur. Şekil 4.4c'de birinci modalite kestirim yüzeyi ve Şekil 4.4d'de ise kestirim değışintisi gösterilmiştir. Kestirim yüzeyinin çözünürlüğü  $2.62^\circ$  olarak bulunmuştur. Kestirim değışintisi en yüksek olduğu noktada  $0.18$ 'dir.

Verilen Şekil 4.4'de yüzey doğrusal olarak değışen bir yüzeydir. Örnek alınan noktalar doğrusal değışimi yaklaşık olarak örneklemede başarılı olmuştur. Diğer yandan yüzey değışiminin fazla olduğu veya yüzeyden alınan uzaysal örnekler ile değışimin yeterli örneklenemediği durumlarda aradeğerleme başarısız olmaktadır. Uzayda örnek noktalarının sıklığı ve yerleşimi son derece önemli olan aradeğerleme yöntemlerinde verilen örnekte görüldüğü gibi örnekleme sayısının az olduğu durumlarda aradeğerleme değışintisi artmaktadır.

Tüm sentetik yüzeyler kullanılarak aradeğerleme hata metrikleri incelendiğinde seyrek altı nokta için elde edilen hata metrikleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Sabit yüzey için tüm hata



Şekil 4.4: Katsayıları Çizelge 4.5’de verilmiş yüzey için OKr, a) Düzlemsel yönsemeli yüzey ve örnek noktaları b) yarı değışinti serimi  $\gamma_{ZZ}$  (Deneysel: mavi nokta, uyumlandırılmış Matérn fonksiyonu: kırmızı eğri), c) OKr ile kestirilmiş  $\hat{Z}$  yüzeyi, d) Kestirim değışintisi  $\hat{\sigma}^2$ .

metrikleri diğer yüzeylere göre küçüktür. Buna ek olarak düzlemsel yönsemelen sinüs biçimli yönsemeye kadar hata metriklerinde artış gözlenirse de merteye sınırlı kalmıştır. Birinci modalitenin Ortalamasız Krigleme yöntemi ile elde edilen hata metrikleri incelen-

Çizelge 4.2: Birinci modalite OKr hata metrikleri.

Sentetik yüzey	SKLD	L2N	RMS	NRMS	MAE	$\sigma_{RMS}^2$	Çözünürlük(°)
$Z_c$	$1.59 \times 10^{-17}$	$1.69 \times 10^{-9}$	$2.41 \times 10^{-10}$	$2.63 \times 10^{-11}$	$1.34 \times 10^{-10}$	$9.64 \times 10^{-9}$	2.62
$Z_p$	$5.31 \times 10^{-4}$	1.45	$2.07 \times 10^{-1}$	$2.66 \times 10^{-2}$	$9.42 \times 10^{-2}$	$8.81 \times 10^{-2}$	2.62
$Z_q$	$3.10 \times 10^{-4}$	1.47	$2.09 \times 10^{-1}$	$2.71 \times 10^{-2}$	$1.07 \times 10^{-1}$	$2.33 \times 10^{-3}$	2.62
$Z_g$	$9.35 \times 10^{-4}$	2.60	$3.72 \times 10^{-1}$	$4.33 \times 10^{-2}$	$2.03 \times 10^{-1}$	$1.75 \times 10^{-1}$	2.62
$Z_s$	$1.54 \times 10^{-2}$	7.90	1.13	$1.40 \times 10^{-1}$	$6.47 \times 10^{-1}$	$6.53 \times 10^{-1}$	2.62

diğinde yüzeyin değışkenliğı arttıkça hata metriklerinde artış gözlenmektedir. Sentetik yüzeydeki değışkenlik uzayda yeterli seviyede örneklemediğı için hata kestirim yüzeyler ile farklılıklar göstermektedir. İkinci modalitenin örnekleme düzenlerine göre hata metriklerinin incelenmesi için tüm sentetik yüzeyler Çizelge 4.3’de verilen katsayılar kullanılarak oluşt-

rulmuştur.

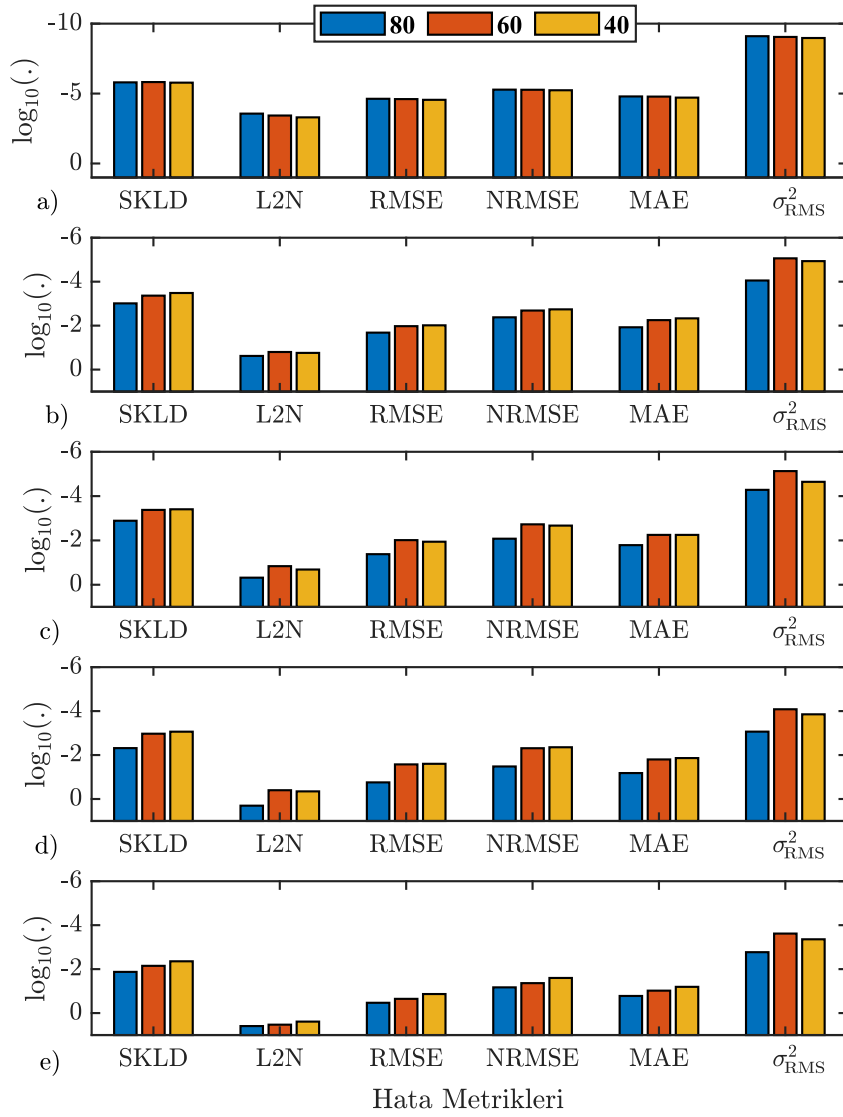
Çizelge 4.3: İkinci modalite için Eşitlik 4.13-Eşitlik 4.17’de tanımlı sentetik yüzeylerin oluşturulmasında kullanılan katsayılar.

Katsayılar	Sabit	Düzlemsel	Karesel	Gauss Biçimli	Sinüs Biçimli
$k_1$	32	32	32	32	32
$k_2$	—	0	-0.1863	16	16
$k_3$	—	1	0.0114	49	$-6.67 \times 10^{-3}$
$k_4$	—	—	0.0059	9.38	18.75
$k_5$	—	—	0.0385	4.33	13.33
$k_6$	—	—	—	12.16	10

İkinci modalite Altbölüm 4.3’de verilen örnekleme düzenleri kullanılarak Ortalamasız Kriglenmiştir. Artan örnek sayısına göre başarımların kriterleri olan hata metrikleri hesaplanmıştır. Hesaplanan hata metrikleri grafiksel olarak Şekil 4.5’de her bir sentetik yüzey için  $\log_{10}$  tabanında gösterilmiştir. Şekil 4.5a’da  $Y_c$  sabit yüzey en az hata değerlerini beklenildiği gibi göstermiştir. Şekil 4.5b’da  $Y_p$  düzlemsel yüzey hata metrikleri incelendiğinde hata seviyesinin orta örnek sayısından sonra önemli bir azalma gözlenmemiştir. Sırasıyla Şekil 4.5c’de  $Y_q$  karesel, Şekil 4.5d’de  $Y_g$  Gauss biçimli ve Şekil 4.5e’de  $Y_s$  sinüs biçimli sentetik yüzeyler için benzer olarak sık örnek sayısının orta örnek sayısına göre hatada önemli azalma meydana gelmemiştir.

Örnek sayısının artırılmasının işlemsel karmaşıklığı artırdığı da göz önüne alındığında kestirim yüzeylerinde elde edilen  $0.5^\circ$  çözünürlük değerinde kullanılan 60 örnek noktasının aradeğerleme için yeterli olduğu değerlendirilmiştir. Sentetik yüzeyler kullanılarak incelenen aradeğerleme performansının değerlendirilmesine örnek sayısının aradeğerleme bölgesinin alanına oranının %25’den fazla olmasının yeterli olduğu sonucunda varılmıştır.

Örnekleme noktaları ölçüm sistemlerine bağlı olduğundan sayısı ve yerlerinin değiştirilemediği göz önüne alınırsa örnek sayısının ve örnekleme düzeninin artırılması ikincil bir modalite kullanılarak yapılabilir. Bu durumda Ortalamasız Krigleme, konumda seyrek örneklerle sahip bir modalite ile konumda daha sık örneklerle sahip ikinci bir modalitenin birlikte kullanıldığı Eş-Krigleme yöntemine genişletilebilir. Konumda daha sık örnekleme yapılmış ikinci modalite kullanılarak aradeğerleme başarımları ve aradeğerleme çözünürlüğü artırılabilir. Altbölüm



Şekil 4.5: İkinci modalite için farklı örnekleme sayılarına göre  $\log_{10}$  tabanında hata metrikleri, a)  $Y_c$ , b)  $Y_p$ , c)  $Y_q$ , d)  $Y_g$ , e)  $Y_s$ .

4.6'da Eş-Krigleme ile aradeğerleme anlatılmıştır.

#### 4.6 IONOLAB-CK

Ortalamasız Krigleme yönteminin ikinci bir modalite eklenerek genişletilmesi ile Eş-Krigleme (EKr) yapılabilir. Bu yöntemde birinci modalite genellikle uzayda seyrek, ikinci modalite ise birinci modalite ile ilintili ve uzayda sık örneklenmiştir. Eş-Krigleme yönteminin uygulanabilmesi için literatürde Eş-Bölge tanımı yapılmıştır. Bu modele göre iki rassal alan bir bölge içinde uzaysal değişiminin ikinci dereceden durağanlık özelliklerini taşıması ge-

rekmedir [104, 119]. Tanımlanan iki modalite birbiri ile ilintili olarak aynı bölge içinde rassal alanı temsil edecek şekilde tanımlanabilir [119]. Jeostatistiksel kestirim yöntemlerinin maden ölçümlerine uygulanması ve farklı kaynakların aradeğerleme ile birleştirilmesi anlatılmıştır [120]. Literatürde Eş-Kriglemenin matris formunda oluşturularak genişletilmesi sağlanmıştır [121, 122]. Eş-Krigleme çözümünde iki kısıtı birleştirerek tek bir kısıt altında Lagrange açılımı ile eniyileme yapılması gösterildiği çalışmalar bulunmaktadır [70] Matris formunda gösterilen Eş-Krigleme genel olarak eşdeğişinti fonksiyonları kullanılarak hesaplanmıştır. Matris formunda eşdeğişinti fonksiyonları yerine yarı değişinti serimi kullanılarak Eş-Krigleme anlatılmıştır [113]. Literatürde yer alan çalışmalarda genel olarak jeofiziksel değişkenler üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

Seyrek örneklenmiş birinci modalitenin  $Z(\underline{x})$  istenen bölge içinde bir noktadaki değerinin kestiriminde, birinci modalite ile ilintili daha sık örneklenmiş ikinci modalite de  $Y(\underline{x})$  kullanılabilir. Eş-Krigleme yönteminde yarı değişinti serimi iki modalitenin arasında da hesaplanarak çapraz yarı değişinti serimi gerekmektedir. Eşitlik 4.26'da sadece  $Z(\underline{x})$  için verilen eşitliğin iki değişkenli olarak  $Y(\underline{x})$  kullanılarak hesaplanmasıdır.

$$\hat{\gamma}_{ZY}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{n_z=1}^{N(h)} \sum_{n_y=1}^{N(h)} (Z(x_{n_z}) - Y(x_{n_y} + h))^2 \quad (4.31)$$

Eşitlik 4.31'de  $N(h)$  birbirinden  $h$  uzaklıkta bulunan ölçüm çiftlerini ifade etmektedir. Deneysel yarı değişinti serimine Ortalamasız Krigleme yönteminde kullanılan Matérn fonksiyonları Eşitlik 4.27'de anlatıldığı gibi uyumlandırılmıştır [105].

Modalitelerin dinamik aralıkları ve genlikleri farklılık gösterebilir. Özellikle deneysel çapraz yarı değişinti serimi kestiriminde farklı dinamik aralıkta veriler yarı değişinti serimi uyumlandırılmasında hataya neden olabilir [104]. Bu nedenle Eş-Krigleme yapılmadan önce ölçümlerin benzer birimlere getirilmesi gereklidir [112]. Kestirim yapılacak birinci modalite  $Z(\underline{x})$  ve ikinci modalite ise  $Y(\underline{x})$  olarak gösterilmiştir. Buna göre Eşitlik 4.33 ikincil ölçüm tipinin birincil ölçümler ile benzer birime getirilmesi için kullanılabilir.

$$\tilde{Z}(\underline{x}) = \frac{Z(\underline{x}) - \mu_Z}{\sigma_Z} \quad (4.32)$$

$$\tilde{Y}(\underline{x}) = \frac{Y(\underline{x}) - \mu_Y}{\sigma_Y} \quad (4.33)$$

Eşitlik 4.33'de sırasıyla  $\mu_Z$  ve  $\mu_Y$  birinci ve ikinci modalitenin ortalamasıdır. Eşitlik 4.34 ve Eşitlik 4.35'de  $\mu_Z$  ve  $\mu_Y$  gösterilmiştir.

$$\mu_Z = \frac{1}{N_z} \sum_{n_z=1}^{N_z} Z_{n_z}(\underline{x}_{n_z}) \quad (4.34)$$

$$\mu_Y = \frac{1}{N_y} \sum_{n_y=1}^{N_y} Y_{n_y}(\underline{x}_{n_y}) \quad (4.35)$$

Yukarıdaki eşitlikte  $N_z$  ve  $N_y$  sırasıyla birinci ve ikinci modalitelerin toplam ölçüm sayısıdır. Eşitlik 4.33'de verilen  $\sigma_Z$  ve  $\sigma_Y$  ise sırasıyla birinci ve ikinci modalitelerin değişimlidir.

$$\sigma_Z = \sqrt{\frac{1}{N_z - 1} \sum_{n_z=1}^{N_z} (Z_{n_z}(\underline{x}_{n_z}) - \mu_Z)^2} \quad (4.36)$$

$$\sigma_Y = \sqrt{\frac{1}{N_y - 1} \sum_{n_y=1}^{N_y} (Y_{n_y}(\underline{x}_{n_y}) - \mu_Y)^2} \quad (4.37)$$

Krigleme yönteminin yansız olabilmesi için Eşitlik 4.38 sağlanmalıdır.

$$E \left\{ Z_s(l) - \left( \sum_{n_y=1}^{N_y} w_{l;n_y} \tilde{Y}_{n_y}(\underline{x}_{n_y}) + \sum_{n_z=1}^{N_z} w_{l;n_z} \tilde{Z}_{n_z}(\underline{x}_{n_z}) \right) \right\} = 0 \quad (4.38)$$

Buna göre Eş-Krigleme ağırlıklarının kısıtları hem birincil hem ikincil modalite için Eşitlik 4.39 ve Eşitlik 4.40'da gösterilmiştir [104, 113, 119].

$$\sum_{n_z=1}^{N_z} w_{l;n_z} = 1 \quad (4.39)$$

$$\sum_{n_y=1}^{N_y} w_{l;n_y} = 0 \quad (4.40)$$

Kestiricinin hata değişintisi Eşitlik 4.39 ve Eşitlik 4.40 ile verilen yansızlık kısıtları altında

en aza eniyilerek Eş-Krigleme ağırlıkları elde edilebilir. Kestirim hatasının değışintisi

$$\begin{aligned}
\sigma_l^2 = E \left\{ \right. & \sum_{n_z=1}^{N_z} w_{l;n_z} \left( Z_s^2(l) - 2Z_s(l)\tilde{Z}_{n_z}(\underline{x}_{n_z}) \right) \\
& + \sum_{n_y=1}^{N_y} w_{l;n_y} \left( Z_s^2(l) - 2Z_s(l)\tilde{Y}_{n_y}(\underline{x}_{n_y}) \right) \\
& - \sum_{n_y=1}^{N_y} \sum_{n_z=1}^{N_z} w_{l;n_y} w_{l;n_z} \tilde{Y}_{n_y}(\underline{x}_{n_y}) \tilde{Z}_{n_z}(\underline{x}_{n_z}) \\
& \left. + \left( \sum_{n_z=1}^{N_z} w_{l;n_z} \tilde{Z}_{n_z}(\underline{x}_{n_z}) \right)^2 + \left( \sum_{n_y=1}^{N_y} w_{l;n_y} \tilde{Y}_{n_y}(\underline{x}_{n_y}) \right)^2 \right\} \quad (4.41)
\end{aligned}$$

Yukarıdaki eşitlikte verilen terimler, Eşitlik 4.39 ve Eşitlik 4.40'da verilen kısıtlar ile Eşitlik 4.26'da gösterilen yarı değışinti serimi ve Eşitlik 4.31'de verilen çapraz yarı değışinti serimi fonksiyonları kullanılarak düzenlenirse

$$\begin{aligned}
\sigma_l^2 = & 2 \sum_{n_z=1}^{N_z} w_{l;n_z} \frac{E \left\{ \left( Z_s(l) - \tilde{Z}_{n_z}(\underline{x}_{n_z}) \right)^2 \right\}}{2} + 2 \sum_{n_y=1}^{N_y} w_{l;n_y} \frac{E \left\{ \left( Z_s(l) - \tilde{Y}_{n_y}(\underline{x}_{n_y}) \right)^2 \right\}}{2} \\
& - 2 \sum_{n_z=1}^{N_z} \sum_{n_y=1}^{N_y} w_{l;n_z} w_{l;n_y} \frac{E \left\{ \left( \tilde{Z}_{n_z}(\underline{x}_{n_z}) - \tilde{Y}_{n_y}(\underline{x}_{n_y}) \right)^2 \right\}}{2} \\
& - \sum_{n_z=1}^{N_z} \sum_{n_a=1}^{N_z} w_{l;n_z} w_{l;n_a} \frac{E \left\{ \left( \tilde{Z}_{n_z}(\underline{x}_{n_z}) - \tilde{Z}_{n_a}(\underline{x}_{n_a}) \right)^2 \right\}}{2} \\
& - \sum_{n_y=1}^{N_y} \sum_{n_b=1}^{N_y} w_{l;n_y} w_{l;n_b} \frac{E \left\{ \left( \tilde{Y}_{n_y}(\underline{x}_{n_y}) - \tilde{Y}_{n_b}(\underline{x}_{n_b}) \right)^2 \right\}}{2} \quad (4.42)
\end{aligned}$$

Yukarıdaki eşitliklerde verilen deneysel yarı değışinti ve deneysel çapraz yarı değışinti serimlerine Eşitlik 4.26 ve Eşitlik 4.31'de tanımlı sırasıyla  $\gamma_{\tilde{Z}\tilde{Z}}$  ve  $\gamma_{\tilde{Z}\tilde{Y}}$  kestirimleri yerlerine

konulduğunda

$$\begin{aligned}
\sigma_l^2 = & 2 \sum_{n_z=1}^{N_z} w_{l;n_z} \gamma_{\bar{Z}\bar{Z}}(l, \underline{x}_{n_z}) + 2 \sum_{n_y=1}^{N_y} w_{l;n_y} \gamma_{\bar{Z}\bar{Y}}(l, \underline{x}_{n_y}) \\
& - 2 \sum_{n_z=1}^{N_z} \sum_{n_y=1}^{N_y} w_{l;n_z} w_{l;n_y} \gamma_{\bar{Z}\bar{Y}}(\underline{x}_{n_z}, \underline{x}_{n_y}) \\
& - \sum_{n_z=1}^{N_z} \sum_{n_a=1}^{N_z} w_{l;n_z} w_{l;n_a} \gamma_{\bar{Z}\bar{Z}}(\underline{x}_{n_z}, \underline{x}_{n_a}) \\
& - \sum_{n_y=1}^{N_y} \sum_{n_b=1}^{N_y} w_{l;n_y} w_{l;n_b} \gamma_{\bar{Y}\bar{Y}}(\underline{x}_{n_y}, \underline{x}_{n_b})
\end{aligned} \tag{4.43}$$

olarak yazılabilir. Yukarıdaki eşitlikte  $n_a$  ve  $n_b$  toplam fonksiyonunun karesinin alınması sonucunda eklenen yardımcı değişkenlerdir. Eşitlik 4.43'de verilen  $\sigma_l^2$ , Eşitlik 4.39 ve Eşitlik 4.40'da verilen kısıtlar kullanılarak Lagrange fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$L(w_{l;n_z}, w_{l;n_y}, \lambda_1, \lambda_2) = \sigma_l^2 - 2\lambda_1 \left( \sum_{n_z=1}^{N_z} w_{l;n_z} - 1 \right) - 2\lambda_2 \sum_{n_y=1}^{N_y} w_{l;n_y} \tag{4.44}$$

Eşitlik 4.44'de verilen ifade  $w_{l;n_z}$ ,  $w_{l;n_y}$ ,  $\lambda_1$  ve  $\lambda_2$ 'ye göre kısmi türevleri alınarak sıfıra eşitlendiğinde sırasıyla

$$\begin{aligned}
\gamma_{\bar{Z}\bar{Z}}(l, \underline{x}_{n_z}) &= \sum_{n_a=1}^{N_z} w_{l;n_a} \gamma_{\bar{Z}\bar{Z}}(\underline{x}_{n_z}, \underline{x}_{n_a}) + \sum_{n_y=1}^{N_y} w_{l;n_y} \gamma_{\bar{Z}\bar{Y}}(\underline{x}_{n_z}, \underline{x}_{n_y}) + \lambda_1 \\
\gamma_{\bar{Z}\bar{Y}}(l, \underline{x}_{n_y}) &= \sum_{n_b=1}^{N_y} w_{l;n_b} \gamma_{\bar{Y}\bar{Y}}(\underline{x}_{n_y}, \underline{x}_{n_b}) + \sum_{n_z=1}^{N_z} w_{l;n_z} \gamma_{\bar{Z}\bar{Y}}(\underline{x}_{n_z}, \underline{x}_{n_y}) + \lambda_2 \\
\sum_{n_z=1}^{N_z} w_{l;n_z} &= 1 \\
\sum_{n_y=1}^{N_y} w_{l;n_y} &= 0
\end{aligned} \tag{4.45}$$

Yukarıdaki eşitliklerin matris formunda yazılması ile  $\gamma_{\bar{Z}\bar{Z}}$ ,  $\gamma_{\bar{Z}\bar{Y}}$ ,  $\gamma_{\bar{Y}\bar{Z}}$  ve  $\gamma_{\bar{Y}\bar{Y}}$  tanımlanırsa

$$\gamma_{\bar{Z}\bar{Z}} = \begin{bmatrix} \gamma_{\bar{Z}\bar{Z}}(\underline{x}_{n_1}, \underline{x}_{n_1}) & \cdots & \gamma_{\bar{Z}\bar{Z}}(\underline{x}_{n_1}, \underline{x}_{N_z}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{\bar{Z}\bar{Z}}(\underline{x}_{N_z}, \underline{x}_{n_1}) & \cdots & \gamma_{\bar{Z}\bar{Z}}(\underline{x}_{N_z}, \underline{x}_{N_z}) \end{bmatrix}_{(N_z \times N_z)} \tag{4.46}$$



$$\underline{\gamma}_{\tilde{Z}\tilde{Y}} = \begin{bmatrix} \gamma_{\tilde{Z}\tilde{Y}}(\underline{x}_{n_1}, \underline{x}_{n_1}) & \cdots & \gamma_{\tilde{Z}\tilde{Y}}(\underline{x}_{n_1}, \underline{x}_{N_y}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{\tilde{Z}\tilde{Y}}(\underline{x}_{N_z}, \underline{x}_{n_1}) & \cdots & \gamma_{\tilde{Z}\tilde{Y}}(\underline{x}_{N_z}, \underline{x}_{N_y}) \end{bmatrix}_{(N_z \times N_y)} \quad (4.47)$$

$$\underline{\gamma}_{\tilde{Y}\tilde{Z}} = \begin{bmatrix} \gamma_{\tilde{Y}\tilde{Z}}(\underline{x}_{n_1}, \underline{x}_{n_1}) & \cdots & \gamma_{\tilde{Y}\tilde{Z}}(\underline{x}_{N_z}, \underline{x}_{n_1}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{\tilde{Y}\tilde{Z}}(\underline{x}_{N_y}, \underline{x}_{n_1}) & \cdots & \gamma_{\tilde{Y}\tilde{Z}}(\underline{x}_{N_z}, \underline{x}_{N_y}) \end{bmatrix}_{(N_y \times N_z)} \quad (4.48)$$

$$\underline{\gamma}_{\tilde{Y}\tilde{Y}} = \begin{bmatrix} \gamma_{\tilde{Y}\tilde{Y}}(\underline{x}_{n_1}, \underline{x}_{n_1}) & \cdots & \gamma_{\tilde{Y}\tilde{Y}}(\underline{x}_{n_1}, \underline{x}_{N_y}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{\tilde{Y}\tilde{Y}}(\underline{x}_{N_y}, \underline{x}_{n_1}) & \cdots & \gamma_{\tilde{Y}\tilde{Y}}(\underline{x}_{N_y}, \underline{x}_{N_y}) \end{bmatrix}_{(N_y \times N_y)} \quad (4.49)$$

Eş-Krigleme ağırlıkları ve  $l$  dizinine göre uyumlandırılan çapraz yarı değişinti serimi fonksiyonları aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\underline{w}_{l;\tilde{Z}} = \left[ w_{l;\tilde{Z}}(1) \quad \cdots \quad w_{l;\tilde{Z}}(n_z) \quad \cdots \quad w_{l;\tilde{Z}}(N_z) \right]^T$$

$$\underline{w}_{l;\tilde{Y}} = \left[ w_{l;\tilde{Y}}(1) \quad \cdots \quad w_{l;\tilde{Y}}(n_y) \quad \cdots \quad w_{l;\tilde{Y}}(N_y) \right]^T$$

$$\underline{\gamma}_{l\tilde{Z}} = \left[ \gamma_{\tilde{Z}\tilde{Z}}(l, x_{n_1}) \quad \cdots \quad \gamma_{\tilde{Z}\tilde{Z}}(l, x_{N_z}) \right]^T$$

$$\underline{\gamma}_{l\tilde{Y}} = \left[ \gamma_{\tilde{Z}\tilde{Y}}(l, x_{n_1}) \quad \cdots \quad \gamma_{\tilde{Z}\tilde{Y}}(l, x_{N_y}) \right]^T$$

$$\underline{B}_v = \left[ 1 \quad \cdots \quad 1 \right]^T$$

$$\underline{S}_v = \left[ 0 \quad \cdots \quad 0 \right]^T$$

Yukarıda tanımlanan bütün matris ve vektörler kullanılarak matris eşitliği şeklinde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \left( \underline{\gamma}_{\tilde{Z}\tilde{Z}} \right)_{(N_z \times N_z)} & \left( \underline{\gamma}_{\tilde{Z}\tilde{Y}} \right)_{(N_z \times N_y)} & \left( \underline{B}_v \right)_{(N_z \times 1)} & \left( \underline{Z}_v \right)_{(N_z \times 1)} \\ \left( \underline{\gamma}_{\tilde{Y}\tilde{Z}} \right)_{(N_y \times N_z)} & \left( \underline{\gamma}_{\tilde{Y}\tilde{Y}} \right)_{(N_y \times N_y)} & \left( \underline{Z}_v \right)_{(N_y \times 1)} & \left( \underline{B}_v \right)_{(N_y \times 1)} \\ \left( \underline{B}_v \right)_{(1 \times N_z)} & \left( \underline{S}_v \right)_{(1 \times N_y)} & 0 & 0 \\ \left( \underline{S}_v \right)_{(1 \times N_z)} & \left( \underline{B}_v \right)_{(1 \times N_y)} & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\underline{\gamma}_l} \underbrace{\begin{bmatrix} \left( \underline{w}_{l;\tilde{Z}} \right)_{(N_z \times 1)} \\ \left( \underline{w}_{l;\tilde{Y}} \right)_{(N_y \times 1)} \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix}}_{\underline{w}_l} = \underbrace{\begin{bmatrix} \left( \underline{\gamma}_{l\tilde{Z}} \right)_{(N_z \times 1)} \\ \left( \underline{\gamma}_{l\tilde{Y}} \right)_{(N_y \times 1)} \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\underline{y}_l} \quad (4.50)$$

Yukarıdaki matris eşitliği ile en iyi yansız Eş-Krigleme ağırlıklarının kestirimi yapılabilir. Elde edilen Eş-Krigleme ağırlıkları kullanılarak Eşitlik 4.51'de  $\widehat{Z}_s(l)$  ile  $l$ . leksikografik dizin noktasının kestirimi ve Eşitlik 4.52'de  $\widehat{Z}_s(l)$  için Krigleme değışintisi  $\sigma_l^2$  bulunabilir.

$$\underline{w}_l = \underline{\gamma}_l^{-1} \underline{y}_l \quad (4.51)$$

$$\sigma_l^2 = \underline{y}_l^T \underline{w}_l \quad (4.52)$$

Eşitlik 4.53'de  $\widehat{Z}_s(l)$  leksikografik dizinlenmiş  $l$  noktasının değerin ölçüm noktalarının ağırlıklandırılmış toplamı ile elde edilen kestirimidir.

$$\widehat{Z}_s(l) = \sum_{n_z=1}^{N_z} w_{l;n_z} Z_{n_z}(\underline{x}_{n_z}) + \sum_{n_y=1}^{N_y} w_{l;n_y} Y_{n_y}(\underline{x}_{n_y}) \quad (4.53)$$

Eş-Krigleme ile aradeğerleme yapılması için iki aşamalı bir akış izlenmiştir. İlk aşamada birinci ve ikinci modalite Ortalamasız Kriglenmiştir. Sonraki aşamada ise Ortalamasız Kriglenmiş veriler kullanılarak hassas Eş-Krigleme yapılmıştır. Birinci aşamada kestirimin kaba (ing: coarse) ikinci aşamada ise hassas yapılması amaçlanmıştır. Böylece daha yüksek çözünürlük ve daha az kestirim değışintili yüzeyler elde edilmiştir. IONOLAB-CK olarak adlandırılan yöntem, Algoritma 4.1'de verilmiştir. IONOLAB-CK algoritmasında enlem ve boylam aralığı, tarih ve saat girdi olarak verildikten sonra, algoritma veritabanında istenen verilerin olmaması durumunda otomatik olarak gerekli veriler çevrimiçi indirilerek hazırladıktan sonra kestirim aşamasına geçmektedir. Elde edilen kestirim haritaları ve kestirim değışintilerini sunmaktadır.

