

RADYO ÖRTÜLME VERİSİNİN BİLGİSAYARLI İYONKÜRE TOMOGRAFİSİ İLE BÜTÜNLEŞTİRMESİ

FUSION OF RADIO OCCULTATION INTO COMPUTERIZED IONOSPHERIC TOMOGRAPHY

SİNEM DENİZ YENEN

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.

2024

ÖZET

RADYO ÖRTÜLME VERİSİNİN BİLGİSAYARLI İYONKÜRE TOMOGRAFİSİ İLE BÜTÜNLEŞTİRMESİ

Sinem Deniz Yenen

Doktora, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Danışman: Prof. Dr. Feza ARIKAN

Haziran 2024, 127 sayfa

Sinyaller iyonküreden geçerken sönümlenme, dağıtma, kutuplanma kaybı, zaman gecikmesi, Faraday dönmesi ve faz kayması gibi etkilere maruz kalmaktadır. İyonkürenin sinyaller üzerindeki etkisinin nedeni frekansa bağlı kırılma indisidir ve kırılma indisinin en önemli değişkeni elektron yoğunluğudur. Bu nedenle iyonküre elektron yoğunluğunun yeniden yapılandırılması, iyonkürenin yapısının ve iyonküreden geçen sinyaller üzerindeki etkisinin incelenmesi için önemlidir. Bu çalışmada, iyonkürenin sakin ve bozulmalı günleri için hem gerçek hem de sanal dikey ve yatay yollar kullanılarak elektron yoğunluğunu yeniden yapılandırmak amacıyla 4-B Bilgisayarlı İyonküre Tomografi (BİT) algoritması, IONOLAB-Fusion, geliştirilmiştir. Kullanıcı dostu algoritmaya, yalnızca ilgilenilen bölgenin koordinatlarının ve istenilen uzay-zamansal çözünürlüğe sahip aralığın girilmesi gerekmektedir. Model iyonküre, 4-B iyonkürenin 1-B bir vektöre indirgenebilmesi için leksikografiksel bir sırayla küresel hücreler kullanılarak oluşturulmaktadır. Model matrisi, geriye dönük veya gerçek zamana yakın bir şekilde eniyilenmiş bir arka plan iyonküre modeli kullanılarak otomatik olarak oluşturulmaktadır. Tekil Değer Ayrışımı (TDA), önemli tekil değerlerin bir alt kümesini ve bu tekil değerlere karşılık gelen sinyal alt uzay taban vektörlerini kestirmek için uygulanmaktadır. Ölçüm vektörü ve örnekleme matrisi, eniyilenmiş yer tabanlı ve uydu tabanlı yollar ile

otomatik olarak oluşturulmaktadır. Yeniden yapılandırma, Enaz Kareler Kestirimi ile kapalı formda elde edilmektedir. IONOLAB-Fusion'ın Avrupa üzerindeki başarımı iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilleri ile karşılaştırıldığında, arka plan iyonküre modeline göre sakin ve bozulmalı günler için sırasıyla 26,51% ve 32,33%'lük bir iyileşme gözlemlenmiştir. IONOLAB-Fusion ile hesaplanan TEİ haritaları, GIM-TEİ haritaları ile karşılaştırıldığında, IONOLAB-Fusion'ın uyumu, arka plan iyonküre modeline göre sakin ve bozulmalı günler için sırasıyla 37,89% ve 31,58% daha iyidir. IONOLAB-Fusion sonuçları literatürde yer alan fonksiyon tabanlı dört ayrı yöntem ile karşılaştırmış ve bu yöntemlere göre hmF2 yüksekliğine kadar 28.24%, Chapman yüksekliğine kadar 33.59% daha iyi başarımlar sergilediği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İyonküre, Bilgisayarlı İyonküre Tomografisi, Tekil Değer Ayrışımı, Radyo Örtülme.

ABSTRACT

Fusion of Radio Occultation into Ionospheric Tomography

Sinem Deniz Yenen

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

Supervisor: Prof. Dr. Feza ARIKAN

June 2024, 127 pages

Signals passing through the ionosphere are subjected to effects such as attenuation, scattering, polarization loss, time delay, Faraday rotation, and phase shift. The cause of the ionosphere's effect on signals is the frequency-dependent refractive index, with electron density being the most significant variable influencing the refractive index. Therefore, reconstructing the electron density of the ionosphere is crucial for examining the ionosphere's structure and its impact on signals passing through it. In this study, a 4-D Computerized Ionospheric Tomography (CIT) algorithm, IONOLAB-Fusion, is developed to reconstruct electron density using both real and virtual vertical and horizontal paths for both quiet and disturbed days of the ionosphere. The user-friendly algorithm only requires input of the coordinates of the region of interest and the desired spatio-temporal resolution interval. The model ionosphere is constructed using spherical voxels arranged in a lexicographical order to map the 4-D ionosphere into a 1-D vector. The model matrix is automatically generated using an optimized background ionosphere model either retrospectively or in near real-time. Singular Value Decomposition (SVD) is applied to estimate a subset of significant singular values and the corresponding signal subspace basis vectors. The measurement vector and sampling matrix is automatically created using optimized ground-based and satellite-based paths. Re-

construction is achieved in closed form using Least Squares estimation. When comparing IONOLAB-Fusion's performance over Europe to vertical electron density profiles obtained from ionosonde measurements, improvements of 26.51% and 32.33% are observed for quiet and disturbed days, respectively, relative to the background ionosphere model. When comparing Total Electron Content (TEC) maps calculated by IONOLAB-Fusion with GIM-TEC maps, IONOLAB-Fusion showed 37.89% and 31.58% better agreement for quiet and disturbed days, respectively, compared to the background ionosphere model. Additionally, IONOLAB-Fusion's results are compared with four other function-based methods in the literature, demonstrating performance improvements of 28.24% up to the height of hmF2 and 33.59% up to the Chapman height.

Keywords: Ionosphere, Computerized Ionospheric Tomography, Singular Value Decomposition, Radio Occultation.

TEŞEKKÜR

Akademik çalışmalarımın ilk gününden itibaren beni destekleyen, cesaretlendiren ve değerli fikirleri ile bana yol gösteren danışmanım Sayın Prof. Dr. Feza ARIKAN'a saygı, sevgi ve minnet ile teşekkür ederim.

Tez izleme aşamalarında ve değerlendirilmesinde bilgi ve deneyimlerini paylaşan değerli jüri üyeleri Prof. Dr. Gülbin DURAL ÜNVER, Prof. Dr. Cenk TOKER, Prof. Dr. Sinan GEZİCİ ve Dr. Öğr. Üyesi Şölen KUMBAY YILDIZ'a teşekkür ederim.

Destek ve yardımları için IONOLAB grubu üyesi değerli hocalarıma ve araştırmacı arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tez sürecinde gösterdikleri anlayış ve destek için ASELSAN'daki yönetici ve başta Dr. Gökhan GÖK olmak üzere çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu süreci başından itibaren benimle birlikte yaşayan ve her zaman yanımda olan Dr. Esra ERDEM ve Öznur ATEŞ YILDIZ'a verdikleri destek için teşekkür ederim.

Hayatta attığım her adımda yanımda olan ve beni destekleyen değerli aileme, özellikle anne ve babama teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. İYONKÜRE ÖLÇÜMLERİ	12
2.1. Uydu Tabanlı Yöntemler	12
2.2. Yeryüzü Tabanlı Yöntemler	15
2.3. İyonküre Modelleri	17
3. BİLGİSAYARLI İYONKÜRE TOMOGRAFİ YÖNTEMLERİ	19
3.1. Küresel Başlık Harmonikleri	21
3.1.1. Koordinat Dönüşümü	23
3.1.2. Legendre Fonksiyonunun Hesaplanması	24
3.2. Haar Dalgacıkları	26
3.3. B-Spline Fonksiyonları	29
3.4. Slepian Fonksiyonları	31
4. İONOLAB-FUSION ALGORİTMASI	34
4.1. Arka Plan İyonküre ve Model Matrisinin Oluşumu	40
4.2. Tekil Değer Ayrıştırmasının (TDA) Model Matrisine Uygulanması	42
4.3. Ölçüm Vektörünün ve Örnekleme Matrisinin Oluşturulması	43
4.4. Geriçatma Algoritmasının Uygulanması	50
5. BİLGİSAYARLI İYONKÜRE TOMOGRAFİSİNDE KULLANILAN GELİŞTİRİLMİŞ İONOLAB-RAY VE IRI-PLAS-STEC ALGORİTMALARI ...	52