---

**Algoritma 4.1** IONOLAB-CK Algoritması

---

**Girdiler:** Enlem ve boylam aralığı, tarih, saat

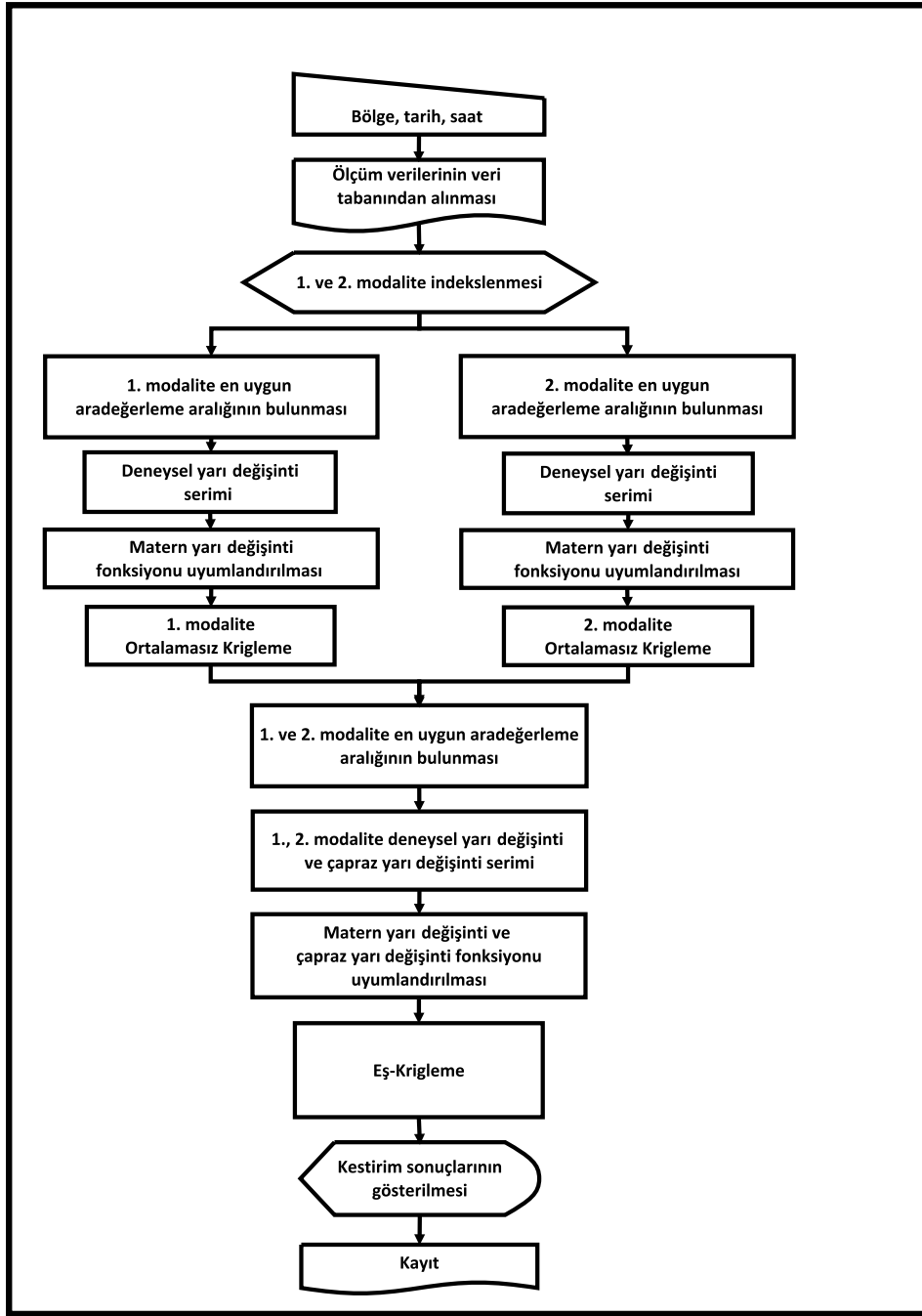
**Çıktılar:** Kestirim haritaları ve kestirim değışintileri.

1. Enlem ve boylam aralığı, tarih, saat aralığının girilmesi.
  2. Birinci modalite ve ikinci modalite Altbölüm 4.5'e göre Ortalamasız Krigleme
  3. Eş-Krigleme için en uygun aradeğerleme aralığının bulunması.
  4. Birinci ve ikinci modalite Eşitlik 4.26 deneysel yarı değışinti serimi ve Eşitlik 4.31 çapraz yarı değışinti serimlerinin kestirimi.
  5. Deneysel yarı değışinti serimi ve çapraz yarı değışinti serimlerine Eşitlik 4.27 Matérn fonksiyonu uyumlandırılması.
  6. Eşitlik 4.51 Eş-Krigleme ağırlıklarının ve Eşitlik 4.53 ızgara noktalarında Eş-Kriglenmiş birinci modalite kestirimi.
  7. Kestirim haritaları ve kestirim değışintilerinin gösterilmesi.
- 

IONOLAB-CK algoritması akış diyagramı Şekil 4.6'da verilmiştir. Algoritma girişlere göre otomatik olarak kestirimleri gerçekleştirerek kullanıcıya sunmaktadır. Bu bölümde anlatılan yöntemin başarımının incelenmesi için sentetik yüzeyler iyonkürenin yönsemelerine göre benzer ve farklı davranışa sahip modaliteler olarak oluşturulmuştur. Altbölüm 4.7'de sentetik yüzeylerden alınan örnekler, aradeğerleme yapıldıktan sonra sentetik yüzeyler ile karşılaştırılmıştır.

#### 4.7 IONOLAB-CK Yönteminin Sentetik Yüzeyler Kullanılarak İncelenmesi

Birinci ve ikinci modalite benzer davranışa sahip olabileceği gibi farklı yönsemelerde de oluşturulabilir. Sentetik yüzeyler oluşturulurken iyonküre yönsemelerine benzer senaryolar oluşturulmuştur. Buna göre birinci ve ikinci modalitenin benzer ve farklı yönsemeler gösterdiği sentetik yüzeyler kullanıldığı senaryoların hata metrikleri kullanılarak incelenmiştir. Belirlenen senaryolar iki ana grupta gösterilebilir. Bunlar *S* grubu birinci ve ikinci modalitenin aynı tip sentetik yüzey ile gösterildiği; *D* grubunda ise ikinci modaliteye küçük ölçekli farklı sentetik yüzey eklenmesi ile elde edilen senaryolardır. Benzer senaryoların gösterildiği



Şekil 4.6: IONOLAB-CK akış diyagramı.

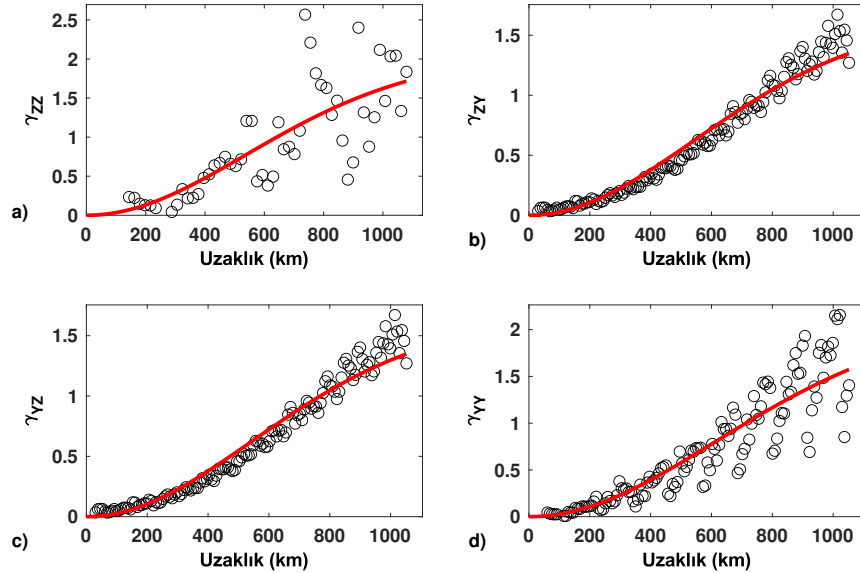
Çizelge 4.4'de kullanılan sentetik yüzeyler verilmiştir.

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de örnek olarak  $S_4$  senaryosu, düzlemsel yönsemeli sentetik yüzeyden seyrek örneklenmiş birinci modalite, orta (60 örnek) örneklenmiş ikinci modalite ve ikinci modalite yarı değişinti serimi ve çapraz yarı değişinti serimleri ile hassas IONOLAB-CK aradeğerleme kestirimleri gösterilmiştir. Şekil 4.7a'da birinci modalite, Şekil 4.7d'de ikinci modalite yarı değişinti serimleri verilmiştir. yarı değişinti serimleri noktalar arası ilintinin

Çizelge 4.4: Yüzey tiplerine bağlı senaryo tanımlamaları.

Senaryo	Z	Y
$S_1$	$Z_s$	$Y_s$
$S_2$	$Z_g$	$Y_g$
$S_3$	$Z_q$	$Y_q$
$S_4$	$Z_p$	$Y_p$
$S_5$	$Z_c$	$Y_c$

uzaklığa bağlı olarak değişimini göstermektedir. Buna göre daha az örnek sayısı ile elde edilen birinci modalite ilintisinin ikinci modalite ilintisine göre daha az olduğu gözlenmiştir. Bu durum örnek noktalarının uzaklıklarının ikinci modalite de daha az olması nedeni ile ilintinin daha iyi modellenmesi sağlamaktadır. Şekil 4.7b ve Şekil 4.7c’de ise çapraz yarı değişinti serimleri sunulmuştur. Çapraz yarı değişinti serimlerinde modalitelerin benzer yönsemelere sahip olmasının sonucu olarak uyumlandırmanın daha başarılı olduğu gözlenmiştir. Uyumlandırılan fonksiyonun kestirim yönsemesinin ortalama 300 km uzaklıktan sonra farklı olmasının sebebi yarı değişinti serimine Matérn fonksiyonu uyumlandırılmasında 300 km’ye kadar olan ölçümler ağırlıklandırılmasıdır.



Şekil 4.7:  $S_4$  senaryosu, düzlemsel yönsemeli sentetik yüzeyden seyrek örneklenmiş birinci modalite ve ikinci modalite yarı değişinti serimi ve çapraz yarı değişinti serimleri (deney-sel:mavi nokta, uyumlandırılmış Matérn fonksiyonu: kırmızı eğri), a)  $\gamma_{ZZ}$ , b)  $\gamma_{ZY}$ , c)  $\gamma_{YZ}$ , d)  $\gamma_{YY}$ .

Şekil 4.8’de örnek olarak düzlemsel yönsemeli sentetik yüzeyden seyrek örneklenmiş birinci modalite ve ikinci modalite hassas IONOLAB-CK aradeğerleme kestirimleri gösterilmiştir. Şekil 4.8’a da birinci modalite 6 örnek noktası, Şekil 4.8b’de ikinci modalite 60 örnek noktası sunulmuştur. Şekil 4.8c’de birinci modalite kestirim yüzeyi ve Şekil 4.8d’de ise kestirim değışintisi gösterilmiştir. Aradeğerleme çözünürlüğü ise  $2.62^\circ$  olarak bulunmuştur. Kestirim değışintisi en fazla 0.18 değerini almıştır. Şekil 4.8e’de birinci modalite IONOLAB-CK kestirim yüzeyi ve Şekil 4.8f’de kestirim değışintisi gösterilmiştir. IONOLAB-CK için aradeğerleme çözünürlüğü ise  $0.50^\circ$  olarak bulunmuştur. OKr ile karşılaştırıldığında çözünürlük yaklaşık olarak 5 kat artmıştır. Kestirim değışintisi ise  $10^{-2}$  mertebesindedir.

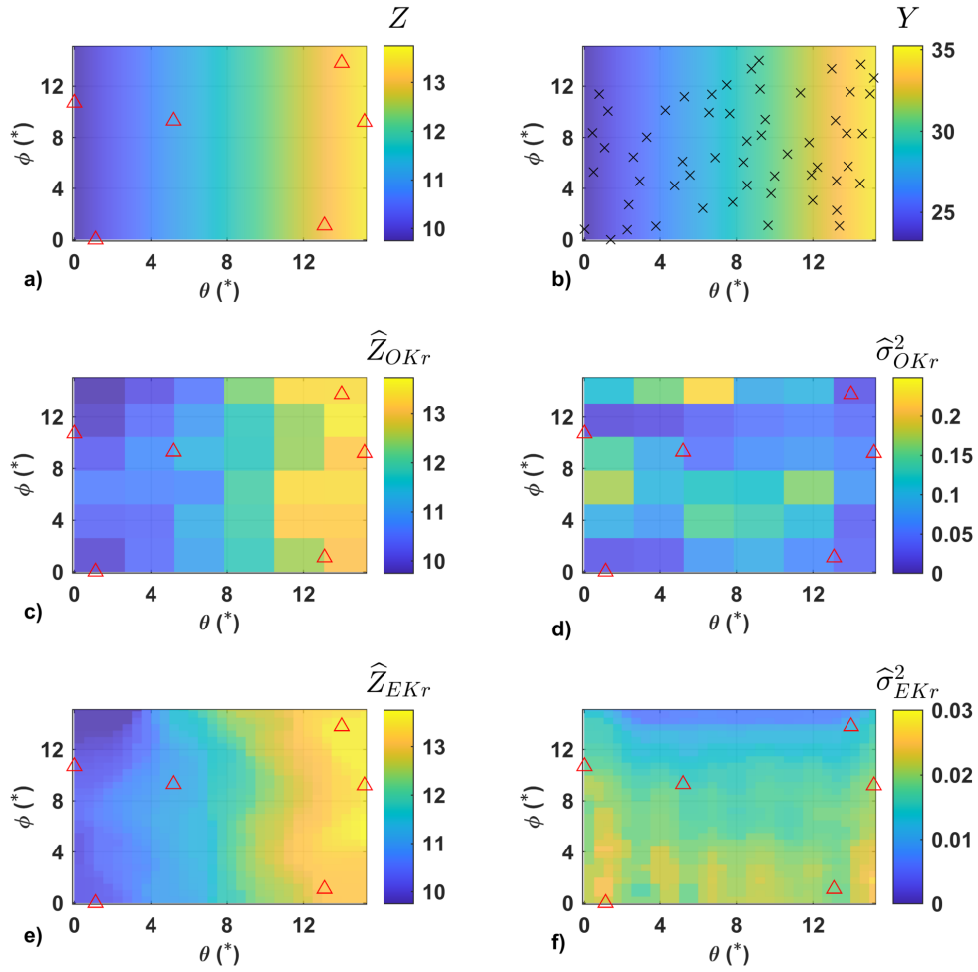
Verilen örnekte yüzey doğrusal olarak değışen bir yüzeydir. OKr ile ulaşılabilen çözünürlük seviyesi yeterli olduğu varsayılırsa ve seyrek örnek noktalarından alınan ölçümler yüzeyi iyi örnekleğiği durumda OKr ve IONOLAB-CK şekilsel olarak benzemektedir. IONOLAB-CK kestirimine katkısı birinci modalitenin örnek sayısının yüzeyi örneklemede yetersiz olduğu durumda ortaya çıkmaktadır. Bu durumda ikinci modalitenin eklenmesi ile hem çözünürlük hem de kestirim değışintisinde on kat azalmanın gözlemlendiği önemli iyileşme gözlenmektedir.

Çizelge 4.5’de verilen katsayılar kullanılarak birinci modalite oluşturulmuştur. İkinci modalite için Bölüm 4.5’de verilen katsayılar kullanılmıştır.

Çizelge 4.5: EKr için birinci modalite Eşitlik 4.13-Eşitlik 4.17’de tanımlı sentetik yüzeylerin oluşturulmasında kullanılan katsayılar.

Katsayılar	Sabit	Düzlemsel	Karesel	Gauss Biçimli	Sinüs Biçimli
$k_1$	8	8	8	8	8
$k_2$	—	0	$-0.47 \times 10^{-1}$	4	4
$k_3$	—	0.25	$0.28 \times 10^{-2}$	49	$-6.67 \times 10^{-3}$
$k_4$	—	—	$0.18 \times 10^{-2}$	9.38	18.75
$k_5$	—	—	$0.96 \times 10^{-2}$	4.33	13.33
$k_6$	—	—	—	12.16	10

İkinci modaliteye eklenen küçük ölçekli farklı sentetik yüzey ise Çizelge 4.6’de verilen katsayılar kullanılarak hesaplanmıştır. İkinci modaliteye eklenen küçük ölçekli değışim için oluşturulan sentetik yüzeyde yanlılık  $k_1 = 0$  olduğu için aşağıdaki çizelgede gösterilmemiştir. Çizelge 4.6’de gösterilen katsayılar ve Eşitlik 4.12 ikinci modalite için yazıldığında ikinci



Şekil 4.8:  $S_4$  senaryosu, a) Düzlemsel yönsemeli yüzey ve birinci modalite örnek noktaları, b) Düzlemsel yüzey ve ikinci modalite örnek noktaları, c) OKr Kestirim yüzeyi,  $\hat{Z}_{OKr}$  kestirim yüzeyi, d) OKr kestirim değışintisi,  $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , e) EKr kestirim yüzeyi,  $\hat{Z}_{EKr}$ , f) EKr kestirim değışintisi,  $\hat{\sigma}_{EKr}^2$ .

modaliteye eklenen küçük ölçekli değışimi ifade eden yüzeylerin katsayılarıdır.

Öncelikle her iki modalitenin benzer yönsemeye sahip olduğu yüzeyler incelenmiştir. Her bir yüzey için birinci ve ikinci modalite aynı yönsemeye farklı dinamik aralıkta oluşturulan yüzeyden örneklenerek hata metrikleri incelenmiştir.

Çizelge 4.7’de IONOLAB-CK benzer senaryolardan hesaplanan hata metrikleri sunulmuştur. Karar verilen orta (60 örnek) örnek sayısı kullanılarak çözünürlük  $0.50^\circ$  olarak bulunmuştur. Şekilsel benzerliğin en önemli göstergelerinden biri olan SKLD  $S_5$  senaryosunda  $10^{-18}$

Çizelge 4.6: İkinci modaliteye eklenen küçük ölçekli yönsemelerin Eşitlik 4.13-Eşitlik 4.17’de tanımlı fonksiyonlar ile oluşturulmasında kullanılan katsayılar.

Katsayılar	Sabit	Düzlemsel	Karesel	Gauss Biçimli	Sinüs Biçimli
$k_2$	–	0	$-0.94 \times 10^{-1}$	8	8
$k_3$	–	0.5	$0.56 \times 10^{-2}$	49	$-6.67 \times 10^{-3}$
$k_4$	–	–	$0.36 \times 10^{-2}$	9.38	18.75
$k_5$	–	–	$0.19 \times 10^{-1}$	4.33	13.33
$k_6$	–	–	–	12.16	10

mertebede değerler almıştır. Bu değer sabit yüzeyler kullanıldığından diğer senaryolardan oldukça azdır.  $S_2$ ,  $S_3$  ve  $S_4$  senaryolarında gözlenen SKLD benzer seviyede iken  $S_1$  senaryosu sinüs biçimli en fazla değişkenlik içeren yüzeyde daha yüksektir.

Çözünürlüğün artması ile birlikte hata metriği hesaplanmasında kullanılan nokta sayısı arttığından L2N metriğinde artış gözlenmiştir.  $S_5$  senaryosunda en az değeri olan  $8.81 \times 10^{-9}$  değerinden  $S_1$  senaryosunda 39.0 değerine ulaşmıştır. Değişkenliğin önemli bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir.

Elde edilen RMS, NRMS ve MAE değerleri karşılaştırıldığında sabit  $S_5$  senaryosu hariç olmak üzere diğer tüm senaryolarda  $10^{-1}$  mertebesinde değerler gözlenmiştir. Kestirim hatalarının yüzey değişkenliği ile artışı oldukça sınırlı kalmıştır.

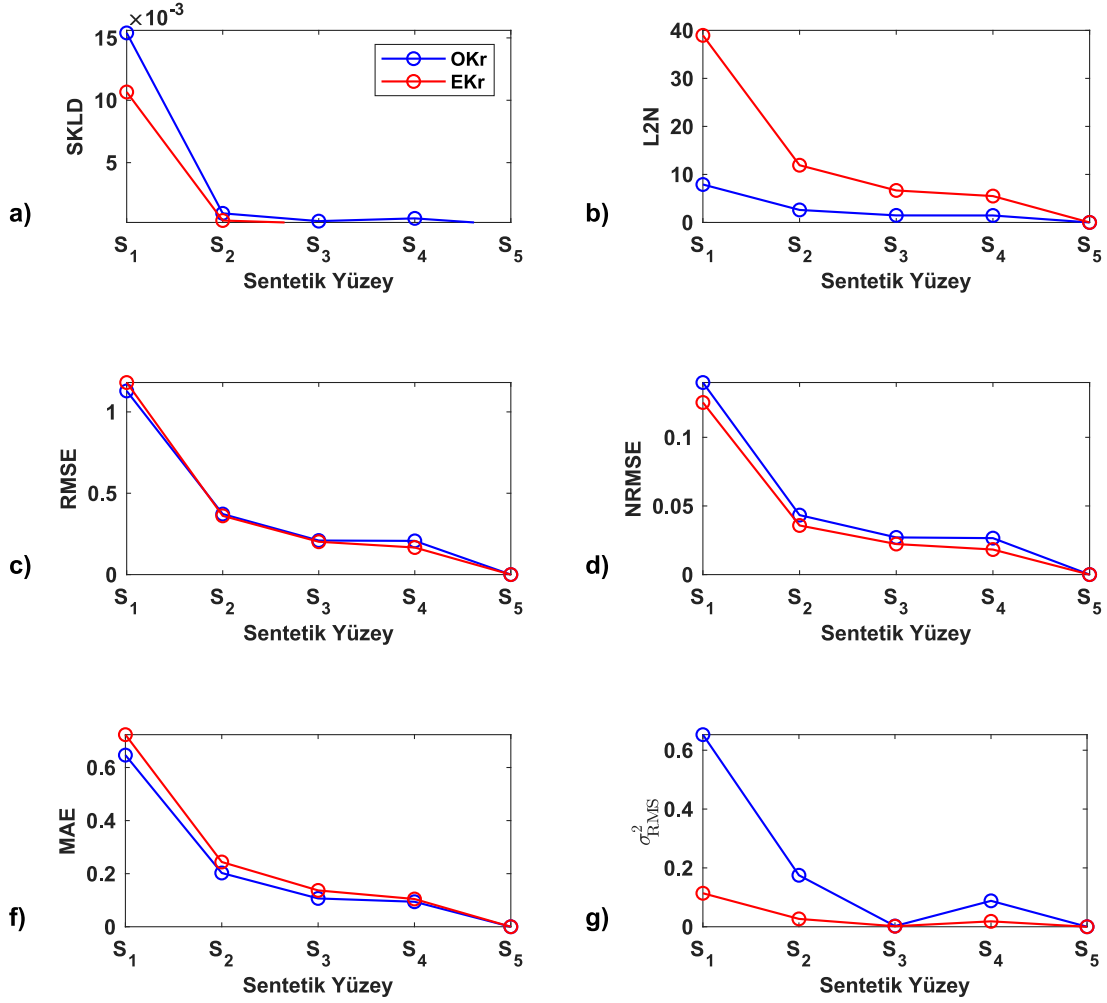
Çizelge 4.2’de verilen OKr hata metrikleri ile karşılaştırıldığında öncelikle çözünürlükte gözlenen yaklaşık beş kat artış dikkati çekmektedir.  $S_5$  senaryosunda verilen sabit yönseme ile karşılaştırıldığında OKr hata seviyesi bütün metriklerde daha azdır. Bunun nedeni öncelikle sadece OKr’nin ölçüm noktalarında doğrudan ölçümün değerini kestirmesidir. L2N metriği diğer senaryolarda daha fazla değerler almıştır. Diğer yandan  $\sigma_{RMS}^2$  değeri ise IONOLAB-CK senaryolarında OKr’ye göre oldukça az bulunmuştur.

Benzer senaryolar kapsamında dikkat edilmesi gereken en önemli noktaların başında yüzeyler arasındaki ilintinin yüksek seviyede olmasıdır. Şekil 4.9’da benzer senaryolar için hesaplanan hata metrikleri sunulmuştur. Gösterilen şekilde  $S_1$  senaryosu hariç SKLD, RMSE, NRMSE, MAE değerleri birbirlerine yakın değerler almıştır.



Çizelge 4.7: Benzer senaryolar EKr aradeğerleme hata metrikleri.

Sentetik yüzey	SKLD	L2N	RMS	NRMS	MAE	$\sigma_{RMS}^2$	Çözünürlük(°)
$S_1$	$1.07 \times 10^{-2}$	39.0	1.18	$1.25 \times 10^{-1}$	$7.24 \times 10^{-1}$	$1.14 \times 10^{-1}$	0.50
$S_2$	$3.60 \times 10^{-4}$	11.9	$3.61 \times 10^{-1}$	$3.58 \times 10^{-2}$	$2.44 \times 10^{-1}$	$2.67 \times 10^{-2}$	0.50
$S_3$	$1.17 \times 10^{-4}$	6.66	$2.02 \times 10^{-1}$	$2.23 \times 10^{-2}$	$1.37 \times 10^{-1}$	$1.74 \times 10^{-3}$	0.50
$S_4$	$1.68 \times 10^{-4}$	5.49	$1.66 \times 10^{-1}$	$1.83 \times 10^{-2}$	$1.05 \times 10^{-1}$	$1.84 \times 10^{-2}$	0.50
$S_5$	$4.62 \times 10^{-18}$	$8.81 \times 10^{-9}$	$2.67 \times 10^{-10}$	$2.47 \times 10^{-11}$	$1.70 \times 10^{-10}$	$6.70 \times 10^{-10}$	0.50



Şekil 4.9: Benzer senaryolar hata metrikleri, a) SKLD, b) L2N, c) RMSE, d) NRMSE, e) MAE, f)  $\sigma_{RMS}^2$ .

Birinci ve ikinci modalitenin farklı tipte sentetik yüzeyler olduğu durumun incelendiği farklı senaryolar Çizelge 4.8’de verilmiştir. Farklı senaryolar iyonkürenin yönsemelerine benzer şekilde ikinci modaliteye küçük ölçekli farklı bir sentetik yüzey eklenmesi ile elde edilen senaryolardır.

Çizelge 4.8: Yüzey tiplerine bağlı senaryo tanımlamaları.

Senaryo	Z	Y
$D_1$	$Z_g$	$Y_g + Y_s$
$D_2$	$Z_q + Z_g$	$Y_q$
$D_3$	$Z_q$	$Y_q + Y_s$
$D_4$	$Z_q$	$Y_q + Y_g$
$D_5$	$Z_p + Z_g$	$Y_p$
$D_6$	$Z_p$	$Y_p + Y_s$
$D_7$	$Z_p$	$Y_p + Y_g$

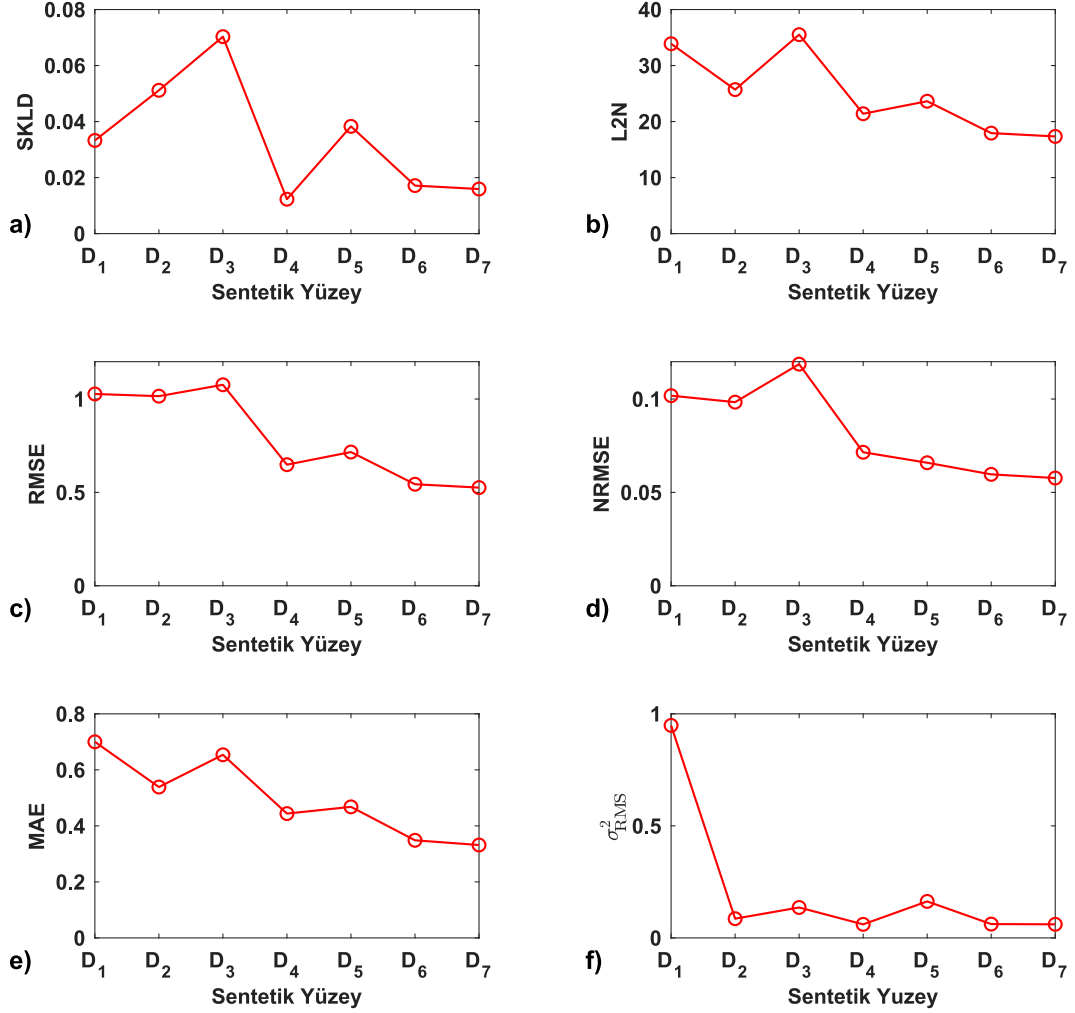
Çizelge 4.9’da IONOLAB-CK için farklı senaryolardan hesaplanan hata metrikleri sunulmuştur. Orta (60 örnek) örnek sayısı kullanılarak çözünürlük  $0.50^\circ$  olarak bulunmuştur. Her bir yüzey için birinci ve ikinci modalite farklı yönsemede farklı dinamik aralıkta oluşturulan yüzeyden örneklenerek hata metrikleri incelenmiştir. Şekilsel benzerliğin en önemli göstergelerinden biri olan SKLD metriği ikinci sentetik yüzeye Gauss ve sinüs biçimli küçük ölçekli yönsemeler eklendiği durumda en fazla  $D_3$  senaryosunda  $7.03 \times 10^{-3}$  olarak bulunmuştur. Diğer yandan küçük ölçekli yönsemenin birinci sentetik yüzeye eklendiği durumda da SKLD seviyeleri benzer değerlerde kalmıştır. L2N metriği benzer sentetik yüzeye sahip senaryolardan yüksek fakat her iki yüzeye de eklenen küçük ölçekli yönsemeler L2N seviyesi benzer ve sınırlı kalmıştır. RMS metrikleri tüm senaryolarda en yüksek 1.03 seviyesine ulaşmıştır. NRMS ve MAE metriklerinde elde edilen değerler sınırlı ve benzer mertebededir.

Çizelge 4.9: Farklı senaryolar hata metrikleri, a) SKLD, b) L2N, c) RMSE, d) NRMSE, e) MAE, f)  $\sigma_{RMS}^2$ .

Sentetik yüzey	SKLD	L2N	RMS	NRMS	MAE	$\sigma_{RMS}^2$	Çözünürlük( $^\circ$ )
$D_1$	$3.33 \times 10^{-3}$	33.9	1.03	$1.02 \times 10^{-1}$	$7.00 \times 10^{-1}$	$9.48 \times 10^{-1}$	0.50
$D_2$	$5.12 \times 10^{-3}$	25.7	1.02	$9.83 \times 10^{-2}$	$5.39 \times 10^{-1}$	$8.58 \times 10^{-2}$	0.50
$D_3$	$7.03 \times 10^{-3}$	35.5	1.08	$1.19 \times 10^{-1}$	$6.54 \times 10^{-1}$	$1.36 \times 10^{-1}$	0.50
$D_4$	$1.23 \times 10^{-3}$	21.4	$6.48 \times 10^{-1}$	$7.15 \times 10^{-2}$	$4.4 \times 10^{-1}$	$6.05 \times 10^{-2}$	0.50
$D_5$	$3.83 \times 10^{-3}$	23.6	$7.16 \times 10^{-1}$	$6.59 \times 10^{-2}$	$4.68 \times 10^{-1}$	$1.63 \times 10^{-1}$	0.50
$D_6$	$1.71 \times 10^{-3}$	17.9	$5.44 \times 10^{-1}$	$5.97 \times 10^{-2}$	$3.48 \times 10^{-1}$	$6.18 \times 10^{-2}$	0.50
$D_7$	$1.59 \times 10^{-3}$	17.3	$5.26 \times 10^{-1}$	$5.77 \times 10^{-2}$	$3.32 \times 10^{-1}$	$6.07 \times 10^{-2}$	0.50

Farklı senaryolar kapsamında dikkat edilmesi gereken en önemli noktaların başında yüzeyler

arasındaki ilintinin benzer senaryolara oranla azalmasıdır. İlintinin azalması ikinci modalitenin kestirim başarımına etkisinin azalmasına neden olmaktadır. Şekil 4.10'da farklı senaryolar için hesaplanan hata metrikleri sunulmuştur.



Şekil 4.10: Farklı senaryolar hata metrikleri, a) SKLD, b) L2N, c) RMSE, d) NRMSE, e) MAE, f)  $\sigma_{RMS}^2$ .

IONOLAB-CK başarımının gözlenmesi amacı ile benzer ve farklı yönsemeli senaryolar oluşturulmuştur. Senaryoların başarımı hata metrikleri kullanılarak incelenmiştir. Öncelikle hem birinci hem de ikinci modalite için bölge içinde örnek alınan noktaların yerleri azami öneme sahiptir. Modalitenin değişintisinin yeterli örneklenemediği durumda aradeğerleme başarısız olmaktadır. Örnekleme düzeni her yönde ve eşit uzaklıkta bulunduğu durumda aradeğerleme hatası azalmaktadır. Bu çalışmada örnekleme düzeni iyonosonda ve GPS alıcısı konumlarından yararlanılarak oluşturulmuştur. Her iki ölçüm sistemi de sınırlı sayıda istasyona sahiptir. Bu nedenle örnekleme sayısı ve düzeni üzerinde bir sınır bulunmaktadır.

OKr ikinci modalitenin farklı örnekleme sayılarına uygulanarak ikinci modalite için işlem- sel yükü azaltarak hata seviyesini belirli bir platoda tutmaya başlayan değer olarak 60 örnek seçilmiştir. Örnek sayısının daha fazla artırılması çözünürlük seviyesinde az ve orta örnek sayısındaki artış gibi kayda değer artış sağlamaması sebebi ile 60 örnek sayısı öne çıkmıştır.

Benzer senaryoların hata metrikleri açısından değerlendirildiğinde her iki modalite de benzer davranışta olduğu durumda noktalar arasındaki uzaysal ilinti yüksek olup ve başarı ile modelenebilmektedir. Bu durumda ikinci modalite için daha az örnek sayısında dahi kestirim değışintisi azalmaktadır.

İki modalitenin farklı davranışta olduğu durumda ise uzaysal ilinti azalmaktadır. Uzaysal ilintinin azalması durumunda ikinci modalitenin örnek sayısının artırılması ilintiye pozitif etki etmektedir. Dolayısıyla hata metriklerinde azalma gözlenmiştir. Bu nedenle işlem gücü de dikkate alınarak ikinci modalitenin seçilen 60 örnek noktasının kullanılması ile kestirim sonuçlarının başarımının yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.

Hata metriklerinde gözlenen azalma örnekleme düzeni ve kullanılan sentetik yüzeyin duru- muna göre daha da iyileşebilir. Buna ek olarak yüzeylerin değışim seviyelerinin arttığı böl- gelerde örnek alınma yapısının düzeni de aradeğerlemeyi etkilemektedir. Yönsmeler farklı- laştığı durumda ikinci modalitenin örnek sayısının ve düzgün dağılımının önemi ortaya çık- maktadır. Örnek sayısının ve örnekleme düzeninin bütün alanı mümkün olduğunca düzgün ve birbirine çok yakın noktalar bulunması durumunda bunlardan uygun olanı seçecek şekilde belirlenmelidir. Bunun için bu çalışma da yer verilen sistematik örnekleme kullanılabilir.

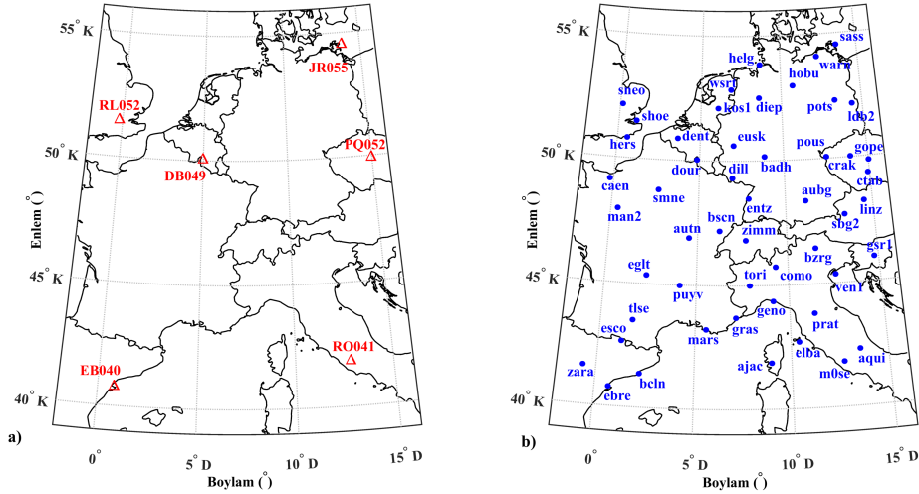
Çözünürlük açısından değerlendirildiğinde en yüksek çözünürlüğe bu çalışmada kullanılan örnekleme sayıları ve konumları ile IONOLAB-CK 0.50°'ye ulaşmıştır. Ortalamasız Krig- leme çözünürlüğü ise 2.62° olmuştur. IONOLAB-CK ile hata sınırlı kalarak çözünürlük yak- laşık 5 kat artmıştır.

Yürütülen çalışmalar kapsamında IRI-Plas modelinin girdilerinin iyonosonda konumlarında ölçülmüş foF2 verileri ve IONOLAB-CK kestirimleri ile noktasal olarak güncellendiği so- nuçlar COSPAR 2018 konferanslarında sunulmuştur [123]. Sentetik yüzeyler kullanılarak yapılan aradeğerleme çalışmaları ve elde edilen sonuçlar ise COSPAR 2021 konferansında sunulmuştur [124].

#### 4.8 İyonküre Ölçümleri Rassal Aradeğerleme Uygulanması

IONOLAB-CK yöntemi, foF2'nun çözünürlüğünün TEİ ile aynı seviyeye getirilmesinde ve katman kalınlığı hesaplanmasında kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan sentetik birinci modalite iyonküre parametrelerinden foF2 ve sentetik ikinci modalite de TEİ olarak kullanılmıştır. Sentetik yüzeyler kullanılarak elde edilen hata metrikleri birinci modalite uzayda yeterli örnek alınmadığı durum başta olmak üzere IONOLAB-CK yönteminin Ortalamasız Krigleme yöntemine göre başarımının daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

Konumda 40°K-55°K enlemleri ve -1°D-15°D boylamları arasında bulunan iyonosonda ve GPS alıcısı konumları Şekil 4.11'de verilmiştir. Bu ölçüm noktalarından elde edilen foF2 ve TEİ ölçümleri iyonkürenin farklı durumlarında Eş-Kriglenmiştir. İyonosonda ve GPS alıcısı koordinatları Çizelge EK-A'da tablo halinde gösterilmiştir.



Şekil 4.11: Örnek ölçüm noktaları, a) İyonosonda, b) GPS alıcısı konumları.

Çizelge 4.10'de verilen sakin, normal ve bozulmalı günlerden elde edilen günün farklı zamanlarına ait foF2 ve TEİ verileri kullanılarak katman kalınlığı haritaları elde edilmiştir.

Şekil 4.12'de  $A_{s1}$  olarak verilen 05 Ekim 2012 sakin gün ve 1200 GS için Ortalamasız Krigleme ve IONOLAB-CK kestirim haritaları katman kalınlığı haritaları ile birlikte gösterilmiştir. Şekil 4.12a'da foF2 verileri altı adet iyonosondadan alınmıştır. Şekil 4.12b ve Şekil 4.12c'de sırasıyla foF2 için OKr kestirimi ve kestirim değışintisi gösterilmiştir.

OKr kullanılarak altı örnek noktadan alınan verilerin aradeğerlenmesi sonucunda enlem

Çizelge 4.10: EKr yönteminin uygulandığı örnek günler ve belirlenen gün ve saatlerdeki Kp, Dst indisleri.

Uygulama	İyonküre Durumu	Tarih	Saat (GS)	Kp	Dst (nT)
$A_{s1}$	Sakin	05 Ekim 2012	1200	1	-2
$A_{s2}$	Sakin	02 Haziran 2014	1230	0	12
$A_{n1}$	Normal	12 Mart 2012	1500	1	-5
$A_{n2}$	Normal	28 Ekim 2014	1800	2	-24
$A_{b1}$	Bozulmalı	19 Şubat 2014	0900	5	-98
$A_{b2}$	Bozulmalı	17 Mart 2015	1200	8	-44

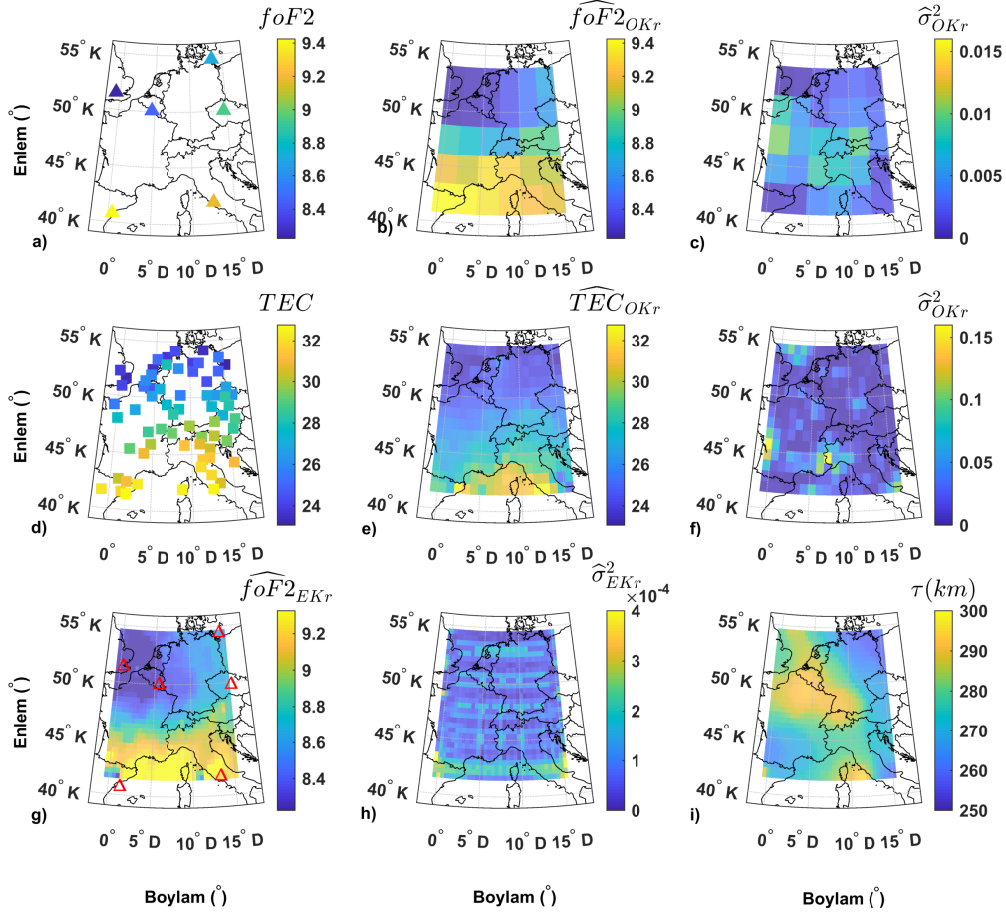
ve boylamda elde edilen  $2.62^\circ$  çözünürlük tüm gün ve saatler için aynıdır. Elde edilen çözünürlük değeri sadece birinci modalite olan foF2 kullanılarak OKr ile erişilebilen değerdir. IONOLAB-CK ile hem çözünürlük hem de kestirim başarımının artması beklenmektedir.

Örnek noktalarının dinamik aralığı foF2 için sakın gün ve öğle saatlerinde 1.2 MHz'dir. Şekil 4.12c'de verilen aradeğerleme değişikliği en yüksek 0.016 MHz olarak bulunmuştur. Şekil 4.12d'de TEİ verileri ve Şekil 4.12e, Şekil 4.12f'de ise sırasıyla 60 örnek noktası kullanılarak TEİ verilerinin OKr kestirimi ve kestirim değişikliği gösterilmiştir. TEİ verileri sakın gün ve gündüz 1200 GS saatinde 8 TECU dinamik aralığa sahiptir. TEİ'nin Ortalamasız Kriglenmesi sonucunda elde edilen Krigleme değişikliği en yüksek noktasına haritanın sınır ve örnek olmayan noktalarında ulaşmıştır. Örnek noktalarının tanımladığı çokgen içinde kalan bölge içinde ortalama olarak 0.15 TECU'dur.

Şekil 4.12f'de birinci modalite olan foF2'nun IONOLAB-CK kestirim sonuçları ve Şekil 4.12g'de de IONOLAB-CK kestirim değişikliği verilmiştir. Öncelikle IONOLAB-CK sonucunda aradeğerleme çözünürlüğü enlem ve boylamda  $0.50^\circ$  elde edilmiştir. Şekil 4.12g'de verilen Krigleme değişikliği genel olarak  $4 \times 10^{-4}$  MHz olarak bulunmuştur. Bu değer foF2'nun OKr ile elde edilen değerlerin ortalama 20 kat daha azdır. Hem kestirim değişikliğinde on kat hem de çözünürlükte beş kat artış TEİ verileri kullanıldığı IONOLAB-CK uygulanarak elde edilmiştir.

$A_{s1}$  uygulaması sentetik yüzeyler ile hesaplanan  $S_2$  senaryosunda incelenen foF2 ve TEİ'nin düzlemsel yönsemeli yüzeyler kullanıldığı durum ile benzerlik göstermektedir. Şekil 4.12i'de

foF2 ve TEİ kullanılarak elde edilen katman kalınlığı haritası gösterilmiştir. Katman kalınlığı hem foF2 hem de TEİ'ye bağlı bir parametre olarak her iki modaliteden de farklı bir davranışa sahiptir. Katman kalınlığı için foF2 ve TEİ, IONOLAB-CK ile enlem ve boylamda 0.50° çözünürlüklü bir harita elde edilebilmiştir.



Şekil 4.12:  $A_{s1}$  için 05 Ekim 2012 günü 1200 GS, a) foF2 örnek noktaları, b)  $\widehat{foF2}_{OKr}$  (Çözünürlük:  $2.62^\circ$ ), c) foF2 için  $\widehat{\sigma}_{OKr}^2$ , d) TEİ örnek noktaları, e) TEİ OKr kestirim yüzeyi,  $\widehat{TEC}_{OKr}$ , f) TEİ OKr kestirim değışintisi  $\widehat{\sigma}_{OKr}^2$ , g) foF2 EKr kestirim yüzeyi,  $\widehat{foF2}_{EKr}$  (Çözünürlük:  $0.50^\circ$ ), h) foF2 EKr kestirim değışintisi  $\widehat{\sigma}_{EKr}^2$ , i) Katman kalınlığı,  $\widehat{\tau}$ .

Şekil 4.13'de  $A_{s2}$  olarak verilen için 02 Haziran 2014 günü gündüz saatleri 1230 GS için OKr, IONOLAB-CK kestirimleri ve katman kalınlığı ( $\tau$ ) haritası gösterilmiştir. Şekil 4.13a'da foF2 verileri sabit altı adet iyonosondadan alınmıştır. Şekil 4.13b ve Şekil 4.13c'de sırasıyla foF2 OKr kestirimi ve kestirim değışintisi gösterilmiştir. Örnek noktalarının dinamik aralığı için gün ve öğle saatlerinde Şekil 4.12a'da verilen dinamik aralık ile benzer şekilde 1.1 MHz'in altındadır. Bu örnekte aradeğerleme değışintisi en yüksek 0.19 MHz olarak bulun-

muştur.

Şekil 4.13d'de TEİ verileri ve Şekil 4.13e ve Şekil 4.13f'de ise 60 örnek noktası ile TEİ verilerinin OKr kestirimi ve kestirim değişikliği gösterilmiştir. TEİ verileri sakin gün ve gündüz 1230 GS saatinde 10 TECU dinamik aralığa sahiptir. TEİ'nin OKr ile aradeğerlenmesi sonucunda elde edilen Krigleme değişikliği en yüksek noktasına haritanın sınır ve örnek olmayan noktalarında ulaşmıştır. Örnek noktalarının tanımladığı çokgen içinde kalan bölge içinde ortalama olarak 0.06 TECU'dur. Şekil 4.12d ve Şekil 4.13d ile karşılaştırıldığında Şekil 4.13d'de TEİ'de bir yönseme gözlenmesine rağmen farklı davranış gösteren noktalarda bulunmaktadır.

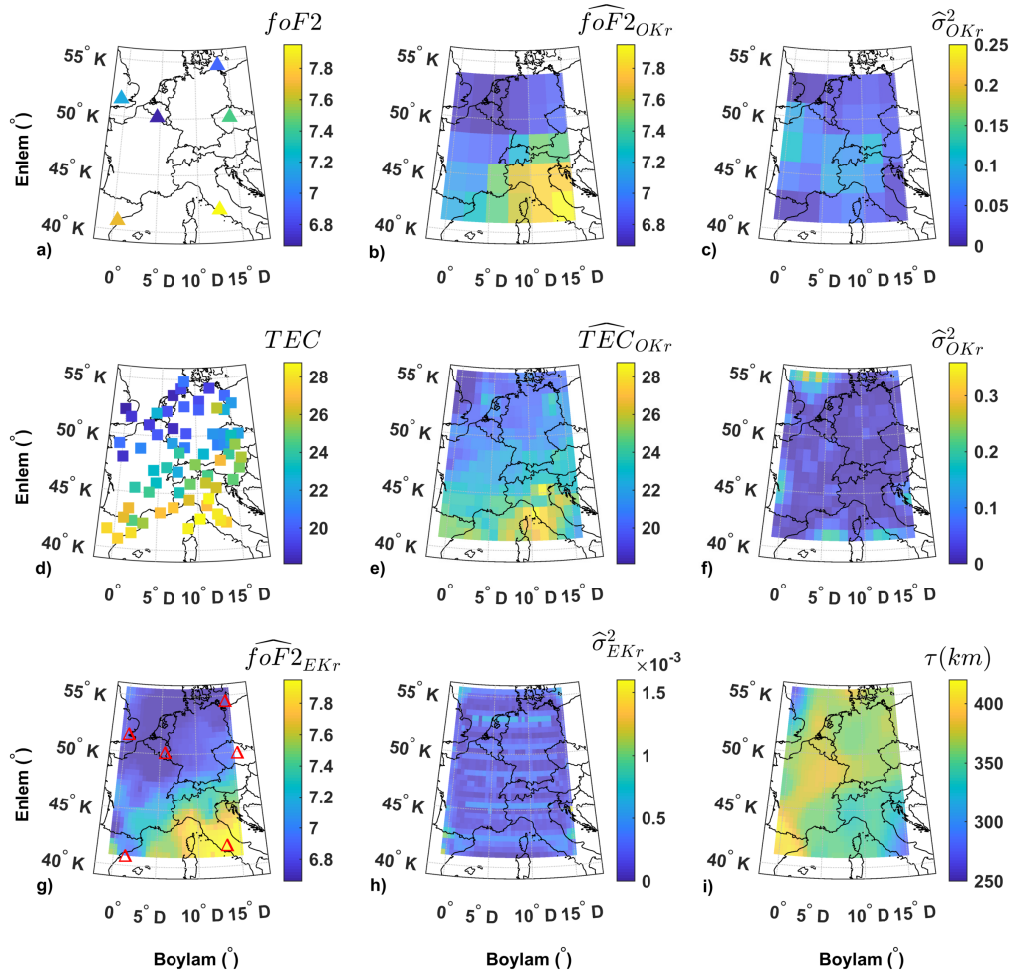
Şekil 4.13g'de birinci modalite olarak foF2'nun IONOLAB-CK kestirim sonuçları ve Şekil 4.13h'de de IONOLAB-CK kestirim değişikliği verilmiştir. Öncelikle IONOLAB-CK sonucunda aradeğerleme çözünürlüğü enlem ve boylamda  $0.50^\circ$  Şekil 4.12g 'de verilen Krigleme değişikliği her iki modaliteden de örnek olmayan deniz üstü kısımda en yüksek değerini alsa da ortalama olarak  $1.6 \times 10^{-3}$  MHz olarak bulunmuştur.

Her iki modalitenin de Güney yönüne doğru azalması ve benzer yönsemeler göstermeleri sonucunda IONOLAB-CK değişikliği oldukça az bulunmuştur. Benzer sentetik yüzeylerde gösterilen örneklerde benzetilen durumlardan biri olarak değerlendirilebilir. Şekil 4.13i'de foF2 ve TEİ kullanılarak elde edilen katman kalınlığı haritası gösterilmiştir. Güneyden başlayan genişleme Kuzey enlemlere doğru hareket etmektedir.

Şekil 4.14'de  $A_{n1}$  olarak verilen normal 12 Mart 2012 günü gündüz saatleri 1500 GS için OKr, IONOLAB-CK kestirimleri ve katman kalınlığı ( $\tau$ ) haritası gösterilmiştir. Şekil 4.14a'da foF2 verileri sabit altı adet iyonosondadan alınmıştır. Şekil 4.14b ve Şekil 4.14c'de sırasıyla foF2 OKr kestirimi ve değişikliği gösterilmiştir. Örnek noktalarının dinamik aralığı normal gün ve gündüz saatlerinde 1 MHz'den fazla dinamik aralığa sahiptir. Bu örnekte aradeğerleme değişikliği en yüksek 0.37 MHz olarak bulunmuştur. Gündüz saatlerinde tam olarak Kuzey-Güney doğrultusunda bir yönseme hem foF2 hem de TEİ değerlerinde açıkça gözlenmektedir.

Şekil 4.14d'de TEİ verileri ve Şekil 4.14e ve Şekil 4.14f'de ise 60 örnek noktası kullanılarak TEİ verilerinin OKr kestirimi ve değişikliği gösterilmiştir. TEİ verileri normal gün ve gündüz 1500 GS saatinde 19 TECU dinamik aralığa sahiptir. TEİ'nin Ortalamasız Kriglenmesi





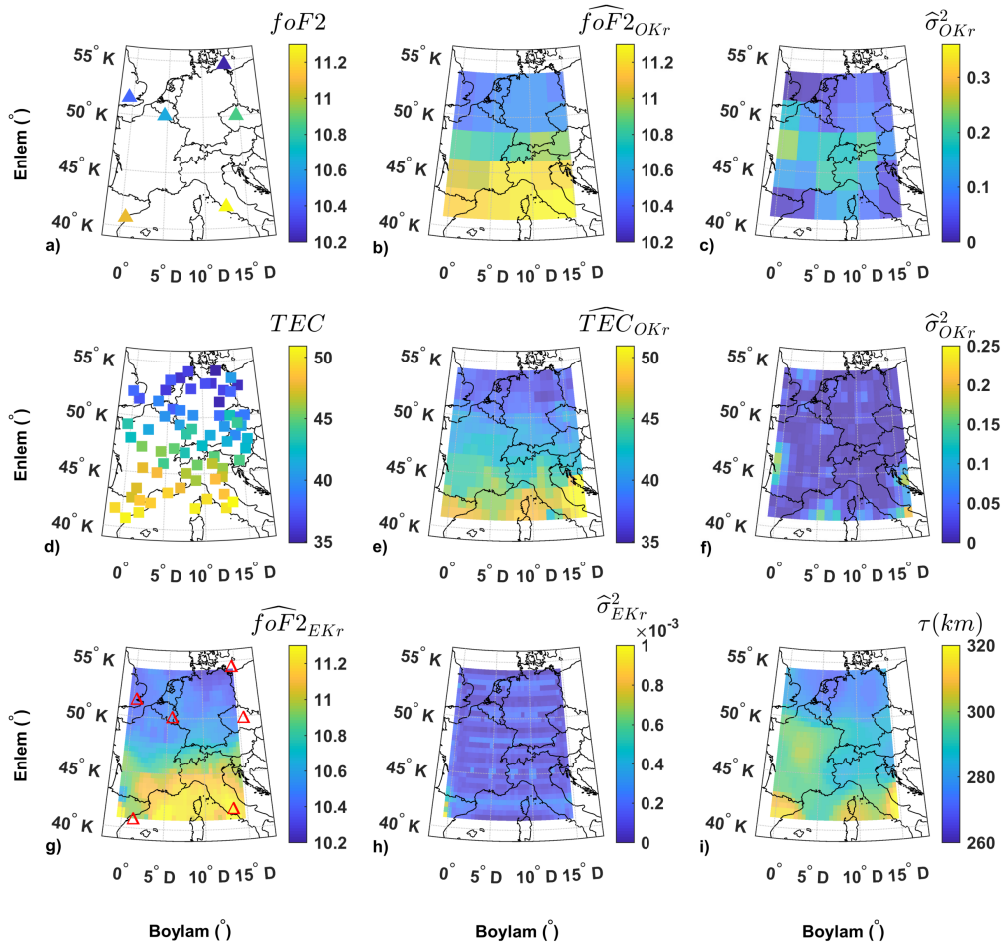
Şekil 4.13:  $A_{s2}$  saatin 02 Haziran 2014 günü 1230 GS, a) foF2 örnek noktaları, b)  $\widehat{foF2}_{OKr}$  (Çözünürlük:  $2.62^\circ$ ), c) foF2 için  $\widehat{\sigma}_{OKr}^2$ , d) TEİ örnek noktaları, e) TEİ OKr kestirim yüzeyi,  $\widehat{TEC}_{OKr}$ , f) TEİ OKr kestirim değışintisi  $\widehat{\sigma}_{OKr}^2$ , g) foF2 EKr kestirim yüzeyi,  $\widehat{foF2}_{EKr}$  (Çözünürlük:  $0.50^\circ$ ), h) foF2 EKr kestirim değışintisi  $\widehat{\sigma}_{EKr}^2$ , i) Katman kalınlığı,  $\hat{\tau}$ .

sonucunda elde edilen Krigleme değışintisi en yüksek noktasına haritanın sınır ve örnek olmayan noktalarında ulaşmıştır. Örnek noktalarının tanımladığı çokgen içinde kalan bölge içinde ortalama olarak 0.05 TECU'dur. Bu aradeğerleme örneğinde TEİ'den örnek alınan nokta sayısı artmıştır.

Şekil 4.14g'de birinci modalite olarak foF2'nun IONOLAB-CK kestirim sonuçları ve Şekil 4.14h'de de IONOLAB-CK kestirim değışintisi verilmiştir. Öncelikle IONOLAB-CK sonucunda aradeğerleme çözünürlüğü enlem ve boylamda  $0.50^\circ$ 'dir. Şekil 4.12h'de verilen Krigleme değışintisi ortalama olarak  $1.7 \times 10^{-3}$  MHz olarak bulunmuştur. Her iki modali-

tenin de Güney yönünden artmaya başlaması ve benzer yönsemeler göstermeleri sonucunda IONOLAB-CK aradeğerleme değışintisi azalmaktadır.

Verilen  $A_{n1}$  örnek günü benzer sentetik senaryolardan  $S_2$  senaryosuna benzer olup doğrultusu farklıdır. Şekil 4.14’de foF2 ve TEİ kullanılarak elde edilen katman kalınlığı haritası gösterilmiştir. Bu haritada katman kalınlığının yönsemesi TEİ ve foF2’den farklıdır. Katman kalınlığı TEİ ve foF2’den hesaplanan bir parametre olmasına rağmen enlem ve boylamda farklı davranışa sahip olabilir.



Şekil 4.14:  $A_{n1}$  normal 12 Mart 2012 günü 1500 GS, a) foF2 örnek noktaları, b)  $\widehat{foF2}_{OKr}$  (Çözünürlük:  $2.62^\circ$ ), c) foF2 için  $\widehat{\sigma}_{OKr}^2$ , d) TEİ örnek noktaları, e) TEİ OKr kestirim yüzeyi,  $\widehat{TEC}_{OKr}$ , f) TEİ OKr kestirim değışintisi  $\widehat{\sigma}_{OKr}^2$ , g) foF2 EKr kestirim yüzeyi,  $\widehat{foF2}_{EKr}$  (Çözünürlük:  $0.50^\circ$ ), h) foF2 EKr kestirim değışintisi  $\widehat{\sigma}_{EKr}^2$ , i) Katman kalınlığı,  $\hat{\tau}$ .

İyonkürenin normal durum olarak nitelendirilen günlerine ikinci örnek olarak Şekil 4.15’de 28 Ekim 2014 günü gün batımı saatleri 1800 GS için OKr, IONOLAB-CK kestirimleri ve

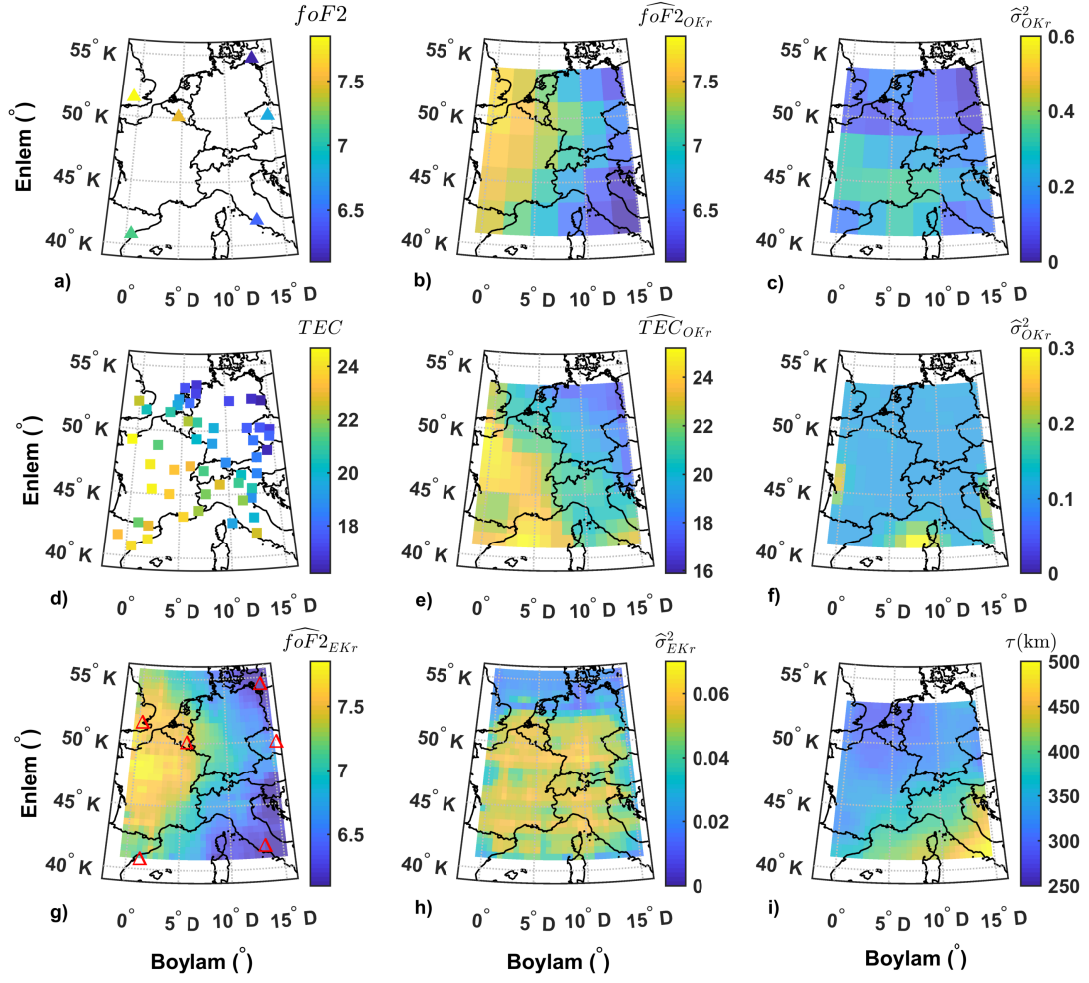
katman kalınlığı ( $\tau$ ) haritası gösterilmiştir. Şekil 4.15a'da foF2 verileri sabit 6 adet iyonosondadan alınmıştır. Şekil 4.15b ve Şekil 4.15c'de sırasıyla foF2 OKr kestirimi ve değişintisi gösterilmiştir. Örnek noktaları bozulmalı gün ve gün batımı saatlerinde yaklaşık 2 MHz dinamik aralığa sahiptir. Bu örnekte aradeğerleme değişintisi en yüksek 0.59 MHz olarak bulunmuştur.