6. BULGULAR	57
6.1. Model Matris Oluşturulması.....	60
6.2. Ölçüm Vektörü ve Örnekleme Matrisi Oluşturulması	61
6.3. IONOLAB-Fusion Algoritmasının Uygulanması ve Test Edilmesi	66
7. SONUÇ	103
KAYNAKLAR	107
EK-A. YERKÜRESEL KONUMLAMA SİSTEMİ (YKS) ALICI İSTASYON KOORDİNATLARI	114
EK-B. KAYNAK VE ALICI ÇİFTLERİ	117
EK-C. IONOLAB-FUSION KULLANIM KILAVUZU	118
ÖZGEÇMİŐ	126

ŞEKİLLER DİZİNİ

1.1.	İyonküre katman gösterimi ve zaman ile yüksekliğe bağlı elektron yoğunluğu profilleri.	2
1.2.	İyonküre Coğrafi Bölge Gösterimi.	3
1.3.	ETEİ Gösterimi.	7
2.1.	PRN 13 uydusunun izlediği uydu yolu (kırmızı) ve Avrupa bölgesinden 40°'den büyük yükseliş açısı ile görüldüğü aralık (kesikli mavi).	12
2.2.	YKS uydusu ile AYY uyduları arasındaki ışınların gösterimi.	14
2.3.	COSMIC-1 AYY uydusunun izlediği uydu yolu.	15
2.4.	PQ052 iyonosondası için 17 Nisan 2011, 12:00 GS tarihli iyonogram ve dikey elektron yoğunluğu profili.	16
3.1.	Küresel Başlık gösterimi.	22
3.2.	Küresel başlık koordinat gösterimi.	23
3.3.	Küresel başlık için Legendre fonksiyonları.	25
3.4.	Haar ölçeklendirme fonksiyonu.	26
3.5.	V^1 vektör uzayı için kutu fonksiyonlar.	27
3.6.	W^1 vektör uzayı için örnek iki Haar dalgacık	28
3.7.	V^2 vektör uzayı için 2-B Haar dalgacık tabanları.	28
3.8.	B-spline fonksiyonları, a) $j = 0$, b) $j = 1$, c) $j = 2$	30
3.9.	2-B ölçeklendirme fonksiyonları, $\phi_k^j(\theta)\phi_k^j(\phi)$, $j = 3$ ve $k = 7$ (sol) ile $j = 2$ ve $k = 2$ (sağ).	31
3.10.	Orta enlem bölgesinde yoğunlaşan ilk 20 Slepian taban fonksiyon örnekleri.	33
4.1.	Küresel Hücre Gösterimi.	35
4.2.	Model matrisin oluşum adımlarını gösteren akış şeması F1.	40
4.3.	Model matrisine TDA yönteminin uygulama adımlarını gösteren akış şeması F2.	42
4.4.	Ölçüm vektörünün oluşturulma adımlarını gösteren akış şeması F3.a.	44
4.5.	Örnekleme matrisinin oluşturulma adımlarını gösteren akış şeması F3.b. ...	47