Gün batımı saatlerinde değişkenlik doğudan batıya doğru geçiş göstermektedir. Şekil 4.15d'de TEİ verileri ve Şekil 4.15e ve Şekil 4.15f'de ise 60 örnek noktası kullanılarak TEİ verilerinin OKr kestirimi ve değişintisi gösterilmiştir. TEİ verileri gün batımı saatlerinde 1800 GS yaklaşık 8.5 TECU dinamik aralığa sahiptir. TEİ'nin Ortalamasız Kriglenmesi sonucunda elde edilen Krigleme değişintisi en yüksek noktasına haritanın sınır ve örnek olmayan noktalarında ulaşmıştır. Örnek noktalarının tanımladığı çokgen içinde kalan bölge içinde ortalama olarak 0.12 TECU'dur. foF2, Doğu-Batı doğrultusunda hareket ederken TEİ Güneybatı doğrultusunda değişim göstermektedir. İki modalitenin değişimleri farklı olabileceği gibi hareket yönleri de farklılık göstermektedir.

Şekil 4.15g'de birinci modalite olarak foF2'nun IONOLAB-CK kestirim sonuçları ve Şekil 4.15h'de de IONOLAB-CK kestirim değişintisi verilmiştir. Öncelikle IONOLAB-CK sonucunda aradeğerleme çözünürlüğü enlem ve boylamda  $0.50^\circ$ 'dir. Şekil 4.15g 'de verilen Krigleme değişintisi ortalama olarak  $4 \times 10^{-2}$  MHz olarak bulunmuştur. Bu değer en yüksek değerinde  $6 \times 10^{-2}$  seviyesinde kalmıştır. IONOLAB-CK kestirim değişintisi ile OKr kestirim değişintisi karşılaştırıldığında IONOLAB-CK ile değişinti yaklaşık 10 kat azalmıştır.

Şekil 4.15i'de foF2 ve TEİ kullanılarak elde edilen katman kalınlığı haritası gösterilmiştir. Katman kalınlığı güneş etkisinin azalması ile birlikte artma eğilimi göstermektedir. Artış Kuzeybatı-Güneydoğu ekseninde başlamaktadır. Bu durum TEİ'nin davranışının tersi olarak gözlenmiştir.

Bozulmalı günlere örnek olarak  $A_{b1}$  uygulaması günü yerküresel manyetik fırtına gerçekleşen Şekil 4.16'de 19 Şubat 2014 sabah saatleri 0900 GS için OKr, IONOLAB-CK kestirimleri ve katman kalınlığı ( $\tau$ ) haritası gösterilmiştir. Şekil 4.16a'da foF2 verileri sabit altı adet iyonosondadan alınmıştır. Şekil 4.16b ve Şekil 4.16c'de sırasıyla foF2 OKr kestirimi ve değişintisi gösterilmiştir. Örnek noktaları bozulmalı gün ve sabah saatlerinde 3 MHz'den fazla



Şekil 4.15:  $A_{n2}$  normal 28 Ekim 2014 günü 1800 GS, a) foF2 örnek noktaları, b)  $\widehat{foF2}_{OKr}$  (Çözünürlük:  $2.62^\circ$ ), c) foF2 için  $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , d) TEİ örnek noktaları, e) TEİ OKr kestirim yüzeyi,  $\widehat{TEC}_{OKr}$ , f) TEİ OKr kestirim değışintisi  $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , g) foF2 EKr kestirim yüzeyi,  $\widehat{foF2}_{EKr}$  (Çözünürlük:  $0.50^\circ$ ), h) foF2 EKr kestirim değışintisi  $\hat{\sigma}_{EKr}^2$ , i) Katman kalınlığı,  $\hat{\tau}$ .

dinamik aralığa sahiptir. Bu örnekte aradeğerleme değışintisi en yüksek 0.72 MHz olarak bulunmuştur.

Şekil 4.16c’de verilen değışinti kestirim noktalarının büyük çoğunluğunda sabittir. Bunun sebebi alınan örneklerin değışimi yeterince iyi örneklenememesi ve bu zaman aralığı için örnek noktalarında alınan değerlerin yeterli olmamasıdır. OKr mutlak bir aradeğerleme algoritması olduğundan noktalar arası ilinti kaybolduğunda örnek noktalarının ortalaması kestirim olarak bulunmaktadır. 4.16d’de TEİ verileri ve Şekil 4.16e ve Şekil 4.16f’de ise 60 örnek noktası kullanılarak TEİ verilerinin OKr kestirimi ve değışintisi gösterilmiştir. TEİ verileri bozul-

malı gün ve sabah saatleri 0900 GS saatinde 20 TECU dinamik aralığa sahiptir. Bozulmalı günde Kuzey-Güney doğrultusunda oldukça dik yönsemeli bir TEİ değişimi gözlenmiştir. foF2 haritasında ise herhangi yüksek eğimli değişim yakalanamamıştır.

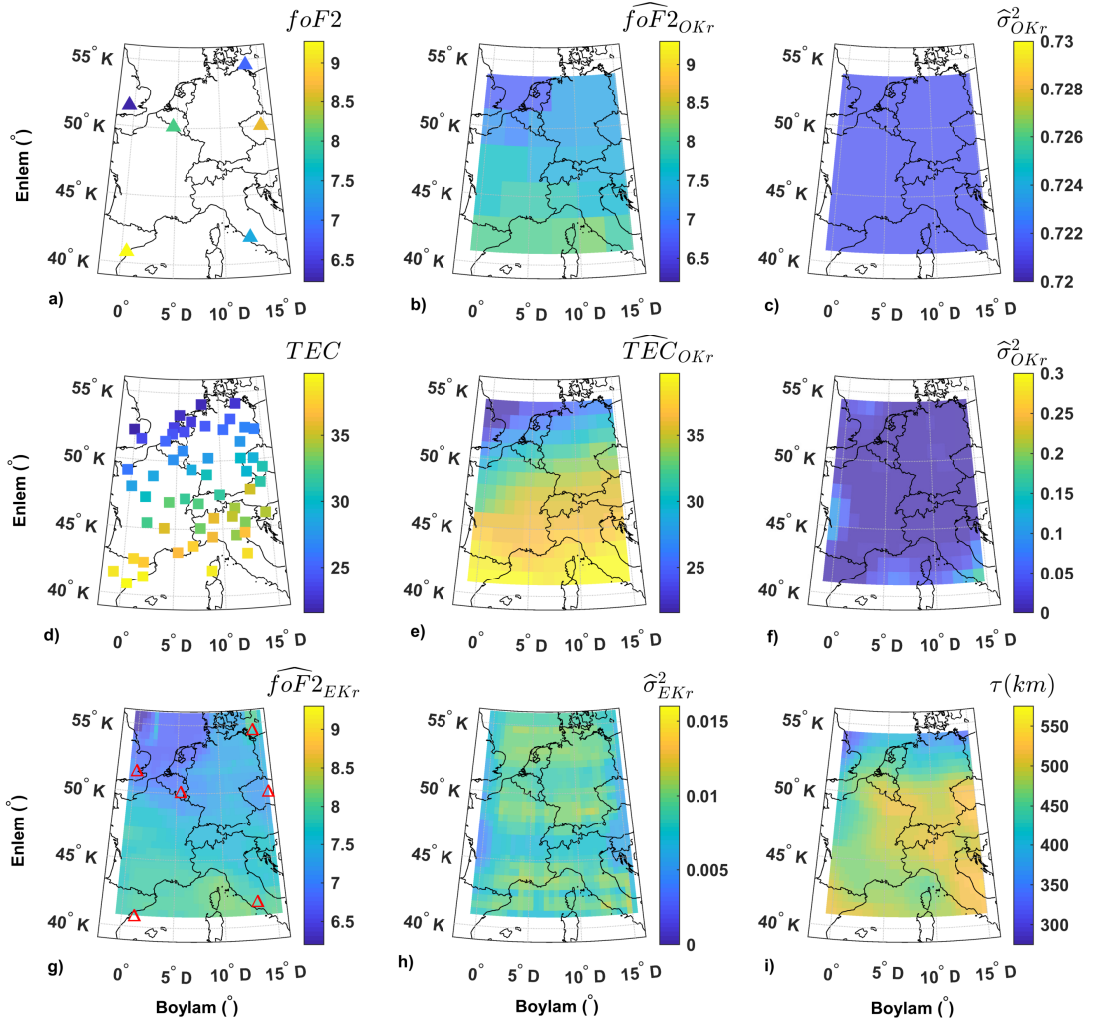
Şekil 4.16g'de birinci modalite olarak foF2'nun IONOLAB-CK kestirim sonuçları ve Şekil 4.16h'de de IONOLAB-CK kestirim değişintisi verilmiştir. foF2 haritasında iyonkürede meydana gelen değişim gözlenemezken TEİ haritasında bozulma kaynaklı değişim gerçekleşmiştir. IONOLAB-CK uygulanarak Şekil 4.16g'de verilen foF2 haritasında ise Kuzey-Güney doğrultusundaki TEİ'den gelen değişim gözlenmiştir.

IONOLAB-CK'nin en önemli katkılarından biri olan birinci modalitenin yeterince örneklememesi nedeni ile yardımcı ikinci modalite ile kestirim yapılmasına olanak sağlaması bu örnekte açıkça gözlenmiştir. IONOLAB-CK sonucunda aradeğerleme çözünürlüğü enlem ve boylamda  $0.50^\circ$ 'dir. Şekil 4.15g 'de verilen Krigleme değişintisi ortalama olarak  $8.74 \times 10^{-3}$  MHz olarak bulunmuştur. Bu değer en yüksek değerinde  $1.24 \times 10^{-2}$  seviyesinde kalmıştır.

Şekil 4.16i'de foF2 ve TEİ kullanılarak elde edilen katman kalınlığı haritası gösterilmiştir. Katman kalınlığı bu örnekte güneş etkisini artırırken de artmaktadır. Bu durumun jeomanyetik fırtına sebebi ile oluştuğu düşünülmektedir.

Bozulmalı günlere ikinci örnek olarak literatürde St. Patrick Günü Fırtınası olarak tanımlanan günlerden  $A_{b2}$  uygulaması günü jeomanyetik fırtına gerçekleşen Şekil 4.17'de 17 Mart 2015 günü 1200 GS için OKr, IONOLAB-CK kestirimleri ve katman kalınlığı ( $\tau$ ) haritası gösterilmiştir. Şekil 4.17a'da foF2 verileri sabit altı adet iyonosondadan alınmıştır. Şekil 4.17b ve Şekil 4.17c'de sırasıyla foF2 OKr kestirimi ve değişintisi gösterilmiştir. Örnek noktaları bozulmalı gün ve öğle saatlerinde 3.5 MHz'den fazla dinamik aralığa sahiptir. Bu örnekte aradeğerleme değişintisi en yüksek 0.88 MHz olarak bulunmuştur.

Şekil 4.17c'de verilen değişinti ölçüm noktalarından uzaklaştıkça artmaktadır. OKr mutlak bir aradeğerleme algoritması olduğundan noktalar arası ilinti kaybolduğunda örnek noktalarının ortalaması kestirim olarak bulunmaktadır. 4.17d'de TEİ verileri ve Şekil 4.17e ve Şekil 4.17f'de ise 60 örnek noktası kullanılarak TEİ verilerinin OKr kestirimi ve değişintisi gösterilmiştir. TEİ verileri bozulmalı gün ve öğle saatleri 1200 GS saatinde 30 TECU'ya kadar artan dinamik aralığa sahiptir. Bozulmalı günde Kuzeybatı-Güneydoğu doğrultusunda oldukça dik yönsemeli bir TEİ değişimi gözlenmiştir.



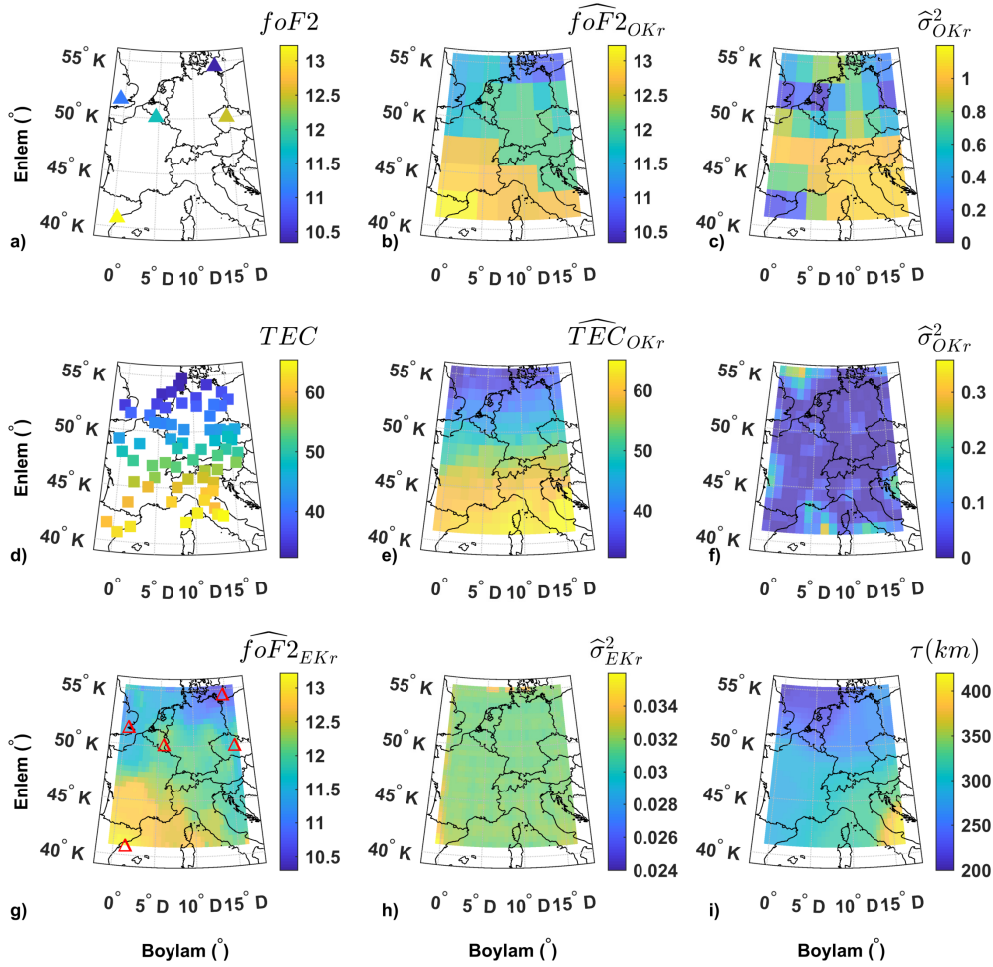
Şekil 4.16:  $A_{b1}$  bozulmalı 19 Şubat 2014 günü 0900 GS, a) foF2 örnek noktaları, b)  $\widehat{foF2}_{OKr}$  (Çözünürlük:  $2.62^\circ$ ), c) foF2 için  $\widehat{\sigma}_{OKr}^2$ , d) TEİ örnek noktaları, e) TEİ OKr kestirim yüzeyi,  $\widehat{TEC}_{OKr}$ , f) TEİ OKr kestirim değışintisi  $\widehat{\sigma}_{OKr}^2$ , g) foF2 EKr kestirim yüzeyi,  $\widehat{foF2}_{EKr}$  (Çözünürlük:  $0.50^\circ$ ), h) foF2 EKr kestirim değışintisi  $\widehat{\sigma}_{EKr}^2$ , i) Katman kalınlığı,  $\hat{\tau}$ .

Şekil 4.17g'de birinci modalite olarak foF2'nun IONOLAB-CK kestirim sonuçları ve Şekil 4.17h'de de IONOLAB-CK kestirim değışintisi verilmiştir. foF2 haritasında iyonkürede meydana gelen değışim gözlenemezken TEİ haritasında bozulma kaynaklı değışim gerçekleşmiştir. IONOLAB-CK yöntemi uygulanarak Şekil 4.17g'de verilen foF2 haritasında ise Güneybatı-Kuzeydoğu doğrultusundaki yönseme daha belirgin ortaya çıkmıştır. Yönsemenin yönü TEİ ile farklıdır.

Birinci ve ikinci modalitenin farklı yönsemelere sahip olduğu duruma karşılık gelen bu saatte

de diğer örneklere göre daha yüksek kestirim değışitisi bulunmasına rağmen birinci modalite başarı ile yüksek çözünürlüklü olarak aradeğerlenmiştir. IONOLAB-CK sonucunda aradeğerleme çözünürlüğü enlem ve boylamda  $0.50^\circ$ 'dir.

Şekil 4.17'i'de foF2 ve TEİ kullanılarak elde edilen katman kalınlığı haritası gösterilmiştir. Katman kalınlığı bu örnekte güneş etkisini artırırken de artmaktadır. Bu durumun jeomanyetik fırtına sebebi ile oluştuğu düşünülmektedir.



Şekil 4.17:  $A_{b2}$  bozulmalı 17 Mart 2015 günü 1200 GS, a) foF2 örnek noktaları, b)  $\widehat{foF2}_{OKr}$  (Çözünürlük:  $2.62^\circ$ ), c) foF2 için  $\widehat{\sigma}_{OKr}^2$ , d) TEİ örnek noktaları, e) TEİ OKr kestirim yüzeyi,  $\widehat{TEC}_{OKr}$ , f) TEİ OKr kestirim değışitisi  $\widehat{\sigma}_{OKr}^2$ , g) foF2 EKr kestirim yüzeyi,  $\widehat{foF2}_{EKr}$  (Çözünürlük:  $0.50^\circ$ ), h) foF2 EKr kestirim değışitisi  $\widehat{\sigma}_{EKr}^2$ , i) Katman kalınlığı,  $\hat{\tau}$ .

İyonkürenin sakin normal ve bozulmalı günlerinin gece gündüz ve gün doğumu gün batımı gibi farklı saatlerinde davranışlarının gerçek veriler üzerinden incelendiği örnekler ve-

rilmiştir. Öncelikle Krigleme yöntemleri her bir modalite OKr ile aradeğerlenmiştir. Sonrasında aradeğerlenmiş modaliteler IONOLAB-CK yüksek çözünürlüklü kestirim haritaları elde edilmiştir. Böylece enlem ve boylamda sırasıyla  $15^{\circ} \times 16^{\circ}$  sınırlarında bir alan foF2 altı ve TEİ ortalama 60 örnek noktası ile  $0.50^{\circ}$  çözünürlüklü haritalar oluşturulmuştur. IONOLAB-CK kullanılarak foF2 ve katman kalınlığının yüksek çözünürlüklü, hassas elde edilmesi ilk defa yapılmıştır.

#### 4.9 Çapraz Doğrulama

Çapraz doğrulama bir modelin başarımının incelenmesinde kullanılan yöntemlerden biridir. Özellikle makine öğrenmesi ile elde edilen modellerin incelenmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Çapraz doğrulama yönteminin çeşitli alt uygulamaları vardır. Bunlardan bazılarında tek giriş tek çıkışlı, katlamalı ve bir tane çıkarmalı yöntemler örnek gösterilebilir. Çapraz doğrulama yöntemi problem ve modelin niteliğine göre farklı şekillerde uygulanmaktadır. Doğrulama aşamasında veriler eğitim ve test veri setleri olarak iki gruba ayrılarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada geliştirilen yöntemin başarımının incelenmesi kapsamında ise birinci modalite olarak tanımlanan foF2 verileri kullanılmıştır. foF2 eğitim ve test veri setleri olarak iki gruba ayrılmıştır. Eğitim ve test verilerinin belirlenmesinde literatürde %30 oranında veri rassal olarak seçilmektedir. Bu problemde ise test ve eğitim verilerinin belirlenmesi kapsamında sadece 6 adet örnek noktası bulunduğundan 2 adet nokta test veri seti olarak belirlenmiştir. Eğitim veri setinin belirlenmesinde aradeğerleme yönteminin uygulandığı alanın sınırlarında kalan ölçüm noktaları temel alınmıştır. Test veri setlerinin belirlenmesinde ise aradeğerlemenin uygulandığı alanın merkezine yakın noktalar kullanılmıştır.

Test veri setinde PQ052 ve DB049 iyonosondaları bulunmaktadır. Herbir yinelemede sırasıyla test veri setinde bulunan istasyonlar dışarı alınarak kestirimler karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.11 çapraz doğrulama yöntemi ile kestirim sonuçları sunulmuştur. Test veri setlerinden herbiri dışarı çıkarılarak aradeğerleme sonucunda dışarı çıkarılan noktadaki foF2 ile kestirim haritasında aynı nokta için elde edilen foF2 Eşitlik 4.19'de verilen ortalama karekök hata metriği ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.11'de test veri setlerinin kestirimleri belirlenen gün ve saatlerde iyonosonda ölçüm sonuçları ile birlikte gösterilmiştir. Ortalama karekök hata değerleri ise 6 örnek noktası tek



Çizelge 4.11: EKr yönteminin uygulandığı örnek günler ve belirlenen gün ve saatlerdeki çapraz doğrulama hata metrikleri.

Uygulama	Gün	Tarih	foF2 <sub>i,PQ</sub>	foF2 <sub>i,DB</sub>	$\widehat{foF2}_{OKr,PQ}$	$\widehat{foF2}_{EKr,PQ}$	$\widehat{foF2}_{OKr,DB}$	$\widehat{foF2}_{EKr,DB}$	OKr <sub>RMS</sub>	EKr <sub>RMS</sub>
A <sub>s1</sub>	Sakin	05.10.2012	8.70	8.27	8.53	8.63	8.42	8.35	0.16	0.08
A <sub>s2</sub>	Sakin	02.06.2014	6.95	6.66	6.67	6.81	6.82	6.77	0.23	0.12
A <sub>n1</sub>	Normal	12.03.2012	10.55	10.51	10.34	10.42	10.40	10.46	0.17	0.1
A <sub>n2</sub>	Normal	28.10.2014	6.50	7.55	6.48	6.50	7.29	7.47	0.18	0.06
A <sub>b1</sub>	Bozulmalı	19.02.2014	8.00	7.53	10.23	7.83	6.79	7.65	1.66	0.15
A <sub>b2</sub>	Bozulmalı	17.03.2015	12.13	12.08	10.98	12.10	11.28	11.32	0.99	0.53

tek koşum dışında bırakılarak dışarıda bırakılan ölçüm noktasındaki iyonosonda ölçümü ile aynı noktadaki kestirim karşılaştırılmıştır. Kestirim sonuçları incelendiğinde yüzeyin çerçeve kısımlarında kalan eğitim veri seti olarak belirlenen noktalarda hata miktarı yüksek olurken test veri setleri için hata miktarı azdır. Aradeğerleme çerçeve noktalarını kullanarak bölgenin içine başarılı olarak gerçekleştirebilmektedir.

Kestirim değişimleri iyonkürenin farklı durumlarını gösteren veri setleri için sunulan örneklerde yüksek değişim göstermemiş ve sınırlı kalmıştır. IONOLAB-CK yönteminin gösterilen gün ve saatlerde gözlenen faydası iyonkürenin bozulmalı günlerinde de kestirim değişiminin sınırlı kalması, TEİ'nin uzayda iyi örneklenmiş olması sonucunda uzaysal ilintinin verilen bölge içinde başarılı temsil edilmesidir. Daha büyük sınırlara sahip alanlarda kestirim değişimi daha fazla olabilir. Diğer bir sonuç ise örnekleme noktalarının dağılımının kestirim değişimi üzerinde etkisidir. Uzayda örnekleme noktalarının şeklinin eniyilenmesi kestirim değişiminin azalmasını sağlamaktadır. Bu durum özellikle sık yerleştirilen GPS alıcılarına yeni eklenecek noktaların belirlenmesinde bir kriter olarak kullanılabilir.

Farklı senaryoların incelendiği senaryolarda en fazla dinamik aralık verilerek benzetim yapılan senaryolarda bile kestirim değişimi birinci modalitenin ortalama değerinin %17 kadarından fazla olmamıştır. Bu nedenle sentetik yüzeyler ve gerçek veriler değerlendirildiğinde hassasiyet birinci modalitenin yaklaşık olarak %10'u olarak kabul edilebilir.

İyonosonda foF2 ve GPS alıcısından elde edilen TEİ verileri örnek gün ve saatler için aradeğerlenerek yüksek çözünürlüklü kestirim haritaları başarı ile elde edilmiştir. Çapraz doğrulama yöntemi kullanılarak kestirim başarımı incelendiğinde aradeğerleme yapılan bölgenin içinde kalan örnek noktalarında gerçek değer ile kestirim haritasından aynı nokta için elde

edilen değerlerin çok yakın çıkması IONOLAB-CK yönteminin iyonküre ölçümlerinde başarı ile kullanabileceğini göstermiştir. Aradeğerleme yapılan bölgenin ereve kısımlarına yaklaşıldıkça kestirim değişintisi de artmaktadır. Buna göre örnek noktaları seçilirken aradeğerleme yapılacak ilgi alanı bölgesini içine alan seçim şekilleri kestirimlerin başarımına olumlu yönde yansıyacaktır.

Geliştirilen yöntem ile iyonküre parametrelerinden uzayda ve zamanda yeterli örnek alınmamış ya da örnek bulunmayan bölgeler için aynı bölge içinde daha sık örneklere sahip ilintili bir iyonküre parametresi kullanılarak yüksek çözünürlüklü haritalar elde edilebilir. Bu alışma kapsamında foF2 ve TEİ kullanılmasına rağmen birbiri ile ilintili iyonküre parametrelerinin yüksek çözünürlüklü haritaları elde edilebilir. Bunun yanında aradeğerleme değişintisi ise iki modalite birlikte IONOLAB-CK ile aradeğerlendiğinde en az 10 kat azalmaktadır.

IONOLAB-CK yönteminde bu çalışmada Eşitlik 1.3'de rassal olarak modellenen iyonküre için doğrudan yakın gerçek zamanda  $Z(x, t)$  IONOLAB-CK rassal aradeğerleme yöntemi ile elde edilmiştir. Sonuçlar IRI-Plas modelinin yakın gerçek zamanda güncellenmesinde kullanılacaktır. Buna ek olarak Bölüm 3.1'de elde edilen yerel ölçekte noktasal IONOLAB-PDF kestirimlerinden elde edilen ortalama kestirimleri ve OYF'lerden elde edilen rassal gerçeklemeler de Eş-Kriglenerek kullanılabilir.

Elde edilen katman kalınlığı haritaları IRI-Plas programının çıktısı olan aylık ortanca değer katman kalınlıkları ile eniyilenecek elde edilen foF2, IONOLAB-RAY algoritmasının arka plan iyonküre modelinin güncellenmesinde kullanılacaktır.

## 5. GÜNCELLENMİŞ IRI-PLAS İYONKÜRE MODELİ İLE DALGA YOLU IŞIN İZLEME UYGULAMASI

Bir sinyalin dalga yolunun ve yol boyunca üzerindeki etkilerin elde edilebilmesi için en önemli aşama dalgalarının yayılacağı ortamın özelliklerinin bilinmesidir. İyonkürede radyo dalgalarının yayılımı için en önemli parametre olan elektron yoğunluğunun ortam içinde üç boyutlu olarak doğru modellenmesi önemlidir [16]. Ampirik deterministik modeller, uzun dönemli veri kayıtlarına dayalı kestirimler sunabilse de aylık saatlik ortanca değerler ile iyonkürenin sakin ve temel yönsemelerinin gözleendiği zamanlarda daha doğru kestirimler yapabilmektedir [21, 25]. İyonkürenin anlık durumunu yansıtacak bir güncellenmiş model ile kestirilen iyonküre ortamında dalgaların yayılımı modellenerek en doğru yayılım yolları bulunabilir.

Literatürde eğik sonda uygulamaları ile frekans taramaları yapılarak KD bandında uzun ya da kısa mesafelerde kanalın durumunu anlamaya yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Eğik sonda uygulamaları ile elde edilecek kanal bilgisinin KD haberleşme kalitesini artırmaya da fayda sağlayacağı [125] çalışmasında rapor edilmiştir. Frekans tahsisi ve girişim ile ilgili sınırlamalar olduğu dinamik frekans tahsisinin eğik sonda sonuçlarına göre yapılabileceği değerlendirilmiştir.

Kayan iyonküre bozulmalarının gözlenmesi için [126] çalışmasında benzetimler yapılmıştır. NI135 (Lefkoşa) iyonosondası ile RV149 (Rostov) iyonosondası arasında güneşin batışı ve doğuşu saatlerinde iyonküreden tek yansımali eğik yayın yapılmıştır. Uzaklık frekans ve genlik frekans değişimlerinin incelendiği çalışmada en yüksek algılanabilen frekansların değişiminin 2 MHz dolaylarında 5-8 MHz'e kadar çıktığı bildirilmiştir.

İyonkürede eğik sonda ve ölçüm kampanyaları kapsamında veriler toplansa da kısa süreli ve farklı araştırma çalışmaları amacı ile yapılmış ölçümlerdir. Gerçek zamanlı kanal kestirimi kapsamında kullanılabilir veriler bulunmamaktadır.

İyonosonda operasyonunda gerçekleşen aşamaların benzetimlerinin yapıldığı [127] çalışmasında 3 boyutlu ışın izleme yöntemi, ITS kanal modeli ve IRI-Plas modelleri kullanılarak entegre benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Genişbant ve darbantta oluşturulan benzetim ortamının gerçek verilere yakın hmF2 ve foF2 ile beslendiği durumda başarılı sonuçlar elde edildiği Avrupa ve Güney Afrika bölgelerinden alınmış sonuçlarla karşılaştırılarak gösteril-

miştir. Haberleşme uygulamaları açısından KD bandında veri hızını artırmak amacı ile ışın izleme programlarının çıktılarını kullanarak kanal parametrelerinin en iyilenmesine yönelik bir algoritma [128] çalışmasında sunulmuştur. Önerilen yöntemde çoktaşıyıcılı kablosuz iletişim teknikleri için farklı eniyileme algoritmaları üzerinde durulmuştur. Ayrıca hangi çoktaşıyıcılı sistemin kanalı daha verimli kullanacağı ve altkanallarda kullanılacak kiplenme derinliği, verici gücü, altkanal sayısı, taşıyıcı frekansı, altkanal bantgenişliği, gibi veri hızını artıracak eniyilemeleri için belirlenmesi çalışmaları yürütülmüştür. IRI-Plas modeli iyonkürenin temel yönsemeleri ve sakin koşullarında başarılı sonuçlar verebilmektedir. İyonkürenin anlık durumunun kestirilebilmesi için IRI-Plas modelinin girdileri güncellenebilir. IRI-Plas içine GIM-TEİ verilerinin beslenerek [60] çalışmasında IRI-Plas-MAP programı ile güncellenmiştir. GIM-TEİ verilerinin uzay-zamanda çözünürlüğü düşüktür. Elde edilmek istenen foF2 değerlerinin IRI-Plas modeli girdilerinin eniyilenmesine dayanan çalışmalar bulunmaktadır. TEİ verileri kullanılarak foF2'nun kestirimine yönelik geri beslemeli bir eniyileme yöntemi önerilmiştir. IRI-Plas modeli [129] çalışmasında kritik frekans girdisine daha duyarlı ve foF2 gidi olarak sağlandığında başarımlı iyonkürenin anlık durumuna yakınsamaktadır.

IONOLAB-CK yöntemi kullanılarak orta enlemde yüksek çözünürlüklü ve yakın gerçek zamanda foF2 haritaları elde edilebilmektedir. Yakın gerçek zamanda yüksek çözünürlüklü bölgesel haritalarının elde edilebilmesi iyonkürenin ampirik ve deterministik modellerinin rassal olarak yakın gerçek zamanda güncellenebilmesini sağlamaktadır. IONOLAB-CK kestirim haritaları ile girdileri iyonkürenin gerçek durumunu yansıtacak şekilde güncellenen IRI-Plas iyonküre modeli 3 boyutlu olarak dalga yolu ışın izlemek için arka plan modeli olarak kullanılabilir.

IONOLAB grubu tarafından geliştirilen dalga yolu ışın izleme metodu IONOLAB-RAY ışın izleme algoritmasının arka plan iyonküre modeli IRI-Plas kullanılmaktadır. IONOLAB-RAY yöntemi literatürde yer alan ışın izleme yöntemleri ile doğrulanmış ve IRI-Plas modeli ile kullanılabilir bir ışın izleme yöntemidir. Algoritma modülleri ile dalganın ilerleme yolunun yanı sıra dalganın zayıflaması, zaman gecikmesi, faz hızı, grup hızı ve Faraday Dönmesi parametrelerini hesaplayabilmektedir [26]. Sıradan ve sıradışı dalgaların iyonküre boyunca izledikleri yol kestirilebilmektedir.

IONOLAB-RAY yöntemi kullanılırken IRI-Plas modeline iyonküre parametreleri girdi olarak sağlanabilmektedir. Yöntemde IRI-Plas modeline foF2, TEİ ve hmF2 parametreleri sağ-

lanabilirken IONOLAB-RAY yönteminde küresel GIM-TEİ haritaları da otomatik olarak girdi olabilmektedir.

IONOLAB-RAY yöntemi aşamalı olarak öncelikle ışın izlenecek ortam olan iyonküreyi belirlenen sınırlarda IRI-Plas kullanarak oluşturmaktadır. İkinci aşamada ise iyonküreye 3-boyutlu küresel hücrelere bölünerek her bir hücre içinde kırılma indisi, gecikme, soğrulma gibi parametreler hesaplanarak dalga ilerlemektedir. Yöntemde sıradan ve sıradışı dalgalar belirli bir alıcı ve verici konumu sağlanarak farklı yanca ve yükseliş açılarında takip edilebilmektedir.

Bu uygulamada IONOLAB-RAY yönteminde kullanılan iyonküreye modeli IONOLAB-CK kestirim haritaları ile güncellenmiştir. Güncellenmiş arka plan modeli kullanılarak dalga yolu ışın izleme algoritmasında en uygun yanca ve yükselişte gönderim açıları ve gönderim frekansı belirlenmiştir. Bu uygulama da kullanılan Algoritma 5.1 aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

---

**Algoritma 5.1** IRI-Plas modelinin foF2 kestirimleri ile güncellenmesi

---

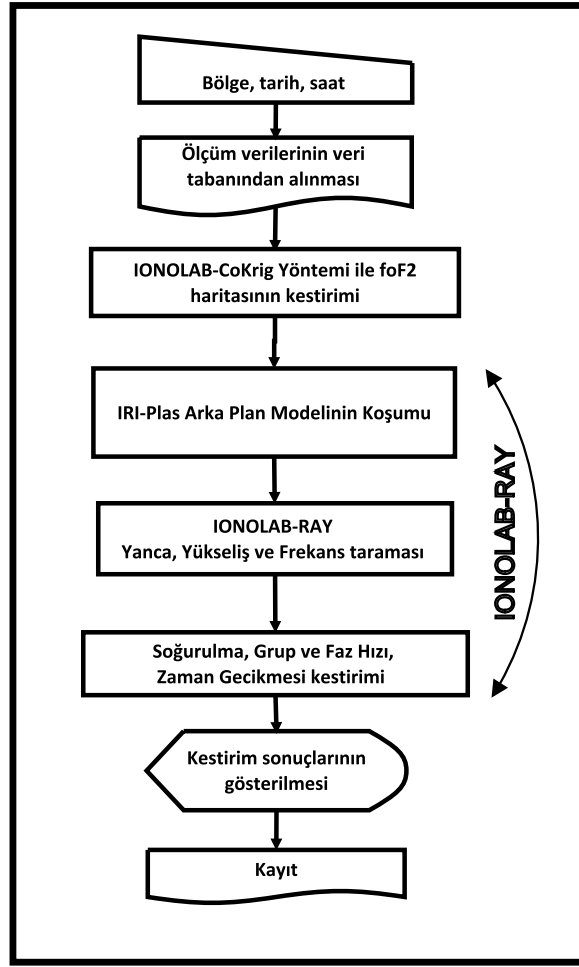
**Girdiler:** Enlem ve boylam aralığı, tarih, saat

**Çıktılar:** Kullanılabilir frekans aralığı ve yanca, yükseliş gönderim açı aralığı.

1. Enlem ve boylam aralığı, tarih, saat aralığını girilmesi.
2. Bölge içinde kullanılacak foF2 ve TEİ verilerinin oluşturulması.
3. IONOLAB-CK yöntemi ile güncel foF2 haritasının kestirimi.
4. IRI-Plas modeline güncel foF2 kestirimleri girilmesi
5. Alıcı ve verici noktalar arasında açı ve frekans taraması.
6. Alıcı noktasına ulaşan dalga yollarının yanca ve yükseliş açı aralıklarının belirlenmesi frekans aralıklarının belirlenmesi.
7. Açı ve frekans aralıklarında grup, faz hızı, zaman gecikmesi ve soğurma kaybı kestirimlerinin sunulması.

---

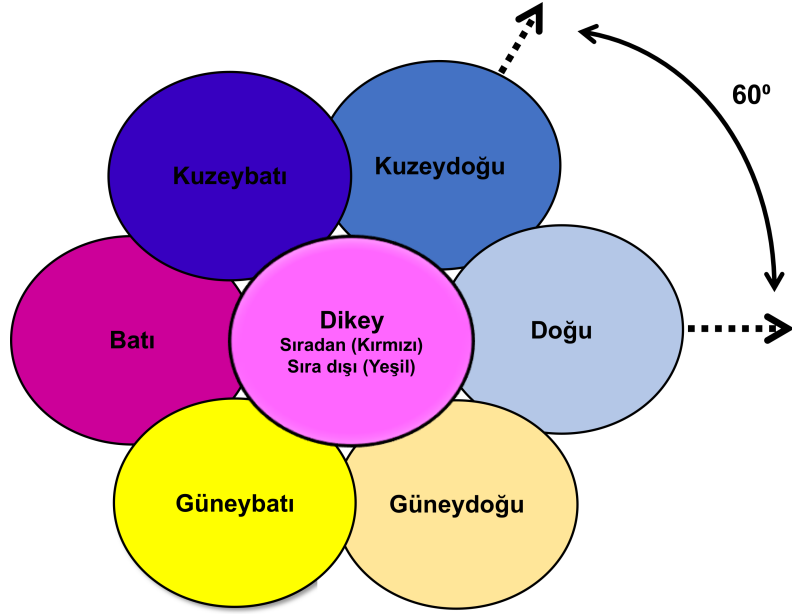
Şekil 5.1'de akış diyagramı verilen algoritma girişlere göre kestirimleri gerçekleştirerek kullanıcıya sunmaktadır.



Şekil 5.1: İyonküre haberleşme parametre kestirimi algoritması.

IONOLAB-Ray yöntemi ile elde edilen iyonküre ışın izleme ve dalga ilerleme yollarının kontrol edilmesi amacı ile eğik ionogram verileri araştırılmıştır. Bu kapsamda daha önce IONOLAB grubu ile işbirliği Çekya Bilimler Akademisi'nden eğik ionogram verileri alınmıştır. Günlük olarak 13 Aralık 2018'de Çizelge 5.1'de koordinatları verilen Sopron istasyonundan Pruhonice istasyonuna gönderilen deneysel olarak gönderilen yayınlar kullanılarak Pruhonice iyonosondasında kaydedilen ionogramlar incelenmiştir. Gönderilen yayınların ionogramlarında foF2 değerleri kaydedilmiştir. 1 MHz'de başlanarak 10 MHz'e kadar 0.1 MHz aralıklar ile taranmıştır.

Eğik ionogramların kestirimi iyonosondanın antenlerine göre temel doğrultularda yön bulma amacı ile bölünmüş temel yönlerden oluşmaktadır. İyonosondalar dikey ionogramlar elde edilmesinde kullanıldığı için anten hüzmeleri dikey ionogramlar elde edilecek şekilde eniyelenmiştir [66, 130]. Şekil 5.2'de iyonosonda hüzmeye açıları yönleri ile birlikte verilmiştir. Herbir hüzmeye 60° olmak üzere 7 adet hüzmeye ayrılmıştır.



Şekil 5.2: İyonosonda anten hüzmeye açı ve yönleri [2].

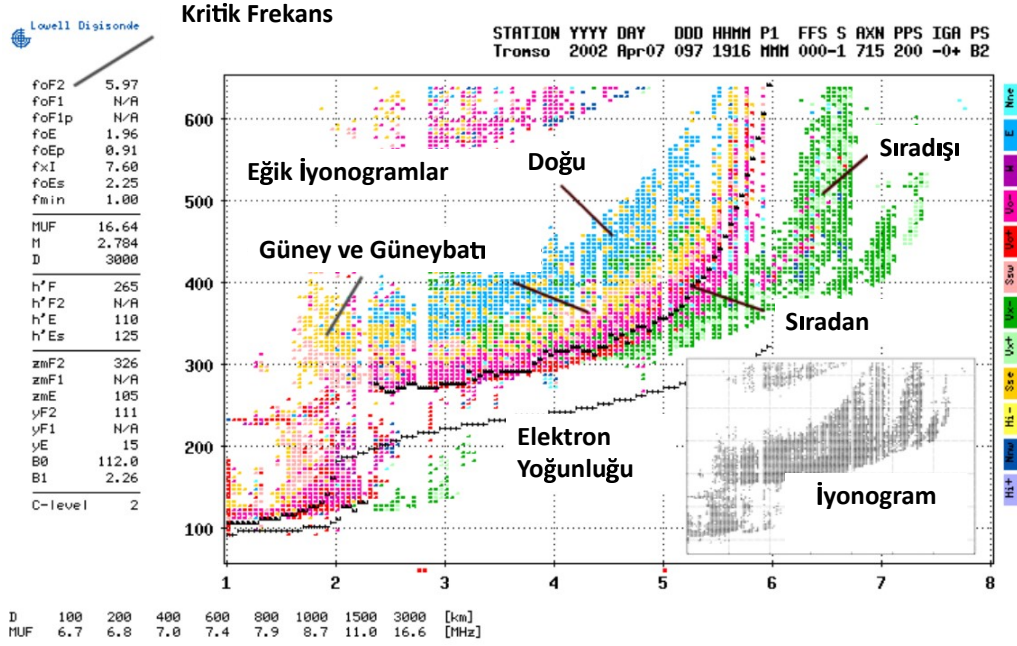
Şekil 5.2’de verilen hüzmeye ve yönleri göre temel olarak iyonogramda sinyal izleri Şekil 5.3’de verildiği gibi sınıflandırılmaktadır. Dikey iyonogramlar sıradan pembe ve sıradışı yeşil renk ile ifade edilmektedir. Şekil 5.2’de verilen örnek iyonogramda hem dikey hem de eğik iyonogram gösterilmiştir. İşlevsel olarak iyonosondalar dikey iyonogramlar elde etmektedir. İyonosonda anten dizileri ve anten sayıları dikey iyonogram elde edilecek şekilde eniyelenmiş sistemlerdir.

Test edilen günler için  $40^{\circ}\text{K}$ - $55^{\circ}\text{K}$  enlem ve  $-1^{\circ}\text{D}$ - $17^{\circ}\text{D}$  boylam aralığında TEİ ve foF2 ölçümleri kullanılarak IONOLAB-CK yöntemi ile yüksek çözünürlüklü foF2 kestirim haritaları elde edilmiştir. Enlem ve boylam aralığında bulunan bölgede 6 adet örnekleme noktası Sopron istasyonu ile tamamlanmış, bölge içinde bulunan Dourbes istasyonunun verilerine ulaşamamıştır.

Çizelge 5.1: Almaç-göndermeç noktaları ve koordinatları.

İstasyon	Adı	Ülke	Coğrafi Koordinatlar		Jeomanyetik koordinatlar	
			Enlem ( $^{\circ}\text{K}$ )	Boylam ( $^{\circ}\text{D}$ )	Enlem ( $^{\circ}\text{K}$ )	Boylam ( $^{\circ}\text{D}$ )
JR055	Juliusruh	Almanya	54.6	13.4	53.95	99.49
SO148	Sopron	Macaristan	47.6	16.7	46.7	99.49
PQ052	Pruhonice	Çekya	50	14.6	49.32	98.6

Şekil 5.4’de verici ve alıcı noktaları gösterilmiştir. Test kampanyası kapsamında şekilde veri-



Şekil 5.3: İyonogram üzerinde farklı yönlerden elde edilen elektron yoğunluğu profillerinin gösterimi [2].

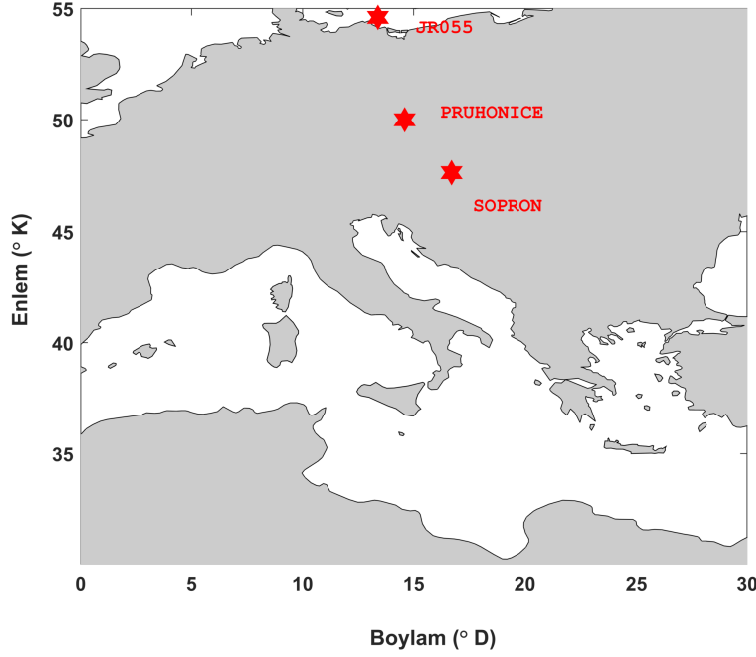
len Sopron istasyonundan eğik olarak Pruhonice istasyonundan yayın gönderilmiştir. Gönderilen yayının Pruhonice iyonosondasından alındığı bilgisi doğrultusunda belirlenen saatlerde çevre iyonosondalardan erişilebilen iyonogramlarda herhangi bir eğik iyonogram verisi gözlenmemiştir. Sopron istasyonundan gönderilen radyo dalgaları Pruhonice iyonosondası tarafından alınmıştır.

Şekil 5.5'de foF2 ve TEİ ölçümleri ve ölçümler kullanılarak elde edilen IONOLAB-CK kestirim haritaları gösterilmiştir. Sabah saatlerinde iyonkürede Güneydoğu-Kuzeybatı doğrultusunda bir yönseme bulunmaktadır. Küresel olarak yayınlanan foF2 haritalarının çözünürlükleri  $2.5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 'dir. Bu durumda incelenen bölgede genellikle bir adet frekans kestirimi sunulurken bölge içinde bir yönseme bulunmaktadır. Şekil 5.5g'de verilen IONOLAB-CK kestirim haritasında elde edilen foF2 kestirimleri IRI-Plas modelinin girdilerinin güncellenmesinde kullanılmıştır.

Şekil 5.6'da Pruhonice istasyonundan 0715 GS saatinde elde edilen iyonogramlar gösterilmiştir. Şekil 5.6a'da kaydedilen iyonogram hem dikey hem de eğik iyonogramları göstermektedir. Pembe ve yeşil renkli izler iyonosondanın dikey iyonogram ölçümleridir.

Şekil 5.6b ve Şekil 5.6c'de sırasıyla sıradan ve sıradışı eğik iyonogramlar gösterilmiştir.



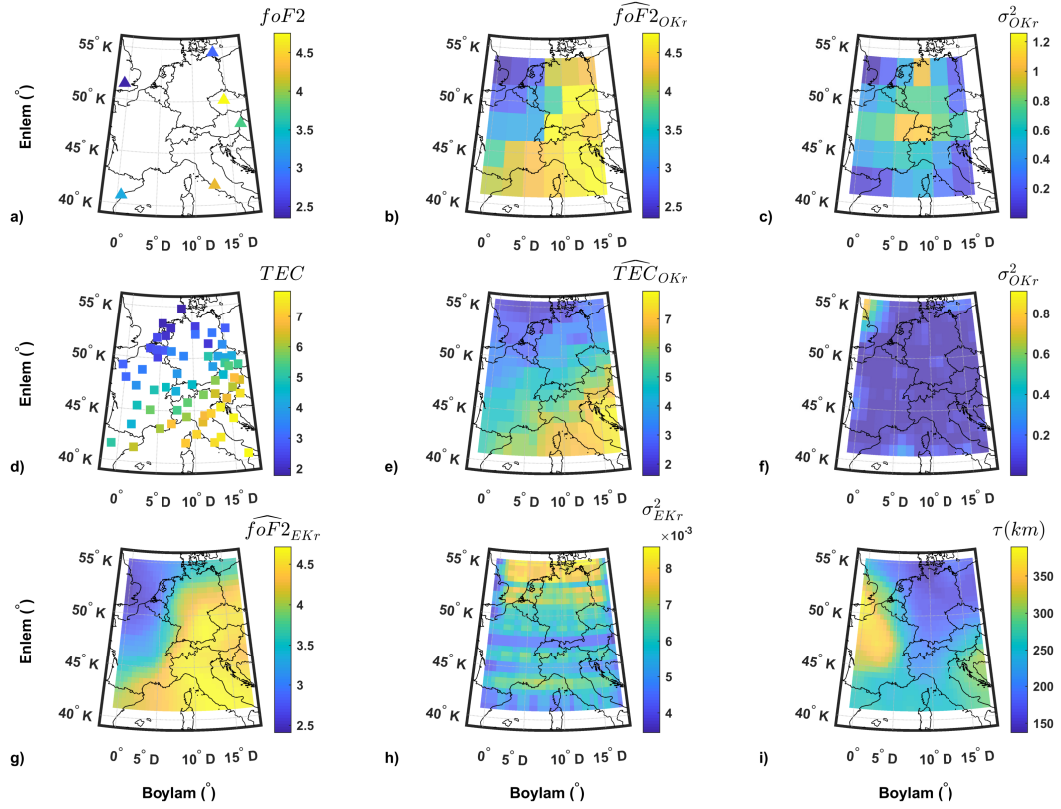


Şekil 5.4: Eğik iyonküresel dalga yayını testi kapsamında kullanılan iyonosonda alıcı (Pruhonice ve Juliusruh) ve verici (Sopron) noktaları.

Şekil 5.6b’de gösterilen ionogramda Sopron’dan gönderilen sinyalin sıradan dalgaları 2.4 MHz ile 5.6 MHz aralığında ulaşmıştır. İyonogram incelendiğinde 5.6 MHz üzerinde frekans bulunmamaktadır. Şekil 5.6c’de verilen sıradışı ionogram incelendiğinde ise 3.3 MHz ile 6.3 MHz aralığında gözlemler bulunmaktadır.

Şekil 5.6’de verilen ionogramların girdileri güncellenmiş IRI-Plas modeli kullanılarak ışın izleme algoritması IONOLAB-RAY ile incelenmiştir. Şekil 5.5g’de kestirilen foF2 haritaları ile IRI-Plas güncellenmiştir. IONOLAB-RAY kullanılarak IRI-Plas modelinin güncellenmediği durum, yüksek çözünürlüklü TEİ haritaları ile güncellendiği durum ve IONOLAB-CK ile foF2 kestirim haritaları ile güncellendiği durum karşılaştırılmıştır.

Pruhonice iyonosondası Sopron iyonosondasının Kuzey ve Kuzeybatı yönlerinde bulunmaktadır. Gönderilen dalganın yanca ve yükseliş açıları ise yanca da kuzeye göre  $26^{\circ}$  ile  $34^{\circ}$  arasında  $0.5^{\circ}$  adımlar ile taranmıştır. Yükseliş açısı ise  $42^{\circ}$  ile  $54^{\circ}$  arasında  $0.5^{\circ}$  adımlar ile taranmıştır. Tarama açı aralıkları sadece istenen bölgeyi kapsayacak şekilde iyonosondaların konumları ve uzaklıkları kullanılarak seçilmiştir.

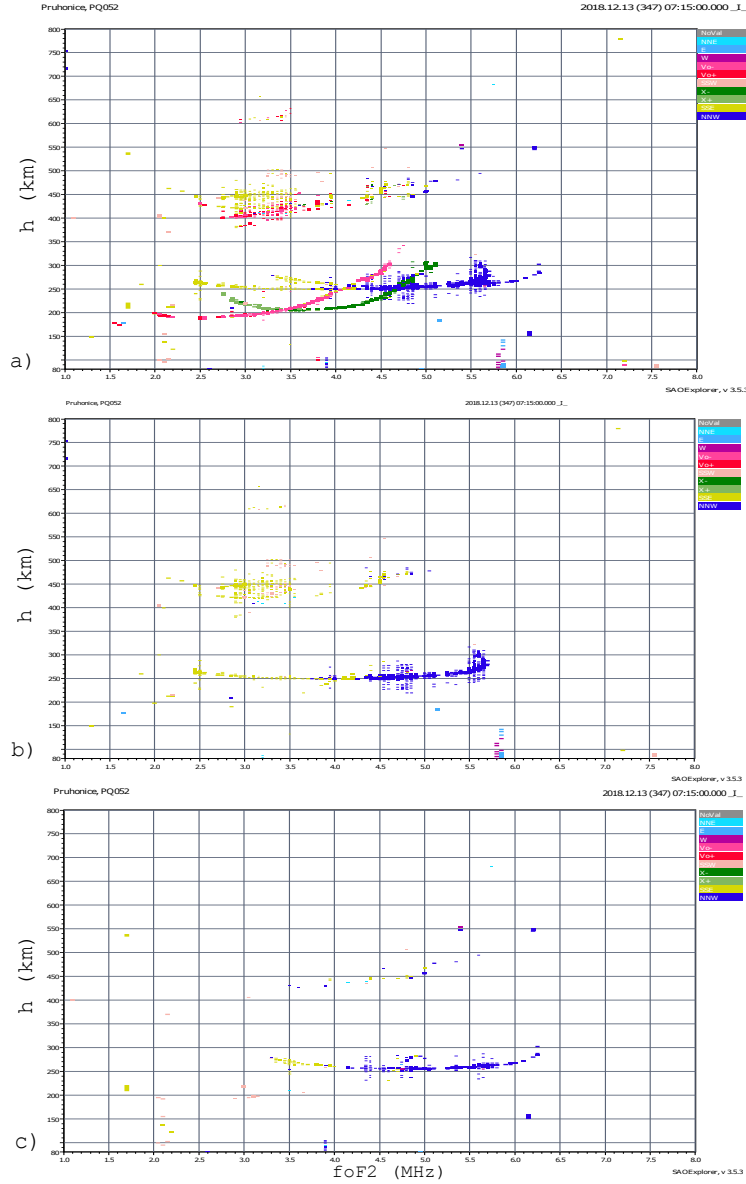


Şekil 5.5: IONOLAB-CK 13 Aralık 2018 günü 0715 GS, a) foF2 örnek noktaları, b)  $\widehat{foF2}_{OKr}$  (Çözünürlük:  $2.62^\circ$ ), c) foF2 için  $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , d) TEİ örnek noktaları, e) TEİ OKr kestirim yüzeyi,  $\widehat{TEC}_{OKr}$ , f) TEİ OKr kestirim değışintisi  $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , g) foF2 EKr kestirim yüzeyi,  $\widehat{foF2}_{EKr}$  (Çözünürlük:  $0.50^\circ$ ), h) foF2 EKr kestirim değışintisi  $\hat{\sigma}_{EKr}^2$ , i) Katman kalınlığı,  $\hat{\tau}$ .

Şekil 5.7’de IRI-Plas modelinin girdilerinin güncellenmemiş olduğu durumunda elde edilen dalga yolları gösterilmiştir. Şekil 5.7’de verici Sopron ve alıcı Puhonice olan ışınlar bulunmaktadır. Alıcı noktasına ulaşan sıradan dalgalar 2.4 MHz ile 4.4 MHz arasında sıradışı dalgalar ise 3.2 MHz ile 5.3 MHz arasındadır. Verilen frekanslar vericiden yanca açığı  $28^\circ-34^\circ$  ve yükseliş  $42^\circ-51^\circ$  aralığında gönderilen radyo dalgaları alıcıya ulaşmıştır.

Şekil 5.8’de IRI-Plas modelinin Ortalamasız Krigleme ile aradeğerlenmiş TEİ girdisi ile güncellendiği durum gösterilmiştir. Şekil 5.8’de verici Sopron ve alıcı Puhonice olan ışınlarda alıcı noktasına ulaşan sıradan dalgalar 2.5 MHz ile 3.5 MHz arasında sıradışı dalgalar ise 3.3 MHz ile 3.9 MHz arasında gözlenmiştir. Gönderim frekansları vericiden yanca açığı  $30^\circ-32^\circ$  ve yükseliş  $48^\circ-52^\circ$  aralığında alıcıya ulaşmıştır.

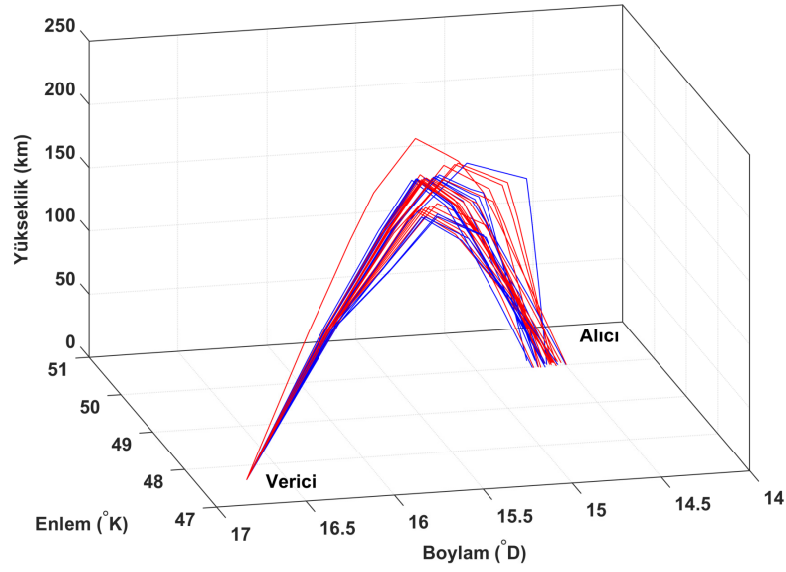
Şekil 5.9’de IRI-Plas modelinin IONOLAB-CK ile elde edilen foF2 kestirim haritası girdisi



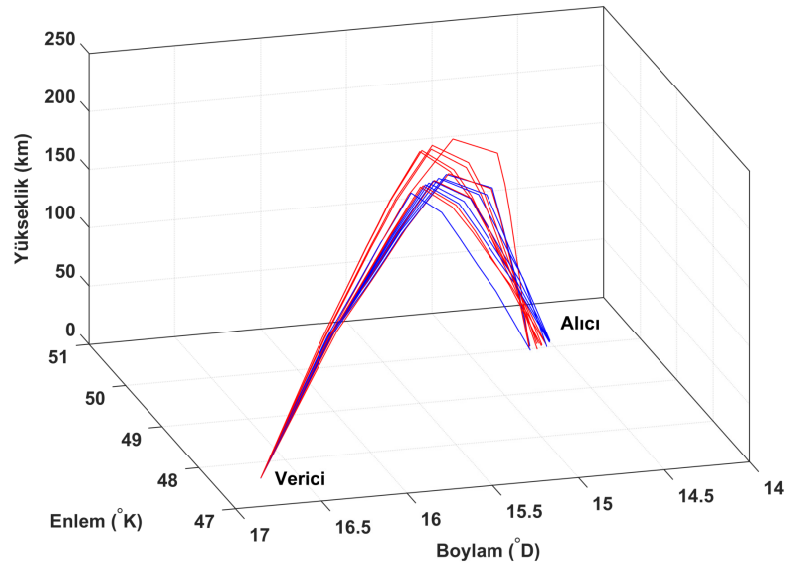
Şekil 5.6: 13 Aralık 2018, 0715 GS Pruhonice istasyonu ionogramları a) Dikey ve eğik, b) Eğik sıradan, c) Eğik sıradışı ionogram.

ile güncellendiği durum gösterilmiştir. Şekil 5.9’de verici Sopron ve alıcı Pruhonice olan ışınlardan alıcıya ulaşan sıradan dalgalar 2.6 MHz ile 5.2 MHz arasında sıradışı dalgalar ise 3.3 MHz ile 5.8 MHz arasında gözlenmiştir. Verilen frekanslarda gönderilen yanca açısı  $30^{\circ}$ - $32^{\circ}$  ve yükseliş  $45^{\circ}$ - $50^{\circ}$  aralığında sinyaller alıcıya ulaşmıştır.

Sopron istasyonundan gönderilen dalganın Pruhonice istasyonunda eğik ionogramı 0715 GS için IONOLAB-RAY ile elde edilen yayılım yolları, frekansları, yanca ve yükseliş açıları incelendiğinde IRI-Plas modeline foF2 kestirimi girildiği durumda hem sıradan hem de sıradışı dalgaların gözlenen frekans aralıkları bakımından ionograma çok yakın sonuçlar

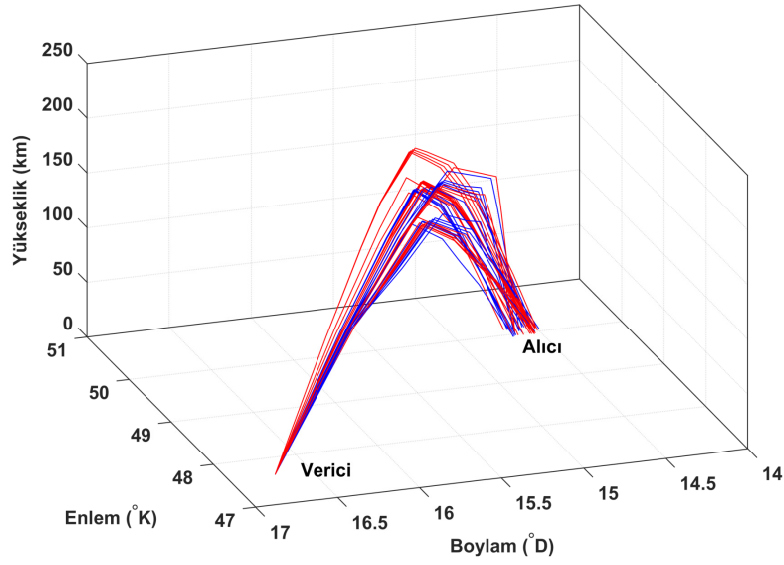


Şekil 5.7: IRI-Plas modeline girdi yapılmadığı durumda dalga yayılım yolları, 13 Aralık 2018, 0715 GS Sopron istasyonundan Pruhonice istasyonuna gönderilen dalgalar (Sıradan dalgalar kırmızı düz çizgi, sıradışı dalgalar mavi düz çizgi).