4.6.	Avrupa bölgesi üzerindeki iyonkürenin 3-B küresel hücreler ile gösterimi. Yeryüzü alıcı istasyonları (●) ile YKS uydu çiftleri ve sanal alıcı (●) ile YKS uydu çifti arasındaki ışınlar ile AYY-YKS uydu çiftleri arasındaki ışınların gösterimi.	49
4.7.	Elektron yoğunluğu yeniden yapılandırma adımlarını gösteren akış şeması F4.	50
6.1.	Kesikli çerçeve, genişletilmiş bölge (siyah çerçeve) içerisindeki ilgilenilen alanı göstermektedir. Bölge enlem ve boylamda 1° çözünürlükte ızgaralara bölünmüştür.	57
6.2.	4 Nisan 2013 08:00 GS gope yeryüzü alıcı istasyonu ile a) PRN 5, b) PRN 8 ve c) PRN 10 uydusu arasındaki yüksekliğe bağlı birikimli ETEİ değerleri.	59
6.3.	F10.7 Güneş akısının ve Güneş Lekesi Sayısı'nın yıllık ortalaması (' https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ '). Siyah eğri F10.7, kırmızı eğri GLS yıllık ortalamasını göstermektedir. F10.7 değeri yeşil doğrunun altında olan yıllar Az Etkin, yeşil ile mor doğru arasında kalan yıllar Aza Yakın Etkin, mor ile mavi doğru arasında kalan yıllar Orta Düzeyde Etkin, mavi doğrunun üstünde olan yıllar Çok Etkin olarak sınıflandırılmıştır [89]. ...	61
6.4.	Bölgedeki yeryüzü alıcı istasyonları (●).	62
6.5.	Örneklem noktaları (○), a) 48 istasyon, b) 20 istasyon, c) 9 istasyon.	63
6.6.	17 Nisan 2011 tarihi, saat 12:00 GS için görüş hattı içindeki YKS-AYY uydu çiftleri.	64
6.7.	Seçilen tarihler için a) Kp, b) Dst, c) AE indeksleri.	67
6.8.	17 Nisan 2011, saat 12:00 GS ve a) $N_d = 30$ için düzgelenmiş birikimli enerji, b) $N_d = 30$ için tekil değerler, c) $N_d = 3, 5, 7$ ve 9 için düzgelenmiş birikimli enerji, d) $N_d = 3, 5, 7$ ve 9 için tekil değerler.	69
6.9.	17 Nisan 2011, iyonkürenin sakin günü, saat 12:00 GS, PQ052 iyonosonda konumunda, $N_d = 3$ için, a) S1, b) S2, c) S3, d) S4 ve e) S5 için geriçatma sonuçları, IRI-Plas ile hesaplanan dikey elektron yoğunluğu profili, iyonosonda ile hesaplanan dikey elektron yoğunluğu profili.	71
6.10.	17 Nisan 2011, iyonkürenin sakin günü, saat 12:00 GS, a) hmF2 yüksekliğine, b) Chapman yüksekliğine, c) 1000 km'ye kadar geriçatma sonuçları ve IRI-Plas dikey elektron yoğunluğu profilinin PQ052 iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profili ile karşılaştırma sonuçları. ...	73