Şekil 5.8: IRI-Plas modeline TEİ girdi yapıldığı durumda dalga yayılım yolları, 13 Aralık 2018, 0715 GS Sopron istasyonundan Pruhonice istasyonuna gönderilen dalgalar (Sıradan dalgalar kırmızı düz çizgi, sıradışı dalgalar mavi düz çizgi).

elde edilmiştir. İyonogramda sıradan dalgalar 5.6 MHz'den sonra gözlenmezken aynı değer IRI-Plas'a girdi yapılmadığı durumda 4.4 MHz, TEİ girildiği durumda 3.5 MHz gözlenmiş-



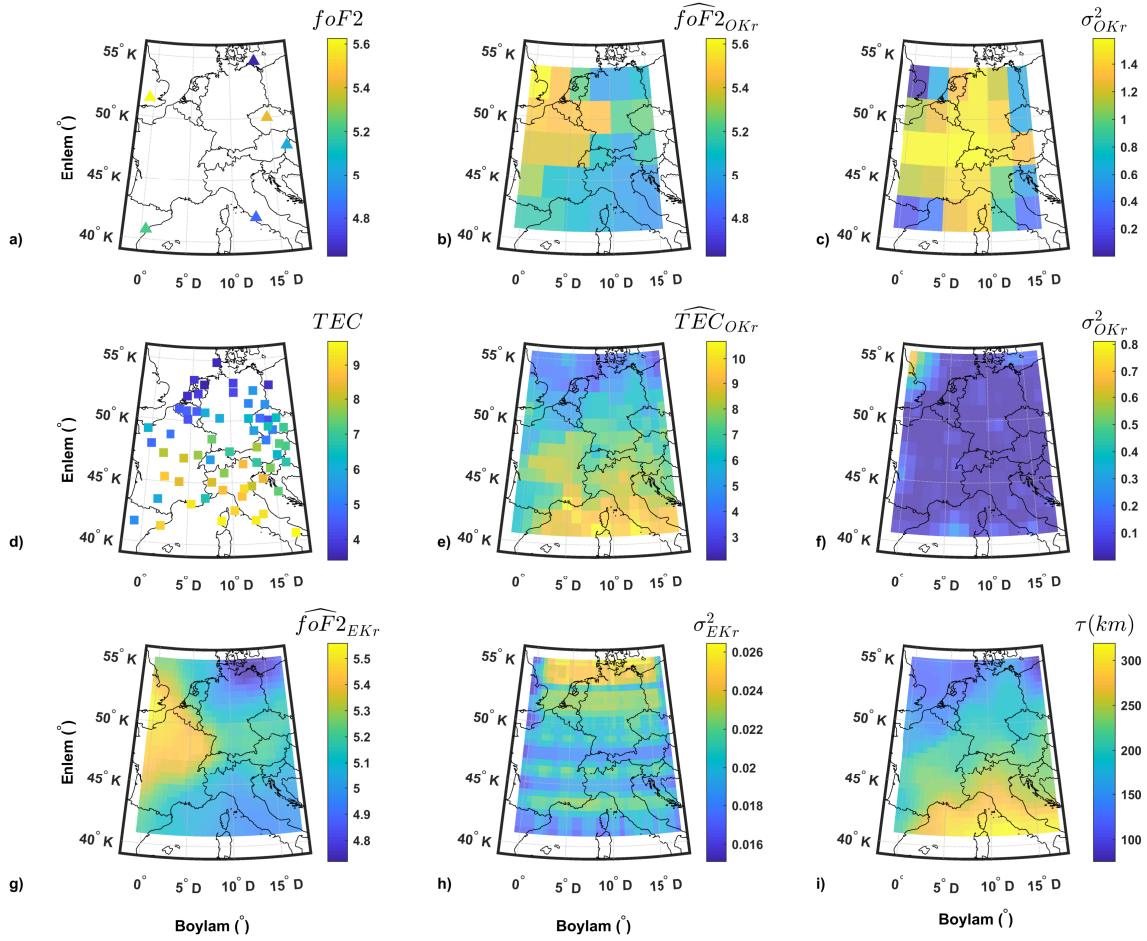
Şekil 5.9: IRI-Plas modeline foF2 kestirimi girdi yapıldığı durumda dalga yayılım yolları, 13 Aralık 2018, 0715 GS Sopron istasyonundan Pruhonice istasyonuna gönderilen dalgalar (Sıradan dalgalar kırmızı düz çizgi, sıradışı dalgalar mavi düz çizgi).

tir. Diğer yandan foF2 kestirimi kullanılması ile üst frekansa 5.2 MHz ile en yakın sonuç elde edilmiştir.

Şekil 5.10'de yerel öğle zamanı foF2 ve TEİ ölçümleri ile ölçümler kullanılarak elde edilen IONOLAB-CK kestirim haritaları gösterilmiştir. Şekil 5.10g'de verilen IONOLAB-CK yöntemi ile elde edilen kestirim haritası IRI-Plas modelinde kullanılmıştır. Yerel öğle saatlerinde elde edilen kestirim haritalarında Doğu-Batı doğrultusunda yönseme vardır.

Şekil 5.11'de Pruhonice istasyonundan 1100 GS saatinde elde edilen ionogramlar gösterilmiştir. Şekil 5.11a'da kaydedilen ionogram hem dikey hem de eğik ionogramları göstermektedir. Pembe renkli olarak gösterilmiş dikey ionogram izinde birinci ve ikinci yansımalar farklı yüksekliklerde öğle saatinde görülmektedir.

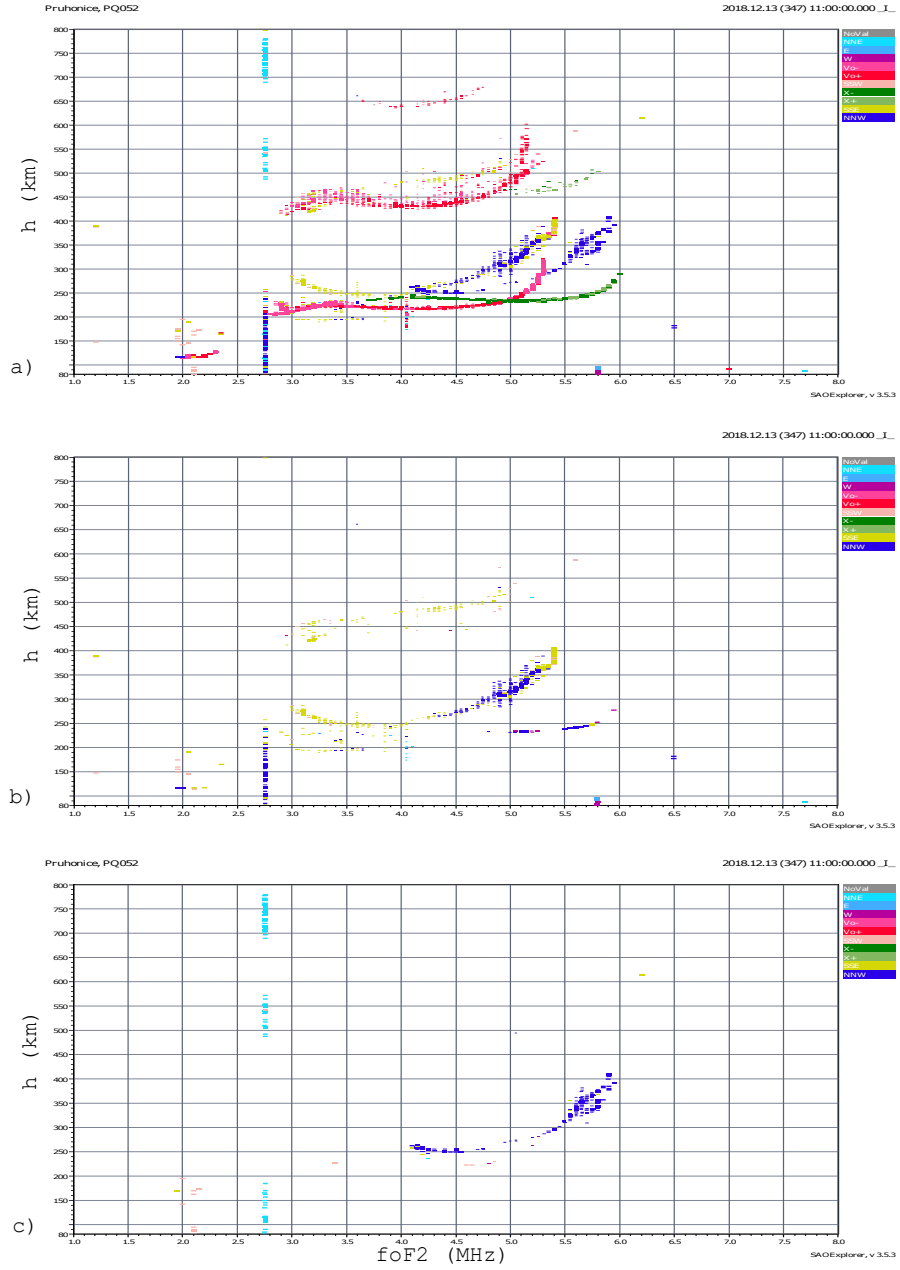
Şekil 5.11b ve Şekil 5.11c'de sırasıyla sıradan ve sıradışı eğik ionogramlar gösterilmiştir. Şekil 5.11b'de gösterilen ionogramda sıradan dalgaların 3.0 MHz ile 5.4 MHz aralığında ulaştığı gözlenmektedir. İyonogram incelendiğinde 5.4 MHz üzerinde foF2 bulunmamaktadır. Şekil 5.11c'de verilen sıradışı ionogram incelendiğinde ise 4.1 MHz ile 5.9 MHz aralığında gözlemler bulunmaktadır.



Şekil 5.10: 13 Aralık 2018, 1100 GS, a) foF2 örnek noktaları, b)  $\widehat{foF2}_{OKr}$  (Çözünürlük:  $2.62^\circ$ ), c) foF2 için  $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , d) TEİ örnek noktaları, e) TEİ OKr kestirim yüzeyi,  $\widehat{TEC}_{OKr}$ , f) TEİ OKr kestirim değışintisi  $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , g) foF2 EKr kestirim yüzeyi,  $\widehat{foF2}_{EKr}$  (Çözünürlük:  $0.50^\circ$ ), h) foF2 EKr kestirim değışintisi  $\hat{\sigma}_{EKr}^2$ , i) Katman kalınlığı,  $\hat{\tau}$ .

Şekil 5.11’de verilen ionogramların girdileri güncellenmiş IRI-Plas modeli kullanılarak IONOLAB-RAY ışın izleme algoritması IONOLAB-RAY ile incelenmiştir. Şekil 5.10g’de kestirilen foF2 haritaları ile IRI-Plas güncellenmiştir. IONOLAB-RAY kullanılarak IRI-Plas modelinin güncellenmediği durum, yüksek çözünürlüklü TEİ haritaları ile güncellendiği durum ve IONOLAB-CK ile foF2 kestirim haritaları ile güncellendiği durum karşılaştırılmıştır.

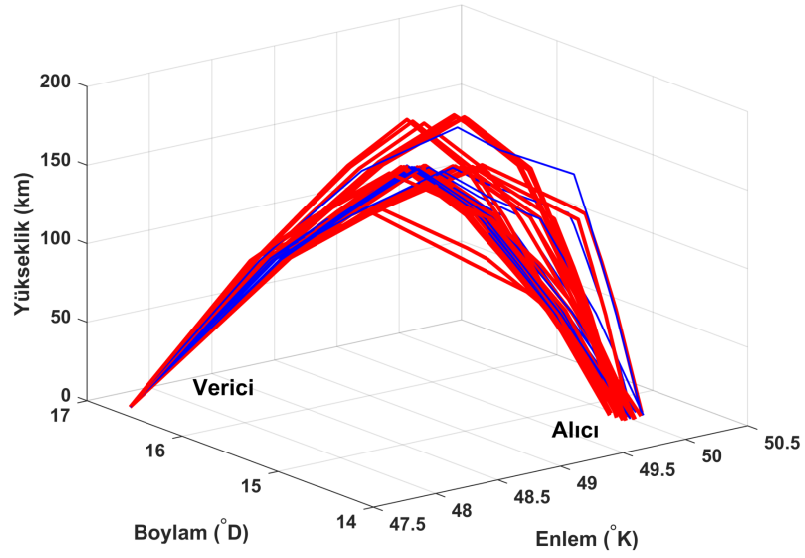
Şekil 5.12’de verici Sopron ve alıcı Pruhonice olan ışınlar gösterilmiştir. Pruhonice ionosondasına ulaşan sıradan dalgalar 3.0 MHz ile 5.8 MHz arasında sıradışı dalgalar ise 4.6 MHz ile 6.0 MHz arasındadır. Verilen frekanslarda gönderilen yanca açığı  $27^\circ - 31^\circ$  ve yükseliş  $46^\circ - 50^\circ$  aralığında dalgalar alıcıya ulaşmıştır.



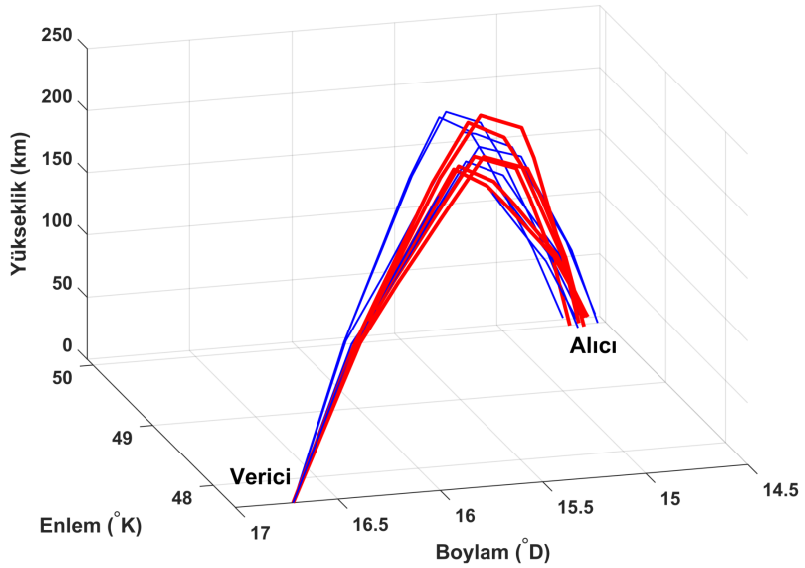
Şekil 5.11: 13 Aralık 2018, 1100 GS Pruhonice istasyonu ionogramları a) Dikey ve eğik, b) Eğik sıradan, c) Eğik sıradışı ionogram.

Şekil 5.13’de IRI-Plas modelinin Ortalamasız Krigleme ile aradeğerlenmiş TEİ haritaları ile güncellendiği durum gösterilmiştir. Şekil 5.13’de verici Sopron ionosondası ve alıcı Pruhonice ionosondası olan ışınlar gösterilmiştir. Alıcı noktasına ulaşan sıradan dalgalar 3.2 MHz ile 4.1 MHz arasında sıradışı dalgalar ise 4.1 MHz ile 5.3 MHz arasındadır. Verilen frekanslar yanca açısı  $29^{\circ} - 31^{\circ}$  ve yükseliş  $48^{\circ} - 54^{\circ}$  aralığında alıcıya ulaşmıştır.

Şekil 5.14’de IRI-Plas modelinin IONOLAB-CK kestirim haritaları ile foF2 kestirimi gir-



Şekil 5.12: IRI-Plas modeline girdi yapılmadığı durumda dalga yayılım yolları, 13 Aralık 2018, 1100 GS Sopron istasyonundan Pruhonice istasyonuna gönderilen dalgalar (Sıradan dalgalar kırmızı düz çizgi, sıradışı dalgalar mavi düz çizgi).

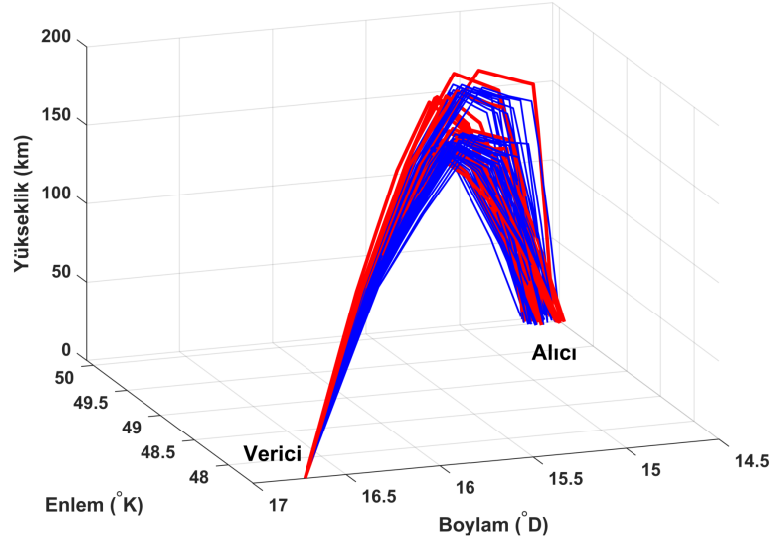


Şekil 5.13: IRI-Plas modeline TEİ girdi yapıldığı durumda dalga yayılım yolları, 13 Aralık 2018, 1100 GS Sopron istasyonundan Pruhonice istasyonuna gönderilen dalgalar (Sıradan dalgalar kırmızı düz çizgi, sıradışı dalgalar mavi düz çizgi).

dileri ile güncellendiği durum gösterilmiştir. Şekil 5.14'de verici Sopron ve alıcı Pruhonice olan ışınlar gösterilmiştir. Alıcı noktasına ulaşan sıradan dalgalar 3.1 MHz ile 5.6 MHz ara-



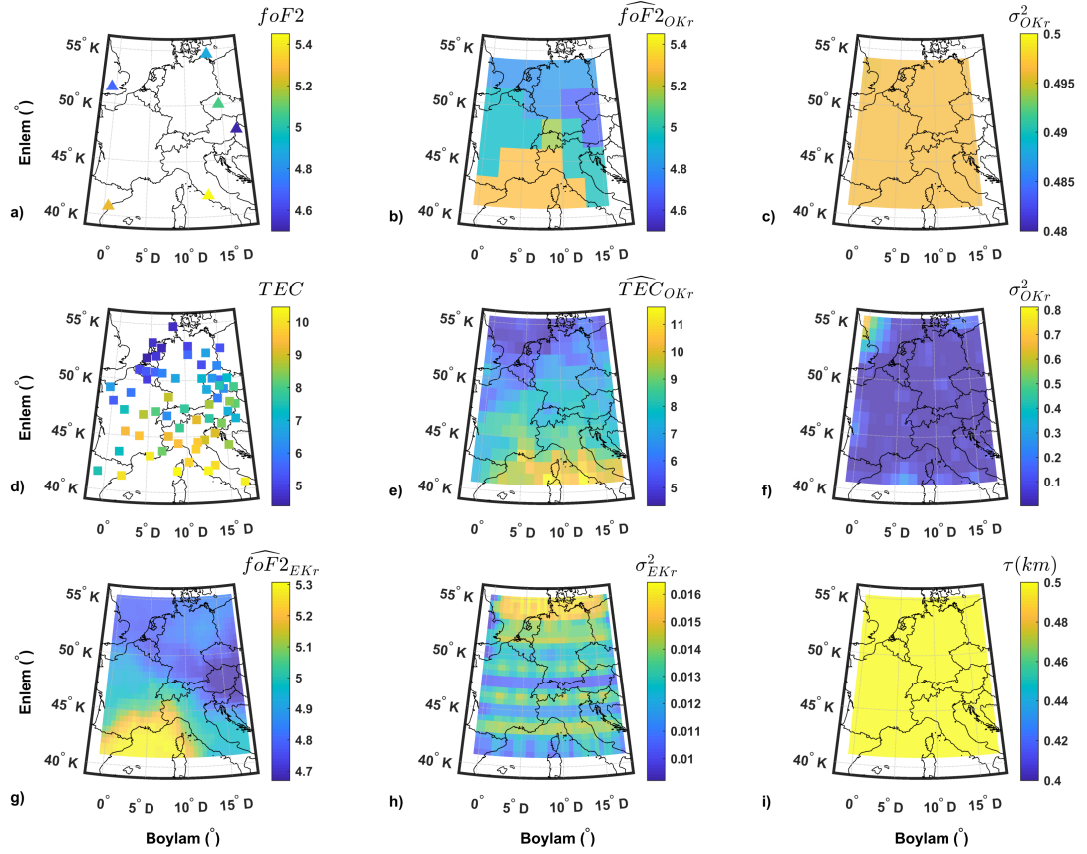
sında sıradışı dalgalar ise 4.5 MHz ile 5.9 MHz arasında gözlenmiştir. Verilen frekanslar yanca açısı aralığı  $29^\circ - 31^\circ$  ve yükseliş  $46^\circ - 51^\circ$  aralığında alıcıya ulaşmıştır.



Şekil 5.14: IRI-Plas modeline foF2 kestirimi girdi yapıldığı durumda dalga yayılım yolları, 13 Aralık 2018, 1100 GS Sopron istasyonundan Pruhonice istasyonuna gönderilen dalgalar (Sıradan dalgalar kırmızı düz çizgi, sıradışı dalgalar mavi düz çizgi).

Yerel öğle saati olan 1100 GS’de Sopron iyonosondasından gönderilen dalganın Pruhonice iyonosondasında alınan eğik ionogramı IONOLAB-RAY ile elde edilen yayılım yolları, frekansları, yanca ve yükseliş açıları incelendiğinde IRI-Plas modeli IONOLAB-CK ile elde edilen yüksek çözünürlüklü foF2 kestirimleri ile güncellendiği durumda hem sıradan hem de sıradışı dalgaların gözlenen frekans aralıkları bakımından ionogramda gözlenen frekans aralıkları ile en yakındır. İyonogramda sıradan dalgalar 5.4 MHz’den sonra gözlenmezken aynı değer IRI-Plas’a girdi yapılmadığı durumda 5.8 MHz, TEİ girildiği durumda 4.1 MHz gözlenmiştir. Diğer yandan foF2 kestirimi kullanılması ile üst frekansa 5.6 MHz ile en yakın sonuç elde edilmiştir. foF2 kestirim haritalarının kullanılması ile sıradan dalgalar ionogramına en yakın frekans aralığında gözlenmiştir.

Başka bir uygulama örneğinde Şekil 5.15’de foF2 ve TEİ ölçümleri ile ölçümler kullanılarak elde edilen IONOLAB-CK kestirim haritaları gösterilmiştir. Güney-Kuzey doğrultulu yönsemeye sahip foF2 haritası Şekil 5.15g’de sunulmuştur. Şekil 5.15g’de verilen IONOLAB-CK kestirim haritasında elde edilen değerler IRI-Plas modelinin güncellenmesinde kullanılmıştır.

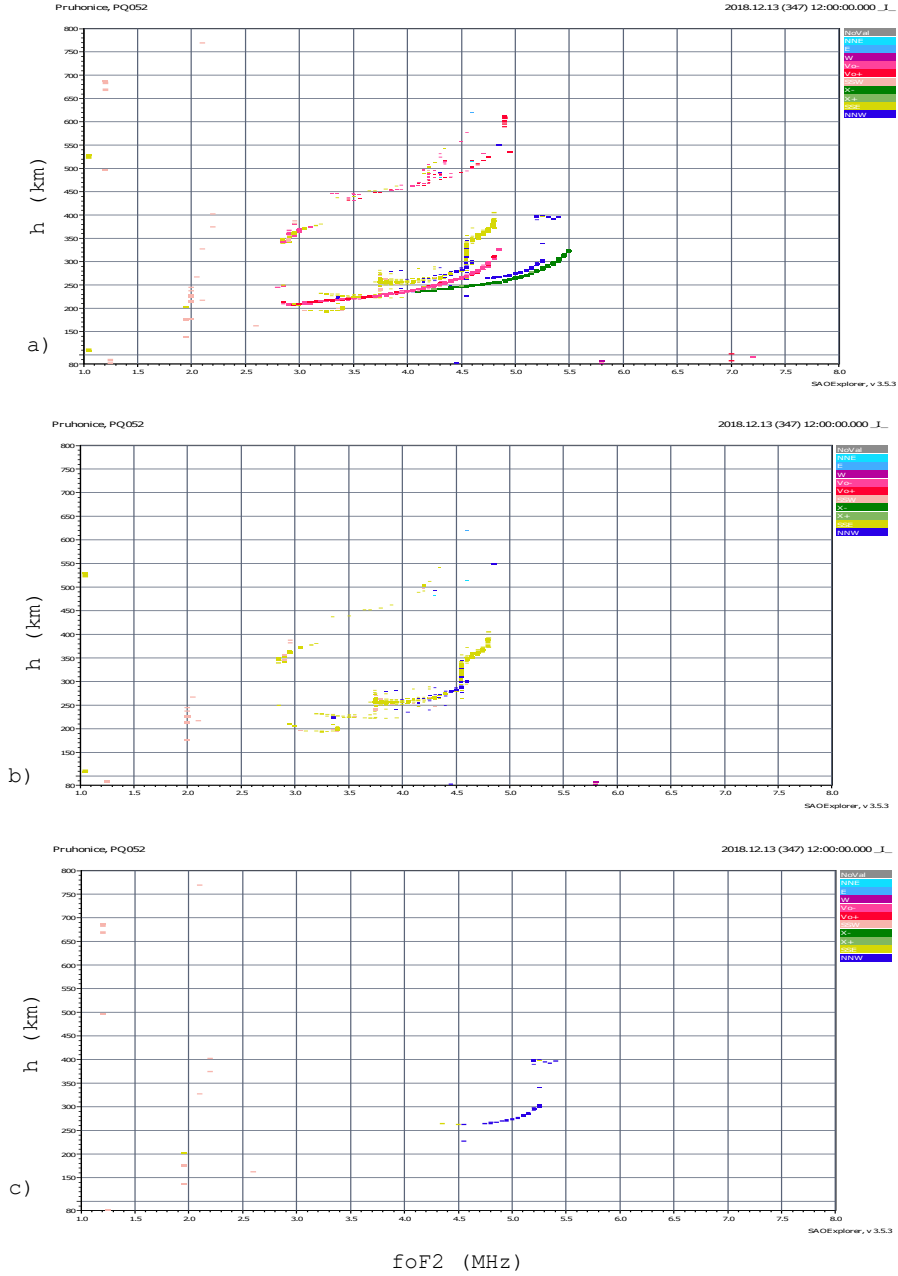


Şekil 5.15: 13 Aralık 2018, 1200 GS, a) foF2 örnek noktaları, b)  $\widehat{foF2}_{OKr}$  (Çözünürlük:  $2.62^\circ$ ), c) foF2 için  $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , d) TEİ örnek noktaları, e) TEİ OKr kestirim yüzeyi,  $\widehat{TEC}_{OKr}$ , f) TEİ OKr kestirim değışintisi  $\hat{\sigma}_{OKr}^2$ , g) foF2 EKr kestirim yüzeyi,  $\widehat{foF2}_{EKr}$  (Çözünürlük:  $0.50^\circ$ ), h) foF2 EKr kestirim değışintisi  $\hat{\sigma}_{EKr}^2$ , i) Katman kalınlığı,  $\hat{\tau}$ .

Şekil 5.16'de Pruhonice istasyonundan 1200 GS saatinde elde edilen ionogramlar gösterilmiştir. Şekil 5.16a'da kaydedilen ionogram hem dikey hem de eğik ionogramları göstermektedir. Pembe ve yeşil renk ile gösterilen dikey ionogramlardır.

Şekil 5.16b ve Şekil 5.16c'de sırasıyla sıradan ve sıradışı eğik ionogramlar gösterilmiştir. Şekil 5.16b'de gösterilen ionogramda sıradan dalgaların 3.0 MHz ile 4.8 MHz aralığında ulaştığı gözlenmektedir. İyonogram incelendiğinde 4.8 MHz üzerinde foF2 alınmadığı gözlenmiştir. Şekil 5.11c'de verilen sıradışı ionogram incelendiğinde ise 4.7 MHz ile 5.2 MHz aralığında gözlemler bulunmaktadır.

Şekil 5.16'de verilen ionogramların girdileri güncellenmiş IRI-Plas modeli kullanılarak IONOLAB-RAY ışın izleme algoritması IONOLAB-RAY ile incelenmiştir. Şekil 5.15g'de

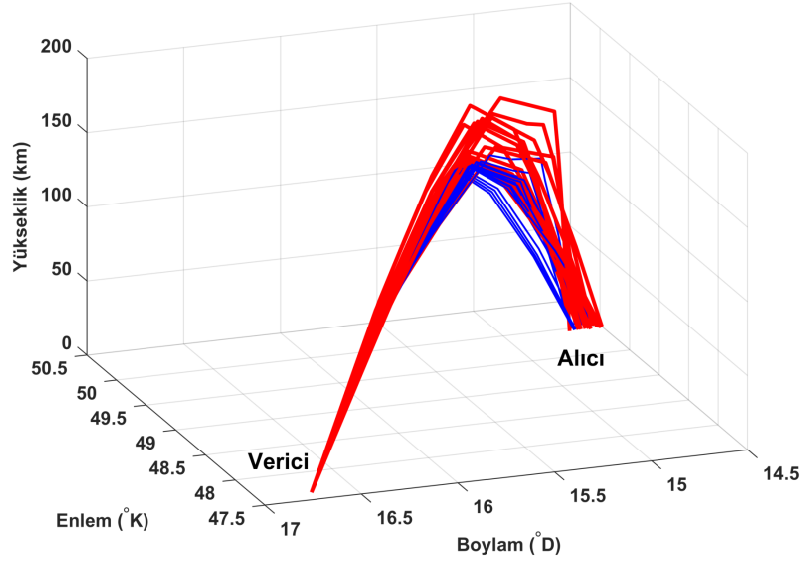


Şekil 5.16: 13 Aralık 2018, 1200 GS Pruhonice istasyonu ionogramları a) Dikey ve eğik, b) Eğik sıradan, c) Eğik sıradışı ionogram.

kestirilen foF2 haritaları ile IRI-Plas güncellenmiştir. IONOLAB-RAY kullanılarak IRI-Plas modelinin güncellenmediği durum, yüksek çözünürlüklü TEİ haritaları ile güncellendiği durum ve IONOLAB-CK ile foF2 kestirim haritaları ile güncellendiği durum karşılaştırılmıştır.

Şekil 5.17’de IRI-Plas modelinin güncellenmediği durum gösterilmiştir. Şekil 5.17’de verici Sopron ionosondası ve alıcı Pruhonice ionosondası olan ışınlar gösterilmiştir. Alıcıya ulaşan sıradan dalgalar 3.6 MHz ile 5.4 MHz arasında sıradışı dalgalar ise 4.4 MHz ile 5.5 MHz

arasındadır. Verilen frekanslar sırasıyla yükseliş ve yanca da  $44^{\circ}$ - $51^{\circ}$  ve  $30^{\circ}$ - $32^{\circ}$  dolaylarında alıcıya ulaşmıştır.

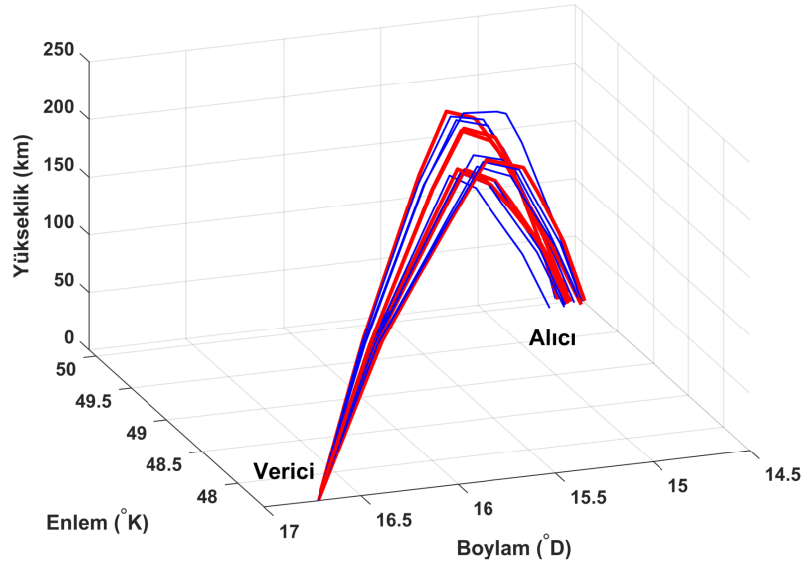


Şekil 5.17: IRI-Plas modeline girdi yapılmadığı durumda dalga yayılım yolları, 13 Aralık 2018, 1200 GS Sopron istasyonundan Pruhonice istasyonuna gönderilen dalgalar (Sıradan dalgalar kırmızı düz çizgi, sıradışı dalgalar mavi düz çizgi).

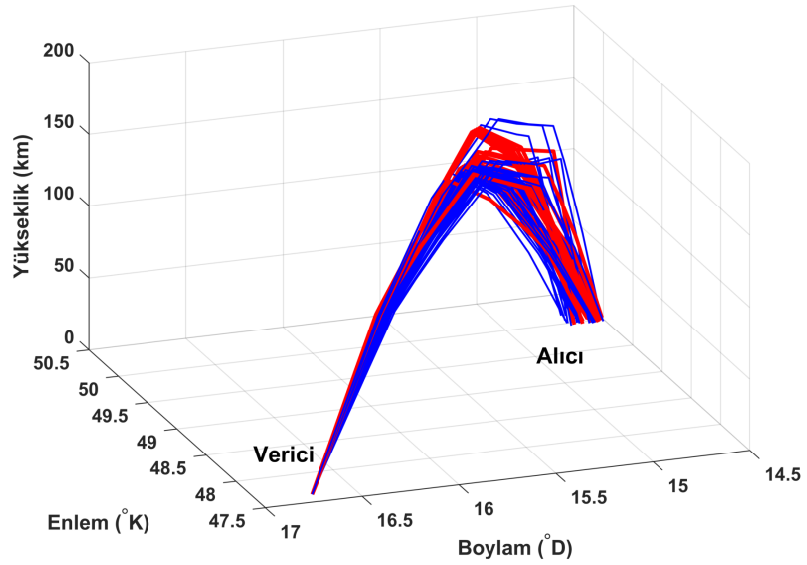
Şekil 5.18’de IRI-Plas modelinin girdilerinin Ortalamasız Krigleme ile aradeğerlenmiş TEİ ile güncellendiği durum gösterilmiştir. Şekil 5.18’de verici Sopron iyonosondası ve alıcı Pruhonice iyonosondası olan ışınlar gösterilmiştir. Alıcıya ulaşan sıradan dalgalar 3.3 MHz ile 4.5 MHz arasında, sıradışı dalgalar ise 4.2 MHz ile 5.3 MHz arasında gözlenmiştir. Verilen frekanslar sırasıyla yükseliş ve yanca da  $46^{\circ}$ - $51^{\circ}$  ve  $30^{\circ}$ - $32^{\circ}$  dolaylarında alıcıya ulaşmıştır.

Şekil 5.19’de IRI-Plas modelinin girdilerinin IONOLAB-CK ile elde edilen foF2 kestirim haritası kullanılarak güncellendiği durum gösterilmiştir. Şekil 5.19’de verici Sopron iyonosondası ve alıcı Pruhonice iyonosondası olan ışınlar gösterilmiştir. Alıcıya ulaşan sıradan dalgalar 3.0 MHz ile 5.3 MHz arasında sıradışı dalgalar ise 4.3 MHz ile 5.5 MHz arasında gözlenmiştir. Verilen frekanslar sırasıyla yükseliş ve yanca da  $47^{\circ}$ - $51^{\circ}$  ve  $30^{\circ}$ - $32^{\circ}$  dolaylarında alıcıya ulaşmıştır.

Yerel öğle saatine yakın 1200 GS’de Sopron iyonosondasından gönderilen dalganın Pruhonice iyonosondasında elde edilen eğik iyonogramı IONOLAB-RAY ile elde edilen yayılım yolları, frekansları, yanca ve yükseliş açıları karşılaştırılmıştır. IRI-Plas modelinin foF2 kes-



Şekil 5.18: IRI-Plas modeline TEİ girdi yapıldığı durumda dalga yayılım yolları, 13 Aralık 2018, 1200 GS Sopron istasyonundan Pruhonice istasyonuna gönderilen dalgalar (Sıradan dalgalar kırmızı düz çizgi, sıradışı dalgalar mavi düz çizgi).



Şekil 5.19: IRI-Plas modeline foF2 girdi yapıldığı durumda dalga yayılım yolları, 13 Aralık 2018, 1200 GS Sopron istasyonundan Pruhonice istasyonuna gönderilen dalgalar (Sıradan dalgalar kırmızı düz çizgi, sıradışı dalgalar mavi düz çizgi).

tirimleri ile güncellendiği durumda hem sıradan hem de sıradışı dalgaların gözlenen frekans aralıkları IRI-Plas modeline girdi yapılmadığı duruma benzer olup üst frekanslarda iyonog-

rama yakınsamıştır. Diğer yandan iyonogram verilerinde sıradan iyonogramda daha alt frekanslarda foF2 gözlenmiştir. Sıradışı iyonogramda frekans aralıkları ise benzer bulunmuştur.

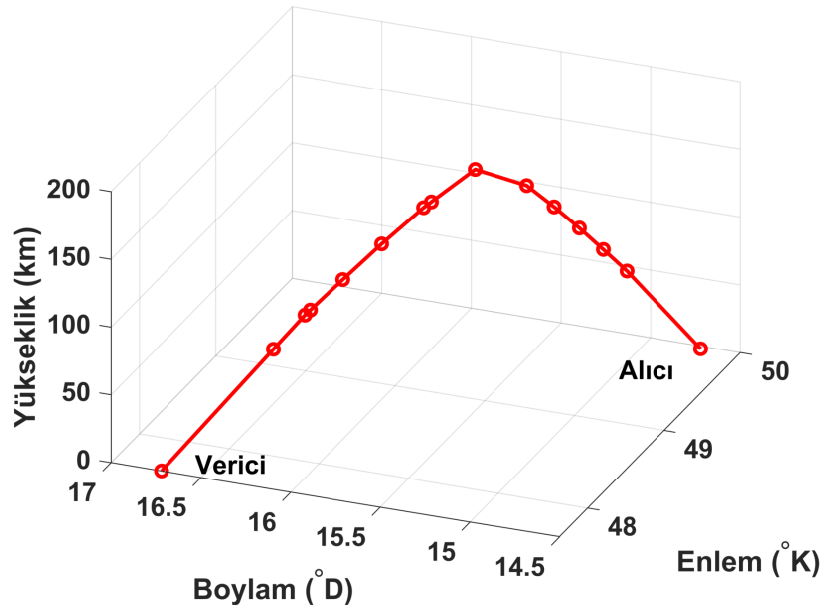
Elde edilen sonuçlara göre gönderim açısı aralıklarında ortak olarak yancada  $30^{\circ} - 32^{\circ}$ , yükselişte  $48^{\circ} - 52^{\circ}$  açıları arasında  $1^{\circ}$  adımlar ve frekans aralığı 0715 GS için sıradan dalgalar için 2.4 MHz-5.3 MHz diğer saatler, sıradan ve sıradışı dalgalar için 3.0 MHz-5.9 MHz aralığında  $0.1$  MHz adımlar ile taranarak 435 adet dalga yolundan alıcıya ulaşan dalgaların sayısı ve oranı Çizelge 5.2’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre IRI-Plas girdi verilmeden kullanıldığında taranan dalga yollarından sabah saati için küçük bir kısmı ulaşabilirken öğle saatinde %35.0 kısmı alıcıya ulaşmıştır. IRI-Plas’a TEİ girdi olarak verildiği durumda sabah saatleri için IRI-Plas’a girdi verilmediği duruma göre daha fazla dalga yolu ulaşırken öğle saatlerinde ulaşan dalga sayısı IRI-Plas’a girdi verilmediği duruma göre daha azdır. Öğle saatinde test edilen saat için TEİ ve foF2 arasında farklı davranış bulunduğu için TEİ girdi verilmesi belirgin bir iyileşme göstermemiştir. IRI-Plas’a IONOLAB-CK ile kestirilen foF2 haritaları girdi olarak verildiği durumda ise diğer iki duruma göre tüm saatlerde daha fazla dalga yolu alıcıya ulaşmıştır. 1200 GS saatinde sıradan dalgaların %65.5 sıradışı dalgaların %25.8 kısmı alıcıya ulaşmıştır.

Çizelge 5.2: Taranan açı ve frekans aralıklarında alıcıya ulaşana dalga yolu sayısı ve toplam dalga yolu sayısına oranı.

Saat (GS)	IRI – Plas		IRI – Plas(TEC)		IRI – Plas( $\widehat{foF2}$ )	
	Sıradan	Sıradışı	Sıradan	Sıradışı	Sıradan	Sıradışı
0715	26 (%6.3)	14 (%3.2)	44 (%10.2)	71 (%16.3)	160 (%36.9)	109 (%25.0)
1100	46 (%11.0)	57 (%13.2)	41 (%9.4)	33 (%7.5)	288 (%66.3)	144 (%33.2)
1200	152 (%35.0)	85 (%19.4)	124 (%28.5)	118 (%27.1)	285 (%65.5)	112 (%25.8)

13 Aralık 2018 günü yerel öğle saatinde yanca  $30^{\circ}$ , yükseliş  $49^{\circ}$  açılarında 4.7 MHz frekansında gönderilen dalganın örnek olarak dalga yolu ve zaman gecikmesi verilmiştir. Şekil 5.20’de verilen örnekte gönderilen dalganın alıcı verici arasındaki dalga yolu gösterilmiştir.

Örnek olarak verilen dalga yolunun Şekil 5.21’de dalga yolu uzunluğu ve zaman gecikmesi sunulmuştur. Şekil 5.21a’da iyonküre içinde herbir adımda toplam yol uzunluğu ve Şekil 5.21b’de her bir adım içinde oluşan zaman gecikmesi gösterilmiştir. Dalga yolu uzunluğu verilen örnek için 484 km ve toplam yol boyunca zaman gecikmesi 1.80 ms olarak hesap-



Şekil 5.20: 13 Aralık 2018, 1100 GS, 4.7 MHz frekansında sıradan dalga yolu.

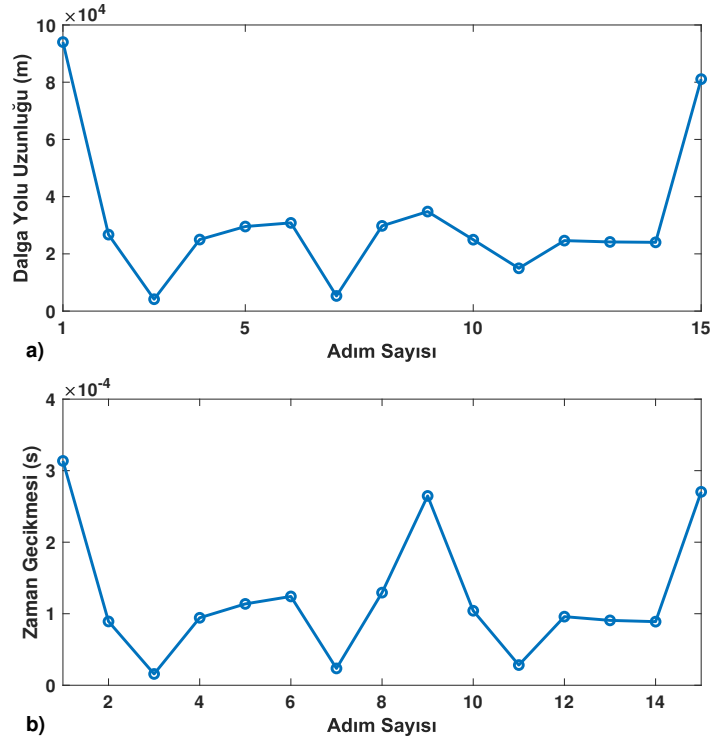
lanmıştır. Kırılma yüksekliği ise 181 km'dir. İyonogramlarda gönderilen yükseklik değerleri sanal yükseklikler olup dalganın ışık hızında gittiği kabulüne göre hesaplanmaktadır. Şekilde verilen kırılma yüksekliği gerçek yüksekliktir.

Çizelge 5.3'de taranan açı aralıklarında ve frekanslarda alıcıya ulaşan dalga yollarının yol uzunluklarının ve zaman gecikmelerinin ortanca değerleri sunulmuştur. Yanca ve yükseliş açı aralıklarında alıcıya ulaşan dalgaların toplam yol uzunlukları ve uğrayacakları zaman gecikmesinin değerleri gönderim açı aralıkları ve frekanslarında başarı ile hesaplanmıştır.

Çizelge 5.3: Yanca ve yükselişte taranan açı ve frekans aralıklarından alıcıya ulaşan dalgalar için elde edilen dalga yolu uzunluğu ve zaman gecikmelerinin ortanca değerleri.

	0715 GS	1100 GS	1200 GS
Dalga yolu uzunluğu (ortanca)	484 km	473 km	468 km
Zaman gecikmesi (ortanca)	1.83 ms	1.82 ms	1.82 ms

İyonosonda ölçümlerinde özellikle eğik iyonogramlar iyonosondanın uyarlaması, antenlerin dizilimi ve konumları başta olmak üzere çok farklı parametrelere bağlıdır. Literatürde yer



Şekil 5.21: 13 Aralık 2018, 1100 GS, 4.7 MHz sıradan dalga yolu, a) dalga yolu uzunluğu, b) zaman gecikmesi.

alan birçok çalışmada eğik iyonogramlarda gözlenen değerlerin test düzenekleri ve operasyon tarafından oldukça etkilendiği, bu ölçümlerin hem verici hem de alıcı tarafında kalibrasyon, uyarılma gibi eksikliklerinin bulunabileceği belirtilmiştir. Bu çalışmada verici ve alıcı koordinatlarının bilindiği gerçek eğik iyonogramlara IONOLAB-CK yöntemi ile elde edilen foF2 verilerinin arka plan modelinin güncellendiği incelemelerin en iyi sonuçları verdiği gözlenmiştir. IONOLAB-RAY algoritmasının arka plan modeli başarı ile güncellenerek eğik iyonogramlara benzer frekans aralıkları elde edilmiştir.

Yakın gerçek zamanda yüksek çözünürlüklü foF2 haritaları IRI-Plas modeline girdi olarak sağlanmıştır. Girdileri güncellenmiş model IONOLAB-RAY yönteminde arka plan olarak kullanılmış ve iyonkürede ışın izleme yapılmıştır. 13 Aralık 2018 günü için deneysel olarak elde edilmiş eğik iyonogramlardan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Buna göre eğik iyonogramlarda gözlenen frekans aralıklarının sıradan ve sıradışı dalgalar için kaynaktan alıcıya ulaştığı ölçüm sonuçları ile doğrulanmıştır.



## 6. SONUÇ

İyonküre, KD ve uydu haberleşmesi başta olmak üzere radyo seyrüsefer ve uzaktan algılama sinyalleri üzerinde etkili çok önemli bir havaküre katmanıdır. Yön bağımlı, dağıtılmalı, uzay zamanda gecikmeli son derece karmaşık yapısı inceleme ve araştırmayı önemli hale getirmektedir. Bu tez çalışmasında iyonkürenin temel yönsemeleri stokastik olarak modellenmiş ve iyonküre modeli olarak IRI-Plas ölçümlerinden uzay-zamanda rassal olarak iyonkürenin anlık durumunu yansıtacak şekilde elde edilen kestirimler ile güncellenmiştir.

İyonkürenin yapısının ve dinamiğinin anlaşılması amacıyla yapılan çalışmalar hem ölçüm sistemleri hem de temel yönsemelerin anlaşılabilirdiği ampirik deterministik modeller aylık saatlik ortanca değerler üzerinden uzun gözlemler sonucunda çıkarılmış sonuçlara dayanmaktadır. İyonküre modellerinin en kabul görmüş olanları IRI modelidir. Bu çalışmada IRI modelinin plazmaküreye genişletilmiş versiyonu olan IRI-Plas modeli kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasının ilk aşamasında iyonkürenin uzay-zamanda istatistiksel bir modelinin oluşturulabilmesi için yönseme istatistikleri noktasal ölçüm istasyonu konumlarında edilmiştir. Geliştirilen IONOLAB-PDF yöntemi ile, seçilen bir istasyon, saat ve tarih aralığında bir iyonküre ölçüm veri setinin istatistiksel yöndeme modelleri OYF kestirimleri ile otomatik olarak gerçekleştirilebilmektedir. OYF kestirimi sonucunda yönsemenin alacağı değerler olasılıkları ile birlikte hesaplanabilmektedir. Elde edilen kestirimlerin IRI-Plas'a girdi olarak sağlandığı durumda iyonkürenin yerel ampirik deterministik kestirimlerine stokastik özellikleri eklenerek iyonküre yönseme davranışlarını uzay-zamanda daha başarılı takip edebilmektedir.

İyonosonda ölçümleri foF2, hmF2 ile GPS alıcılarından kestirilen TEİ değerleri geliştirilen IONOLAB-PDF yöntemi ile uzayda ve zamanda yıllık, mevsimlik, aylık, saatlik olarak OYF kestirimleri üzerinden incelenmiştir. İyonküre parametrelerinin hem kendi içinde uzay-zamanda davranışları hem de birbirleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bunların yanında iyonosonda foF2 ve GPS alıcısından elde edilmiş TEİ kullanılarak katman kalınlığı parametresi de hesaplanmıştır. İyonküre ölçümlerinin stokastik yönsemeleri IRI-Plas modelini güncellemek için kullanılmıştır.

Noktasal olarak foF2'nun parametrik ortalama ve standart sapma kestirimleri IRI-Plas modeline girdi olarak sağlandığı durumda anlık foF2 girildiği duruma yaklaşan elektron yoğun-

luğu profilleri elde edilmiştir. IRI-Plas modeline yönseme istatistiklerinin kestirimleri girildiği durumda rassal gerçeklemelerin %70'i  $1\sigma$  ve %95'i  $2\sigma$  içinde kalmıştır. IONOLAB-PDF yöntemi ile noktasal olarak elde edilen iyonküre modelleri IRI-Plas modeline girilerek ampirik deterministik model, ampirik stokastik hale gelmektedir. Bununla birlikte elektron yoğunluğu kestiriminin belirli bir bant aralığında kalma olasılığu da sunulmaktadır.

Yakın gerçek zamanda IRI-Plas modelinin girdilerinin güncellenmesi için iyonküre ölçümleri bir bölge içinde doğrudan aradeğerlenerek incelenmiştir. Bu çalışmada orta enlemde IRI-Plas modelinin stokastik olarak yakın gerçek zamanda güncellenmesi için literatürde ilk defa yüksek çözünürlüklü foF2 haritaları, geliştirilen IONOLAB-CK yöntemi ile elde edilmiştir. Uzayda yüksek çözünürlüklü foF2 elde etmek için foF2 ile ilintili yardımcı bir değişken olan TEİ kullanılarak IONOLAB-CK yöntemi ile aradeğerleme yapılmıştır.

Aradeğerleme başarımının incelenmesi için iyonküre yönsemelerine benzeyen yüksek çözünürlüklü sentetik yüzeyler oluşturulmuştur. Sentetik yüzeyler gerçek iyonosonda ve GPS alıcısı konumlarından yararlanılarak farklı örnekleme düzenlerinde örneklenmiş, örnekleme düzeni ve örnek sayısının aradeğerleme başarımına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla ikinci modalite az orta ve sık olmak üzere farklı örnek sayılarında aradeğerleme başarımı hata metrikleri kullanılarak incelenmiştir.

Sadece birinci modalite ve altı örnek noktası bulunan kullanılarak Ortalamasız Krigleme yapılmıştır. Elde edilen kestirim yüzeyleri, örnek alınan orijinal yüzeyler ile karşılaştırılmıştır. Yüzeyin değişkenliğinin sabit yüzeyden sinüs biçimli yüzeye doğru arttığı yüzeylerde bütün hata metrikleri artmıştır. Hata metriklerinde gözlenen artış sinüs biçimli yüzeyde de diğer yüzeylere göre benzer seviyede arttığı için sınırlı kalmıştır. Buna ek olarak Ortalamasız Krigleme ile elde edilebilen çözünürlük enlem ve boylamda  $2.62^\circ$  olarak bulunmuştur.

İkinci modalite farklı örnekleme düzenleri kullanılarak Ortalamasız Krigleme yapıldıktan sonra hata metrikleri incelenmiştir. Buna göre örnek sayısı arttıkça hata metriklerinde azalma meydana gelirken sık örnek sayısının kullanılması hata metriklerinde az örnek sayısına oranla daha sınırlı kalmıştır. Hesaplama karmaşıklığı ve işlem zamanları da dikkate alındığında orta örnek sayısının ikinci modalitenin örneklenmesinde yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. IONOLAB-CK yöntemi ile bölge içinde 80 adet örnek noktasından iyonkürenin uzayda değişkenliğinin yeterince takip edilebilmesi için ortalama %75'ine karşılık gelen 60 örnek

noktası kullanılarak enlem ve boylamda  $0.5^\circ$  çözünürlüğün yeterli olduğu değerlendirilmiştir. İkinci modalite örnek sayısı belirlendikten sonra birinci modalite seyrek ikinci modalite orta örnek sayısı kullanılarak IONOLAB-CK yöntemi başarımlı benzer ve farklı senaryolar üzerinden incelenmiştir. Benzer senaryolarda her iki modalitenin benzer yönsemelere sahip olduğu senaryolar analiz edilmiştir. İyonosondalar uzayda ve zamanda yeterli sıklıkta örnek alamamaktadır. Bu nedenle uzayda sık örneklenmiş ikinci modalite yönseme karakteristiğinin daha iyi yansıtılmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca birinci ve ikinci modalite benzer yönsemeye olduğundan ikinci modalitenin kestirime çözünürlük artışı şeklinde fayda sağlamıştır. İkinci modalitenin kullanılması kestirim değişimsini azaltmaktadır. Farklı senaryolar kapsamında birinci ve ikinci modaliteler aynı yönsemeye sahip olup ikinci modaliteye küçük ölçekli farklı yönsemeler eklenmiştir. IONOLAB-CK yönteminin kullanılmasının faydası birinci ve ikinci modalite farklı davrandığı ve birinci modalite örnek noktaları uzayı yeterince iyi örnekleyemediği durumda ortaya çıkmaktadır. Buna ek olarak incelenen hata metriklerinin seviyeleri farklı senaryolarda da yüksek oranda değişmemiştir. Örnek olarak benzer senaryolardan  $S_4$  için RMS değeri  $1.66 \times 10^{-1}$  olarak bulunmuştur. Düzlemsel yönsemeye farklı küçük ölçekli değişim eklendiği  $D_6$  ve  $D_7$  senaryosu için RMS değerleri sırasıyla  $5.44 \times 10^{-1}$  ve  $5.26 \times 10^{-1}$  olarak bulunmuştur. Hata metriğinin mertebesi sabit kalmıştır.

Sentetik yüzeyler kullanılarak IONOLAB-CK yönteminin başarımlı incelendikten sonra katman kalınlığı hesaplanması için iyonkürenin farklı davranışlarını gösteren günler seçilmiştir. 2009, 2012 ve 2014 yıllarından iyonkürenin sakin, normal ve bozulmalı günlerine örnek olarak gün ve saatler belirlenmiştir. Birinci modalite olarak foF2 seyrek örnek noktalarında ikinci modalite olarak TEİ orta örnek noktalarına yakın örnek sayılarında IONOLAB-CK yöntemine uygulanmıştır. Gösterilen gerçek gün ve saat örnekleri olan iyonküre parametreleri benzer senaryolarda incelenen düzlemsel yüzeylere yaklaşmıştır. Benzer senaryolarda IONOLAB-CK ve Ortalamasız Krigleme ile incelenen tüm senaryolarda hata seviyeleri Ortalamasız Krigleme ile yakın değerlerde gözlemlendiğinden gerçek gün ve saat örneklerinde de hata da ortalama 10 kat azalma ve çözünürlükte de yaklaşık 5 kat artış olmuştur. IONOLAB-CK yöntemi uygulanarak foF2 yüzeyi ikinci modalite TEİ kullanılması sonucunda yüksek çözünürlüklü ve hassas bir şekilde kestirilmiştir. Katman kalınlığı iyonlaşmanın en yüksek olduğu katmanın kalınlığı olduğu göz önüne alındığında özellikle uydu ve uzaktan algılama sinyallerinin yayılımı kapsamında çok önemlidir.

IONOLAB-CK yöntemi ile elde edilen foF2 kestirim haritaları ile IRI-Plas modelinin girdileri güncellenmiştir. Dalga yolu ışın izleme kapsamında IONOLAB-RAY algoritması ile noktadan noktaya KD haberleşmesinde en uygun haberleşme parametreler incelenmiştir.

Çekya Bilimler Akademisi'nden verici ve alıcı noktaları bilinen eğik ionogramlar alınarak elde edilen ışın izleme yayılım yolu sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu raporda üç farklı saat için IRI-Plas modelinin girdi olmadan, TEİ ve foF2 kestirimleri kullanılarak güncellenmesi ile elde edilen dalga yayılım yolları frekans aralıkları sıradan ve sıradışı dalgalarda eğik ionogram ölçümleri ile tutarlı olarak elde edilmiştir. IRI-Plas modelinin girdileri IONOLAB-CK ile elde edilen foF2 kestirim haritaları ile güncellendiği durumda sıradan dalgaların %65.5'i alıcıya ulaşmıştır. Öte yandan IRI-Plas'a girdi verilmediği durumda aynı saat ve tarama aralıklarında sıradan dalgaların %35.0'i alıcıya ulaşmıştır. Gerçek ionogram ile IONOLAB-RAY uygulaması karşılaştırıldığında verici noktasından alıcı noktasına düşen dalgalar başarı ile tespit edilmiştir.

Bu tez çalışmasında ampirik deterministik aylık ve saatlik ortanca değerler üreten IRI-Plas modeli yakın gerçek zamanda girdileri güncellenerek ampirik rassal hale getirilmiştir. Girdilerinin güncellenmesi öncelikle noktasal olarak yönseme değerleri üzerinden sağlanmıştır. Anlık değerler kullanılarak doğrudan anlık IRI-Plas güncellenmesi yapılmıştır. Belirli bir bölge içinde literatürde ilk defa yüksek çözünürlüklü foF2 ve katman kalınlığı haritaları elde edilmiştir.

Bu tez çalışması ile IRI-Plas modeli girdileri üzerinden stokastik olarak güncellenmiş ve IONOLAB-RAY arka plan modeli olarak kullanılmıştır. İyonkürede KD haberleşmesi için gönderim açısı ve gönderim frekanslarını iyonkürenin anlık durumuna göre kestirilebilir hale getirilmiştir.

- İyonküre parametrelerinin istatistikleri elde edilmiştir. Bu istatistikler kullanılarak iyonkürenin uzun dönemli istatistiksel davranışı, parametreler arasındaki ilinti ortaya konulmuştur.
- Literatürde ilk defa katman kalınlığı istatistikleri ve yakın gerçek zamanda elde edilen katman kalınlığı haritaları elde edilmiştir.
- IONOLAB-CK yöntemi geliştirilerek iyonküre ölçümlerinin uzay-zamanda yüksek

özünürlüklü haritalarının kestirilmesi sağlanmıştır.

- IRI-Plas modeli hem yönseme hem de anlık olarak güncellenmiş ve yüksek çözünürlüklü aradeğerleme haritaları elde edilmiştir.
- Orta enlemde belirli bir kaynak noktasından hedef noktasında gönderilmek istenen KD sinyallerin belirli bir güvenilirlik bandı altında yakın gerçek zamanda noktadan noktaya, en uygun haberleşme frekansının seçimi, gönderme açısı bilgileri üretilmiştir.

IONOLAB-PDF yöntemi ile elde edilen OYF parametreleri kullanılarak iyonküre modeline istatistiksel kestirim işlevleri kazandırılması için küresel olarak yönseme istatistikleri incelenebilir. Bu tez kapsamında elde edilen yönseme davranışlarından farklılaşan zamanlar için makine öğrenmesi ve yapay sinir ağları kullanılarak iyonkürede meydana gelen aykırılıklar incelenebilir. Aradeğerlemenin zamanda takip edilecek hale getirilmesi ile bir bölge içinde gelecek iyonküre ölçümlerini tahmini gerçekleştirilebilir. Parametrelerin zamanda takip ve tahmin edilebilmesi için kestirim haritaları zamanda da aradeğerleme yapılabilir. KD bandında yön bulma ve Ufuk Ötesi Radarlarda kestirimlerin iyileştirilmesi için güncellenmiş iyonküre modelleri kullanılabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] T. Tascione, *Introduction to the Space Environment*. Krieger Publishing Company, **1988**.
- [2] GIRO, “Global Ionosphere Radio Observatory,” **2021**, <http://giro.uml.edu/>, Erişim tarihi: 30.05.2021.
- [3] J. Davies, *Ionospheric Radio*. Peter Pregrinus, **1990**.
- [4] R. Hunsucker, *Radio Techniques For Probing The Terrestrial Ionosphere*. Springer Science & Business Media, **2013**, vol. 22.
- [5] A. Komjathy, “Global Ionospheric Total Electron Content Mapping using the Global Positioning System,” Ph.D. dissertation, University of New Brunswick Fredericton, **1997**.
- [6] N. Blaunstein ve C. Christodoulou, *Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Links: Terrestrial, Atmospheric and Ionospheric*. John Wiley & Sons, **2007**, vol. 193.
- [7] N. Maslin, *HF Communications: A Systems Approach*. CRC Press, **2017**.
- [8] K. Folkestad, *Ionospheric Radio Communications*. Springer, **2013**.
- [9] ITU Recommendation, “1487. testing of HF modems with bandwidths of up to about 12 khz using ionospheric channel simulators,” *Question ITU*, vol. 213, p. 9, **2000**.
- [10] ITU Recommendation, “520-1 use of High Frequency ionospheric channel simulators,” *Recommendations and Reports of the CCIR*, vol. 3, pp. 57–58, **2000**.
- [11] ITU Recommendation, “Report 549-3 HF ionospheric channel simulators,” *Recommendations and Reports of the CCIR*, vol. 3, pp. 59–67, **1990**.
- [12] C. Watterson, J. Juroshek ve W. Bensema, “Experimental confirmation of an HF channel model,” *IEEE Transactions on Communication Technology*, vol. 18, no. 6, pp. 792–803, **1970**.
- [13] L. Vogler ve J. Hoffmeyer, “A model for wideband HF propagation channels,” *Radio Science*, vol. 28, no. 06, pp. 1131–1142, **1993**.
- [14] A. Spaulding ve F. Stewart, “The ionospheric communication analysis and prediction program (IONCAP); reliability and service probability calculations,” *Radio Science*, vol. 30, no. 3, pp. 703–712, **1995**.
- [15] G. Lane, “Review of the high frequency ionospheric communications enhanced profile analysis & circuit (ICEPAC) prediction program,” in *Ionospheric Effects Symposium*. Alexandria VA USA IEEE, **2005**, p. 2B1.
- [16] D. Bilitza, “28. Ionospheric models for radio propagation studies,” *Review of Radio Science*, vol. 2002, pp. 625–679, **1999**.

- [17] D. Bilitza, K. Rawer, L. Bossy ve I. Kutiev, “International reference ionosphere 1990,” *NASA Technical Report*, vol. Science Applications Research, no. ABD, pp. 1–150, **1990**.
- [18] D. Bilitza, “International Reference Ionosphere 2000,” *Radio Science*, vol. 36, no. 2, pp. 261–275, **2001**.
- [19] D. Bilitza, “International Reference Ionosphere 2000: examples of improvements and new features,” *Advances in Space Research*, vol. 31, no. 3, pp. 757–767, **2003**.
- [20] D. Bilitza ve B. Reinisch, “International Reference Ionosphere 2007: improvements and new parameters,” *Advances in Space Research*, vol. 42, no. 4, pp. 599–609, **2008**.
- [21] D. Bilitza, L. McKinnell, B. Reinisch ve T. Fuller-Rowell, “The International Reference Ionosphere Today and in the Future,” *Journal of Geodesy*, vol. 85, no. 12, pp. 909–920, **2011**.
- [22] D. Bilitza, D. Altadill, Y. Zhang, V. Truhlik ve B. Reinisch, “The International Reference Ionosphere 2012-a model of international collaboration,” *Journal of Space Weather and Space Climate*, vol. 4, p. A07, **2014**.
- [23] T. Gulyaeva, X. Huang ve B. Reinisch, “Plasmaspheric extension of topside electron density profiles,” *Advances in Space Research*, vol. 29, no. 6, pp. 825–831, **2002**.
- [24] T. Gulyaeva, F. Arikan, M. Hernandez-Pajares ve I. Stanislawska, “GIM-TEC Adaptive ionospheric weather assessment and forecast system,” *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 102, pp. 329–340, **2013**.
- [25] T. Gulyaeva ve D. Bilitza, “Towards ISO standard Earth Ionosphere and Plasmasphere model,” *New Developments in the Standard Model*, pp. 1–39, **2012**.
- [26] E. Erdem, “İyonkürede Elektromanyetik Dalga Yayılım Modeli ve Benzetimi,” Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, **2017**.
- [27] I. Sayın, “Kriging ve Rassal Alan Öncülü ile Toplam Elektron İçeriği Haritalaması,” Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, **2008**.
- [28] I. Sayın, F. Arikan ve O. Arikan, “Regional TEC mapping with random field priors and Kriging,” *Radio Science*, vol. 43, no. 5, 2008.
- [29] E. Vanmarcke, *Random Fields: Analysis and Synthesis*. World Scientific, **2010**.
- [30] P. Kyriakidis ve A. Journel, “Geostatistical space–time models: a review,” *Mathematical Geology*, vol. 31, no. 6, pp. 651–684, **1999**.
- [31] A. Papoulis ve S. Pillai, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. Tata McGraw-Hill Education, **2002**.
- [32] K. Budden, *The Ionosphere And Magnetosphere In The Propagation Of Radio Waves*. Cambridge University Press, **1988**.

- [33] J. Ratcliff, *An Introduction To The Ionosphere And Magnetosphere*. Cambridge University Press, **1972**.
- [34] M. Kelley, *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*. Academic Press, **2009**, vol. 96.
- [35] J. Sklar, *Modern HF Signal Detection and Direction Finding*. MIT Press, **2018**.
- [36] N. Blaunstein ve E. Plohotniuc, *Ionosphere and Applied Aspects of Radio Communication and Radar*. CRC Press, **2008**.
- [37] K. Rawer, *Wave Propagation in the Ionosphere*. Springer Science & Business Media, **2013**, vol. 5.
- [38] R. Schunk ve A. Nagy, *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. Cambridge University Press, **2009**.
- [39] A. Ishimaru, *Electromagnetic Wave Propagation, Radiation, and Scattering*. Prentice Hall, **1991**.
- [40] J. Kong, *Electromagnetic Wave Theory*, A Wiley-Interscience Publication. Wiley, **1986**.
- [41] H. Lassen, "Ionisation der Atmosphere und ihr einfluß auf die ausbreitung der kurzen elektrischen wellen der drahtlosen telegraphie," *Zeitschrift für Hochfrequenztechnik*, vol. 28, pp. 109–113, **1926**.
- [42] D. Hartree, "The Propagation of Electromagnetic Waves in a Refracting Medium in a Magnetic Field," *Proc. Comb. Phil. Soc.*, vol. 27, no. 1, pp. 143–162, Jan **1931**.
- [43] E. Appleton ve J. Ratcliffe, "Some Simultaneous Observations on Down Coming Wireless Waves," *Proc. R. Soc. Lond. A*, vol. 128, no. 807, pp. 133–158, Jul **1930**.
- [44] E. Appleton, "Wireless studies of the ionosphere," *J. Instn. Elect. Engrs.*, vol. 71, no. 21, pp. 642–650, Sep **1932**.
- [45] D. Bilitza, "International Reference Ionosphere: recent developments," *Radio Science*, vol. 21, no. 3, pp. 343–346, **1986**.
- [46] D. Bilitza, S. Brown, M. Wang, J. Souza ve P. Roddy, "Measurements and IRI model predictions during the recent solar minimum," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 86, pp. 99–106, **2012**.
- [47] IRI, "International Reference Ionosphere," **2021**, <http://www.irimodel.org/>, Erişim tarihi: 30.05.2021.
- [48] S. Stankov ve R. Warnant, "Ionospheric slab thickness– analysis, modelling and monitoring," *Advances in Space Research*, vol. 44, no. 11, pp. 1295–1303, **2009**.
- [49] T. Gulyaeva, F. Arıkan ve I. Stanislawska, "Inter-hemispheric imaging of the ionosphere with the upgraded IRI-Plas model during the space weather storms," *Earth, Planets and Space*, vol. 63, no. 8, p. 929, **2011**.



- [50] T. Gulyaeva, X. Huang ve B. Reinisch, “Plasmaspheric extension of topside electron density profiles,” *Adv. Space Res.*, vol. 29, no. 6, pp. 825–831, Mar **2002**.
- [51] T. Gulyaeva, “Storm time behavior of topside scale height inferred from the ionosphere–Plasmasphere model driven by the F2 layer peak and GPS-TEC observations,” *Advances in Space Research*, vol. 47, no. 6, pp. 913–920, **2011**.
- [52] O. Maltseva, G. Zhabankov ve N. Mozhaeva, “Advantages of the new model of IRI (IRI-Plas) to simulate the ionospheric electron density: case of the European area,” *Advances in Radio Science*, vol. 11, no. GHJ. 2, pp. 307–311, **2013**.
- [53] IONOLAB, “Ionospheric Reserarch Laboratory,” **2021**, <http://www.ionolab.org>, Erişim Tarihi: 30.05.2021.
- [54] H. Nayir, F. Arikan, O. Arikan ve C. Erol, “Total Electron Content estimation with Reg-Est,” *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 112, no. A11, **2007**.
- [55] F. Arikan ve C. Erol, “Statistical characterization of time variability in midlatitude single-tone HF channel response,” *Radio Science*, vol. 33, no. 5, pp. 1429–1443, **1998**.
- [56] F. Arikan, C. Erol ve O. Arikan, “Regularized estimation of vertical Total Electron Content from Global Positioning System data,” *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 108, no. A12, **2003**.
- [57] F. Arikan, C. Erol ve O. Arikan, “Regularized estimation of vertical Total Electron Content from GPS data for a desired time period,” *Radio Science*, vol. 39, no. 6, **2004**.
- [58] H. Nayir, “Yerküresel Konumlama Sistemi Kullanılarak Toplam Elektron İçeriği Kestirimi,” Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, **2007**.
- [59] F. Arikan, H. Nayir, U. Sezen ve O. Arikan, “Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC,” *Radio Science*, vol. 43, no. 4, **2008**.
- [60] F. Arikan, U. Sezen, T. Gulyaeva ve O. Cilibas, “Online, Automatic, Ionospheric Maps: IRI-PLAS-MAP,” *Advances in Space Research*, vol. 55, no. 8, pp. 2106–2113, **2015**.
- [61] O. Koroglu, F. Arikan, N. Türel, M. Aysezen, O. Lenk ve B. Aktuğ, “Estimation of probability density function for TUSAGA TEC,” in *2010 IEEE 18th Signal Processing and Communications Applications Conference*. IEEE, **2010**, pp. 860–862.
- [62] O. Koroglu ve F. Arikan, “Regional ionospheric trend statistics: IONOLAB-PDF,” *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, vol. 25, no. 3, pp. 1773–1783, **2017**.
- [63] M. Deviren, F. Arikan ve O. Arikan, “Investigation of ionospheric trend over Turkey using sliding window statistical analysis method,” in *2013 21st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*. IEEE, **2013**, pp. 1–4.

- [64] C. Erol ve F. Arikan, “Statistical characterization of the ionosphere using GPS signals,” *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 19, no. 3, pp. 373–387, **2005**.
- [65] O. Koroglu, “TUSAGA ve TUSAGA-Aktif Verileri ile Toplam Elektron İçeriğinin İstatistiksel Analizi,” Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, **2012**.
- [66] T. Verhulst, D. Altadill, J. Mielich, B. Reinisch, I. Galkin, vd., “Vertical and oblique HF sounding with a network of synchronised ionosondes,” *Advances in Space Research*, vol. 60, no. 8, pp. 1644–1656, **2017**.
- [67] J. Laštovička, A. Mikhailov, T. Ulich, J. Bremer, A. Elias ve v. de Adler, N., “Long-term trends in foF2: a comparison of various methods,” *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 68, no. 17, pp. 1854–1870, **2006**.
- [68] J. Bremer, T. Damboldt, J. Mielich ve P. Suessmann, “Comparing long-term trends in the ionospheric F2-region with two different methods,” *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 77, pp. 174–185, **2012**.
- [69] L. Liu, W. Wan ve B. Ning, “Statistical modeling of ionospheric foF2 over Wuhan,” *Radio Science*, vol. 39, no. 2, **2004**.
- [70] P. Goovaerts, “Ordinary Cokriging revisited,” *Mathematical Geology*, vol. 30, no. 1, pp. 21–42, **1998**.
- [71] D. Fotiadis ve S. Kouris, “A functional dependence of foF2 variability on latitude,” *Advances in Space Research*, vol. 37, no. 5, pp. 1023–1028, **2006**.
- [72] M. Deminov, G. Deminova, G. Zhrebtsov, O. Pirog ve N. Polekh, “Variability of parameters of the F2-layer maximum in the quiet midlatitude ionosphere under low solar activity: 1. statistical properties,” *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 51, no. 3, pp. 348–355, **2011**.
- [73] L. Perrone ve A. Mikhailov, “Geomagnetic control of the midlatitude fof1 and fof2 long-term variations: Recent observations in europe,” *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 121, no. 7, pp. 7183–7192, **2016**.
- [74] T. Matamba, J. Bosco ve L. McKinnell, “Statistical analysis of the ionospheric response during geomagnetic storm conditions over South Africa using ionosonde and GPS data,” *Space Weather*, vol. 13, no. 9, pp. 536–547, **2015**.
- [75] A. Danilov, “Time and spatial variations of the foF2 (night)/foF2 (day) values,” *Advances in Space Research*, vol. 43, no. 11, pp. 1786–1793, **2009**.
- [76] A. Seid, R. Tesfahun ve N. Lassi, “Hierarchical bayesian modeling of ionospheric TEC disturbances as non-stationary processes,” *Advances in Space Research*, vol. 61, no. 5, pp. 1193–1205, **2018**.
- [77] A. Radievskii, F. Bessarab ve I. Karpov, “Model statistical properties of the foF2 critical frequency,” *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 55, no. 5, pp. 623–625, **2015**.

- [78] J. Adeniyi, O. Oladipo ve S. Radicella, “Variability of foF2 for an equatorial station and comparison with the foF2 maps in IRI model,” *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 69, no. 6, pp. 721 – 733, **2007**.
- [79] J. Titheridge, “The slab thickness of the mid-latitude ionosphere,” *Planetary and Space Science*, vol. 21, no. 10, pp. 1775–1793, **1973**.
- [80] A. Belehaki, N. Jakowski ve B. Reinisch, “Comparison of ionospheric ionization measurements over Athens using ground ionosonde and GPS-derived TEC values,” *Radio Science*, vol. 38, no. 6, pp. 13–1, **2003**.
- [81] S. Kouris, T. Xenos, K. Polimeris ve D. Stergiou, “TEC and foF2 variations: Preliminary results,” *Annals of Geophysics*, **2004**.
- [82] B. Jayachandran, T. Krishnankutty ve T. Gulyaeva, “Climatology of ionospheric slab thickness,” in *Annales Geophysicae*, vol. 22. Copernicus GmbH, **2004**, pp. 25–33.
- [83] T. Gulyaeva ve I. Stanislawski, “Night-day imprints of ionospheric slab thickness during geomagnetic storm,” *Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics*, vol. 67, no. 14, pp. 1307–1314, **2005**.
- [84] S. Jin, J. Cho ve J. Park, “Ionospheric slab thickness and its seasonal variations observed by GPS,” *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 69, no. 15, pp. 1864–1870, **2007**.
- [85] Y. Chuo, “Variations of scale height at F-region peak based on ionosonde measurements during solar maximum over the crest of Equatorial Ionization Anomaly Region,” *The Scientific World Journal*, vol. 2014, **2014**.
- [86] P. Guo, X. Xu ve G. Zhang, “Analysis of the ionospheric equivalent slab thickness based on ground-based GPS/TEC and GPS/COSMIC RO measurements,” *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 73, no. 7-8, pp. 839–846, **2011**.
- [87] M. Mosert, S. Magdaleno, D. Buresova, D. Altadill, M. Gende, E. Gularte ve L. Scida, “Behavior of the equivalent slab thickness over three european stations,” *Advances in Space Research*, vol. 51, no. 4, pp. 677–682, **2013**.
- [88] G. Mansilla, , M. Mosert ve R. Ezquer, “Seasonal variation of the Total Electron Content, maximum electron density and equivalent slab thickness at a South-American station,” *Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics*, vol. 67, no. 17-18, pp. 1687–1690, **2005**.
- [89] T. Gulyaeva, B. Jayachandran ve T. Krishnankutty, “Latitudinal variation of ionospheric slab thickness,” *Advances in Space Research*, vol. 33, no. 6, pp. 862–865, **2004**.
- [90] S. Kouris, K. Polimeris, L. Cander ve L. Ciruolo, “Solar and latitude dependence of TEC and slab thickness,” *Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics*, vol. 70, no. 10, pp. 1351–1365, **2008**.

- [91] N. Turel, “İyonosfer Katmanının Toplam Elektron İçeriğinin İzgel Güç Yoğunluğu ve Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu Kestirimi,” Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, **2008**.
- [92] N. Turel ve F. Arikan, “Probability density function estimation for characterizing hourly variability of ionospheric total electron content,” *Radio Science*, vol. 45, no. 6, **2010**.
- [93] F. Arikan, “Statistics of simulated ocean clutter,” *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 12, no. 4, pp. 499–526, **1998**.
- [94] E. Jakeman ve P. Pusey, “A model for non-rayleigh sea echo,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 24, no. 6, pp. 806–814, **1976**.
- [95] S. Karatay, F. Arikan ve O. Arikan, “Investigation of Total Electron Content variability due to seismic and geomagnetic disturbances in the ionosphere,” *Radio Science*, vol. 45, no. 05, pp. 1–12, **2010**.
- [96] T. Cover, *Elements of Information Theory*. John Wiley & Sons, **1999**.
- [97] M. Siddiqui, “Statistical inference for Rayleigh Distributions,” *Journal of Research of the National Bureau of Standards, Sec. D*, vol. 68, no. 9, p. 1007, **1964**.
- [98] R. Raghavan, “A method for estimating parameters of K-distributed clutter,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 27, no. 2, pp. 238–246, **1991**.
- [99] G. Gordiyenko, O. Maltseva, F. Arikan ve A. Yakovets, “An evaluation of the IRI-Plas-TEC for winter anomaly along the mid-latitude sector based on GIM-TEC and foF2 values,” *Advances in Space Research*, vol. 64, no. 10, pp. 2046–2063, **2019**.
- [100] C. Lin, C. Liu, W. Wang, vd., “Midlatitude summer nighttime anomaly of the ionospheric electron density observed by FORMOSAT-3/COSMIC,” *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 115, no. A3, **2010**.
- [101] F. Arikan ve O. Koroglu, “A methodology for estimation of hourly-monthly stochastic trend characteristics of midlatitude ionosphere,” *Radio Science*, vol. 55, no. 11, **2020**.
- [102] O. Koroglu, F. Arikan ve M. Deviren, “Regional and seasonal parametric probability density function estimation for Total Electron Content,” in *2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*. IEEE, **2014**, pp. 915–918.
- [103] O. Koroglu, F. Arikan ve M. Koroglu, “Regional and seasonal aspects of within-the-hour TEC statistics,” in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, ser. EGU General Assembly Conference Abstracts, vol. 17, Apr. **2015**, p. 7562.
- [104] N. Cressie, *Statistics for spatial data*. John Wiley & Sons, **2015**.
- [105] M. Deviren, “Türkiye Üzerinde Toplam Elektron İçeriği (TEİ) için Uzay-Zaman Rassal Alan Kestirimi,” Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, **2013**.

- [106] L. Cheng, Y. Qin, vd., “Extended analysis of real-time foF2 mapping in mideastern China based on shortwave signals,” *Radio Science*, vol. 52, no. 11, pp. 1314–1324, **2017**.
- [107] D. Minkwitz, M. Hernández Pajares, vd., “Ionospheric tomography by gradient-enhanced Kriging with STEC measurements and ionosonde characteristics,” in *Annales Geophysicae*, vol. 34, **2016**, pp. 999–1010.
- [108] I. Stanislawska, G. Juchnikowski ve L. Cander, “The Kriging method of ionospheric parameter foF2 instantaneous mapping,” *Annals of Geophysics*, vol. 39, no. 4, **1996**.
- [109] I. Stanislawska, T. Gulyaeva, O. Grynshyna-Poliuga ve L. Pustovalova, “Instantaneous global maps of ionospheric critical frequency GIM-foF2 for evaluation of the ionospheric weather,” in *2017 XXXIIInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS)*. IEEE, **2017**, pp. 1–4.
- [110] J. Blanch, “An ionosphere estimation algorithm for WAAS based on Kriging,” in *Proceedings of ION GPS*, **2002**, pp. 24–27.
- [111] C. Sunu ve C. Toker, “Regional total electron content map generation based on compressive sensing,” **2021**, manuscript submitted for publication.
- [112] N. Cressie ve C. Wikle, “The variance-based cross-variogram: You can add apples and oranges,” *Mathematical Geology*, vol. 30, no. 7, pp. 789–799, **1998**.
- [113] R. Olea, *Geostatistics for Engineers and Earth Scientists*. Springer Science & Business Media, **2012**.
- [114] M. Deviren ve F. Arıkan, “IONOLAB-MAP: An automatic spatial interpolation algorithm for Total Electron Content,” *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, vol. 26, no. 4, pp. 1933–1945, **2018**.
- [115] S. Khaf, “Interpolation of Ionospheric Modalities using Kriging, Co-kriging and Spatio-temporal Kriging,” Yüksek Lisans Tezi, Bilkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, **2018**.
- [116] R. Benedetti, F. Piersimoni, P. Postiglione, vd., *Sampling Spatial Units for Agricultural Surveys*. Springer, **2015**.
- [117] J. Wang, A. Stein, B. Gao ve Y. Ge, “A review of spatial sampling,” *Spatial Statistics*, vol. 2, pp. 1–14, **2012**.
- [118] M. Fischer ve P. Nijkamp, *Handbook of Regional Science*. Springer Heidelberg, **2014**, vol. 3.
- [119] H. Wackernagel, *Multivariate Geostatistics: an Introduction with Applications*. Springer Science & Business Media, **2013**.
- [120] A. Journel ve C. Huijbregts, *Mining Geostatistics*. Academic Press London, **1978**, vol. 600.

- [121] D. Myers, “Matrix formulation of Co-kriging,” *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, vol. 14, no. 3, pp. 249–257, **1982**.
- [122] D. Myers, “Estimation of linear combinations and Co-kriging,” *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, vol. 15, no. 5, pp. 633–637, **1983**.
- [123] O. Koroglu, T. Gulyaeva ve F. Arikan, “Enhancement of HF communication link by using near real-time updated background ionospheric model,” in *42nd COSPAR Scientific Assembly*, ser. COSPAR Meeting, vol. 42, Jul. **2018**, pp. C1.4–14–18.
- [124] O. Koroglu, F. Arikan, M. Koroglu ve O. Arikan, “High resolution regional Co-kriging interpolation of ionospheric parameters,” in *43rd COSPAR Scientific Assembly. Held 28 January - 4 February*, vol. 43, Jan. **2021**, p. 666.
- [125] W. Hatton, “Oblique-sounding and HF radio communication,” *IRE Transactions on Communications Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 275–279, **1961**.
- [126] G. Vertogradov, V. Uryadov ve V. Vertogradov, “Oblique sounding and modeling of the ionospheric HF channel,” *Radiophysics and Quantum Electronics*, vol. 48, no. 6, pp. 405–419, **2005**.
- [127] M. Kabasakal, “Darbant ve Genişbant Sanal İyonosonda için Sinyal İşleme Teknikleri,” Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, **2018**.
- [128] Ö. Özdil, “KD Kanalında Genişbant Haberleşme Teknikleri,” Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, **2019**.
- [129] U. Sezen, O. Sahin, F. Arikan ve O. Arikan, “Estimation of hmF2 and foF2 communication parameters of ionosphere F2-layer using GPS data and IRI-Plas model,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 10, pp. 5264–5273, **2013**.
- [130] B. Reinisch, I. Galkin, A. Belehaki, vd., “Pilot ionosonde network for identification of traveling ionospheric disturbances,” *Radio Science*, vol. 53, no. 3, pp. 365–378, **2018**.

## EK-A. İYONOSONDA VE GPS ALICI KOORDİNATLARI

Bu çalışmada kullanılan iyonosonda ve GPS alıcılarının koordinatları sırasıyla Çizelge EK-A.1 ile Çizelge EK-A.2, Çizelge EK-A.3 ve Çizelge EK-A.4’de gösterilmiştir. İyonosonda alıcı koordinatları (<https://lgdc.uml.edu>), GPS alıcı koordinatları ise EUREF Sabit GPS Ağı (<https://www.epncb.oma.be>) kullanılarak elde edilmiştir.

Çizelge EK-A.1: Avrupa üzerinde seçilen iyonosonda koordinatları.

İstasyon	Adı	Ülke	Coğrafi Koordinatlar		Jeomanyetik koordinatlar	
			Enlem (°K)	Boylam (°D)	Enlem (°K)	Boylam (°D)
DB049	Dourbes	Belçika	50.10	4.60	51.10	88.92
EB040	Roquetes	İspanya	40.80	0.50	42.77	81.53
JR055	Juliusruh	Almanya	54.60	13.40	53.95	99.49
PQ052	Pruhonic	Çekya	50.00	14.60	49.32	98.60
RL052	Chilton	İngiltere	51.50	-0.60	53.33	84.34
RO041	Roma	İtalya	41.90	12.50	41.81	93.76
SO148	Sopron	Macaristan	47.60	16.70	46.70	99.50

Çizelge EK-A.2: EUREF Sabit GPS Ağı'dan seçilen GPS Alıcısı Koordinatları.

İstasyon	Adı	Ülke	Coğrafi Koordinatlar		Jeomanyetik koordinatlar	
			Enlem (°K)	Boylam (°D)	Enlem (°K)	Boylam (°D)
ajac	Ajaccio	Fransa	41.93	8.76	42.47	90.11
aqui	L'Aquila	İtalya	42.37	13.35	42.13	94.73
aubg	Augsburg	Almanya	48.42	10.92	48.41	94.44
autn	Autun	Fransa	46.95	4.29	48.11	87.37
badh	Bad Homburg	Almanya	50.23	8.61	50.55	92.91
baut	Bautzen	Almanya	51.19	14.52	50.51	98.75
bcln	St. Vicenc dels Horts	İspanya	41.41	2.00	43.11	83.22
bell	Bellmunt de Segarra	İspanya	41.60	1.40	43.32	82.51
bolg	Bologna	İtalya	44.50	11.36	44.53	93.29
brux	Brüksel	Belçika	50.80	4.36	51.79	88.70
bscn	Besançon	Fransa	47.25	5.99	48.11	89.17
bzrg	Bolzano	İtalya	46.50	11.34	46.48	94.14
caen	Caen	Fransa	49.18	-0.46	51.07	83.49
case	Cassa de la Selva	İspanya	41.88	2.90	43.36	84.10
chiz	Chize	Fransa	46.13	-0.41	48.04	82.14
como	Como	İtalya	45.80	9.10	46.18	91.70
crak	Rakovnik	Çekya	50.10	13.73	49.57	97.81
creu	Cadaques	İspanya	42.32	3.32	43.72	84.66
ctab	Tabor	Çekya	49.41	14.68	48.74	98.45
delf	Delft	Hollanda	51.99	4.39	52.93	89.24
dent	Dentergem	Belçika	50.93	3.40	52.11	88.09
diep	Diepholz	Almanya	52.59	8.34	52.87	93.68
dill	Dillingen	Almanya	49.37	6.70	50.05	90.69
dour	Dourbes	Belçika	50.09	4.60	51.10	88.91
ebre	Roquetes	İspanya	40.82	0.49	42.79	81.52
eglt	Egletons	Fransa	45.40	2.05	46.99	84.58
eijs	Eijsden	Hollanda	50.76	5.68	51.53	89.99



Çizelge EK-A.3: EUREF Sabit GPS Ağı'ndan seçilen GPS Alıcısı Koordinatları (Devam).

İstasyon	Adı	Ülke	Coğrafi Koordinatlar		Jeomanyetik koordinatlar	
			Enlem (°K)	Boylam (°D)	Enlem (°K)	Boylam (°D)
elba	San Piero Campo	İtalya	42.75	10.21	43.03	91.79
entz	Entzheim	Fransa	48.55	7.64	49.09	91.29
esco	Naut Aran	İspanya	42.69	0.98	44.53	82.59
eusk	Euskirchen	Almanya	50.67	6.76	51.29	91.29
gari	Porto Garibaldi	İtalya	44.68	12.25	44.56	94.22
gell	Gellin	Almanya	53.45	14.32	52.73	99.52
geno	Genova	İtalya	44.42	8.92	44.87	91.06
gope	Ondrejov	Çekya	49.91	14.79	49.21	98.74
gor2	Gorleben	Almanya	53.05	11.35	52.82	96.50
gras	Caussols	Fransa	43.75	6.92	44.56	88.87
gsr1	Ljubljana	Slovenya	46.05	14.54	45.50	97.09
helg	Helgoland Island	Almanya	54.17	7.89	54.47	93.67
hers	Hailsham	İngiltere	50.87	0.34	52.51	84.72
hobu	Eschenberg	Almanya	53.05	10.48	52.96	95.96
karl	Karlsruhe	Almanya	49.01	8.41	49.39	91.98
kos1	Kootwijk	Hollanda	52.17	5.82	52.90	91.03
ldb2	Lindenberg	Almanya	52.21	14.12	51.53	99.07
leij	Leipzig	Almanya	51.35	12.37	51.01	96.75
lliv	Llivia	İspanya	42.48	1.97	44.09	83.35
linz	Linz	Avusturya	48.31	14.28	47.74	97.65
ijmu	Ijmuiden	Hollanda	52.46	4.56	53.36	89.62
m0se	Roma	İtalya	41.89	12.49	41.81	93.75
man2	Le Mans	Fransa	48.02	0.16	49.84	83.64
mars	Marseille	Fransa	43.28	5.35	44.36	87.16
pfa2	Bregenz	Avusturya	47.52	9.78	47.72	92.77
pore	Porec	Hırvatistan	45.23	13.60	44.87	95.71
pots	Potsdam	Almanya	52.38	13.07	51.87	98.14

Çizelge EK-A.4: EUREF Sabit GPS Ağı'ndan seçilen GPS Alıcısı Koordinatları (Devam).

İstasyon	Adı	Ülke	Coğrafi Koordinatlar		Jeomanyetik koordinatlar	
			Enlem (°K)	Boylam (°D)	Enlem (°K)	Boylam (°D)
pous	Poustka	Çekya	50.14	12.30	49.84	96.45
prat	Prato	İtalya	43.89	11.10	43.98	93.02
ptbb	Braunschweig	Almanya	52.30	10.46	52.24	95.31
puyv	Le Puy en Velay	Fransa	45.04	3.88	46.33	86.28
rant	Rantum	Almanya	54.81	8.29	55.02	94.37
rove	Rovereto	İtalya	45.89	11.04	45.93	93.43
sass	Sassnitz Island of Ruegen	Almanya	54.51	13.64	53.83	99.67
sbg2	Salzburg	Almanya	47.80	13.11	47.44	96.33
shoe	Shoeburyness	İngiltere	51.55	0.83	53.15	85.80
sjdv	Saint Jean des Vignes	Fransa	45.88	4.68	46.96	87.16
smne	Saint-Mandé	Fransa	48.84	2.43	50.26	86.24
sneo	St Neots	İngiltere	52.19	-0.11	53.91	85.14
ters	West-Terschelling	Hollanda	53.36	5.22	54.12	90.68
tlse	Toulouse	Fransa	43.56	1.48	45.29	83.38
tori	Torino	İtalya	45.06	7.66	45.71	90.04
unpg	Perugia	İtalya	43.12	12.36	43.02	93.84
vaco	Vacov	Çekya	49.13	13.72	48.64	97.18
ven1	Venezia	İtalya	45.43	12.35	45.27	94.75
vfch	Villefranche-sur-Cher	Fransa	47.29	1.72	48.82	84.70
vlis	Vlissingen	Hollanda	51.44	3.60	52.53	88.22
warn	Rostock-Warnemuende	Almanya	54.17	12.10	53.76	98.04
wprt	Westerbork	Hollanda	52.91	6.60	53.48	92.14
wtzt	Bad Koetzting	Almanya	49.14	12.87	48.79	96.37
zara	Zaragoza	İspanya	41.63	-0.88	43.81	80.38
zimm	Zimmerwald	İsviçre	46.88	7.47	47.50	90.49
zouf	Cercivento	İtalya	46.55	12.97	46.26	95.53

## **Tezden Üretilmiş Yayınlar**

Arikan, F., Koroglu, O., A methodology for estimation of hourly-monthly stochastic trend characteristics of midlatitude ionosphere, *Radio Science*, 55, 11, 2020.

Koroglu, O., Arikan, F., Regional ionospheric trend statistics: IONOLAB-PDF, *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, Volume 25, Issue 3, 29 May 2017, Pages 1773-1783.

## **Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar**

Koroglu, O., Arikan, F., Koroglu, M., Arikan, O., High Resolution Regional Co-Kriging Method for Midlatitude Ionosphere, *43rd COSPAR GENERAL Assembly*, Australia (Hybrid) 2021.

Koroglu, O., Arikan, F., Gulyaeva, T.L., Enhancement of HF communication link by using near real-time updated background ionospheric model, *COSPAR 2018*, 13-22 Jul 2018, LA, USA.

Koroglu, O., Arikan, F., Gulyaeva, T.L., Near Real-Time Background Ionospheric model update by using GPS-TEC and NmF2 for HF Communication Links, *URSI AT-RASC 2018*, May 2018, Spain.

Arikan, F., Arikan, O., Sezen, U., Toker, C., Gulyaeva, T.L., Karatay, S., Erdem, E., Koroglu, O., Koroglu, M., Cinar, A., Statistical updates of IRI and IRI-Plas using GPS-TEC in near real-time for HF communication and Ground Based Augmentation Systems, *IRI 2017 Workshop*, 13-17 November 2017, Taipei, Taiwan.

Koroglu, O., Arikan, F., Toker, C., Artuner, H., Mosna, Z., Fusion of ionosonde measurements and TEC estimations using statistical techniques, *The second VarSITI General Symposium (VarSITI-2017)*, 10-15 July 2017, Irkutsk, Russia.

Koroglu O., Arikan, F., A novel approach to development of ionospheric random field model using GPS-TEC data, *IRI 2015 Workshop*, KMTIL, Bangkok, Thailand, 2-15 November 2015.

Deviren, M. N., F. Arikan, I. Sayin, O. Koroglu, Automatic TEC Mapping Using A GPS Network and GIM-TEC, *1st URSI Atlantic Radio Science Conference (URSI AT-RASC)*, Expo Meloneras Convention Centre, Gran Canaria, 18-22 May 2015.

Koroglu O., Arikan, F., Koroglu, M., Regional And Seasonal Aspects Of Within-The-Hour TEC Statistics, *European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2015*, Austria Center, Vienna, Austria, 12-17 April 2015.

Koroglu, O., Arikan, F., Deviren, M.N., Regional and seasonal parametric probability density function estimation for Total Electron Content, *IEEE 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) 2014*, pp.915-918, 23-25 April 2014, doi: 10.1109/SIU.2014.6830379.

### **Diğer Yayınlar**

Koroglu M., Koroglu, O. Arikan, F., Analysis of Seasonal Ionospheric Gradients Over Turkey For Year 2011, *32nd URSI GASS*, 19–26 August 2017, Montreal, Canada.

Koroglu O., Arikan, F., Koroglu, M., Ozkazanc, Y.S., Detection of Geomagnetic Pulsations of the Earth Using GPS-TEC Data, *41st COSPAR Scientific Assembly*, Istanbul, Turkey, 30 July-7 August.

Koroglu M., Koroglu, O. Arikan, F., Ionosphere Threat Model Investigations by Using Turkish National Permanent GPS Network, *41st COSPAR Scientific Assembly*, Istanbul, Turkey, 30 July-7 August.

Ozcan M., Koroglu, O., Validation Of Missile Launcher Shielding Effectiveness, *3rd EMC Turkey International Conference*, Istanbul, Turkey, 2 - 4 September 2015.

Koroglu M., Arikan, F., Koroglu, O., Detection of Ionospheric Disturbances over Turkey Using Ionospheric Spatial Gradient Estimates, *7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST) 2015*, Istanbul, Turkey, 16-19 June 2015.

Koroglu M., Koroglu, O. Arikan, F., An Initial Investigation of Ionospheric Gradients for Detection of Ionospheric Disturbances over Turkey, *European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2015*, Austria Center, Vienna, Austria, 12-17 April 2015.

Koroglu, O., Arikan, F., İyonküre Toplam Elektron İçeriğinin Geniş Anlamda Durağanlığı Üzerine Bir Çalışma, *URSI-TÜRKİYE'2014 VII. Bilimsel Kongresi*, 28-30 August 2014, Elazığ.

Sapaz, M.S., Arikan, F., Gulyaeva, T.L., Koroglu, O., Analysis Of Probability Density Functions of Total Electron Content For Magnetic Conjugate Locations, *6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST) 2013*, pp.769-772, 12-14 June 2013, doi: 10.1109/RAST.2013.6581314.

Koroglu, O., Arikan, F., Türel, N., Aysezen, M.S., Lenk, M.O., Aktuğ, M.B., Estimation of Probability Density Function for TUSAGA TEC, *IEEE 18th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) 2010*, pp.860-862, 22-24 April 2010 doi:10.1109/SIU.2010.5653362.

Arikan, F., Koroglu, O., Fidan M.S., Arikan, O., Guldogan, B., “Multipath Separation-Direction of Arrival (MS-DOA) with Genetic Search Algorithm for HF channels”, *Advances in Space Research*, Volume 44, Issue 6, 15 September 2009, Pages 641-652, ISSN 0273-1177, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2008.09.037>.

Arikan F., Koroglu O., Fidan M.S., Arikan O., Guldogan B., Yilmaz N., Multipath Separation-Direction-Of-Arrival (MS-DOA) with Genetic Search Algorithm for HF Channels, *Abstracts Booklet of IRI/COST 296-2007*, Institute of Atmospheric Physics, Prague, Czech Republic, 10 - 14 July 2007.