6.11.	7 Nisan 2013, iyonkürenin bozulmalı günü, saat 18:00 GS, DB049 iyonosonda konumunda a) S1, b) S2, c) S3, d) S4 ve e) S5 için geriçatma sonuçları, IRI-Plas ile hesaplanan dikey elektron yoğunluğu profili, iyonosonda ile hesaplanan dikey elektron yoğunluğu profili.	74
6.12.	7 Nisan 2013, iyonkürenin bozulmalı günü, saat 18:00 GS, a) hmF2 yüksekliğine, b) Chapman yüksekliğine, c) 1000 km'ye kadar geriçatma sonuçları ve IRI-Plas dikey elektron yoğunluğu profilinin DB049 iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profili ile karşılaştırma sonuçları. ..	76
6.13.	Tüm günler ve saatler için, a) hmF2 yüksekliğine, b) Chapman yüksekliğine, c) 1000 km'ye kadar geriçatma sonuçları ve IRI-Plas dikey elektron yoğunluğu profilinin tüm iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilleri ile karşılaştırma sonuçları.....	77
6.14.	ODE yıllarından seçilen tarihler için a) Kp, b) Dst, c) AE indeksleri.	79
6.15.	$\underline{G}_2$ model matrisi için $N_s = 10$ 'a kadar a) düzgelenmiş birikimli enerji, b) tekil değerler.	80
6.16.	8 Nisan 2015, saat 12:00 GS, a) Yeryüzü alıcı istasyonları (48) ve YKS uyduları arasındaki 3-B ışınların gösterimi, b) Işınların yeryüzüne izdüşümü, c) İlgilenilen bölge üzerinde yer alan ışınlar.	81
6.17.	100 km çözünürlüklü elektron yoğunluğu dilimleri: (a) 25 Nisan 2013, saat 03:00 GS'de (bozulmalı gün) IONOLAB-Fusion kullanılarak yeniden yapılandırılan, (b) 25 Nisan 2013, saat 03:00 GS'de IRI-Plas tarafından hesaplanan, (c) 25 Nisan 2013, saat 03:00 GS için IONOLAB-Fusion ve IRI-Plas arasındaki fark, (d) 17 Nisan 2011, saat 08:00 GS (sakin gün) için IONOLAB-Fusion kullanılarak yeniden yapılandırılan, (e) 17 Nisan 2011, saat 08:00 GS için IRI-Plas tarafından hesaplanan, (f) 17 Nisan 2011, saat 08:00 GS için IONOLAB-Fusion ve IRI-Plas arasındaki fark.	82
6.18.	100 km çözünürlüklü elektron yoğunluğu dilimleri, (a) 8 Nisan 2015, saat 18:00 GS'de (sakin gün) IONOLAB-Fusion kullanılarak yeniden yapılandırılan, (b) 8 Nisan 2015, saat 18:00 GS'de IRI-Plas tarafından hesaplanan, (c) 8 Nisan 2015, saat 18:00 GS için IONOLAB-Fusion ve IRI-Plas arasındaki fark, (d) 24 Nisan 2012, saat 23:00 GS'de (bozulmalı gün) IONOLAB-Fusion kullanılarak yeniden yapılandırılan, (e) 24 Nisan 2012, saat 23:00 GS'de IRI-Plas tarafından hesaplanan, (f) 24 Nisan 2012, saat 23:00 GS için IONOLAB-Fusion ve IRI-Plas arasındaki fark. ..	83

6.19.	İyonosonda konumunda IONOLAB-Fusion algoritması kullanılarak yeniden yapılandırılan elektron yoğunluğu ve IRI-Plas modeli kullanılarak hesaplanan elektron yoğunluğu ile iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilleri, a) DB049, 25 Nisan 2013, saat 03:00 GS (bozulmalı gün), b) PQ052, 17 Nisan 2011, saat 08:00 GS (sakin gün), c) JR055, 8 Nisan 2015, saat 18:00 GS (sakin gün), d) EB040, 24 Nisan 2012, saat 23:00 GS (bozulmalı gün).	85
6.20.	a) hmF2, b) Chapman, c) 1,000 km yüksekliklerine kadar tomografi yöntemi karşılaştırması.	88
6.21.	Sakin günler ve tüm saatlerde farklı uydu sayıları (N_m) için elektron yoğunluğu yeniden yapılandırma sonuçlarının a) hmF2, b) Chapman ve c) 1000 km için tüm iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilleri ile karşılaştırma sonuçları.	91
6.22.	a) 4 Nisan 2013, saat 03:00 GS, b) 17 Nisan 2011, 12:00 GS için 11 dk GAD süresi boyunca izlenen elektron yoğunluğunun bant genişliğinin zamanda örneklenmesi ile hesaplanan bant genişliğine oranı.	93
6.23.	8 Nisan 2015, saat 12:00 GS, a) AYY ile YKS uyduları arasındaki 3-B ışınların gösterimi, b) Işınların yeryüzüne izdüşümü, c) Genişletilmiş bölge üzerinde yer alan ışınlar.	94
6.24.	Sanal yatay ışınlar.	95
6.25.	25 Nisan 2013, saat 03:00 GS (bozulmalı gün) için a) CODE-TEİ, b) IONOLAB-Fusion TEİ, c) IRI-Plas TEİ, 17 Nisan 2011, saat 08:00 GS (sakin gün) için d) CODE-TEİ, e) IONOLAB-Fusion TEİ, f) IRI-Plas TEİ.	100
6.26.	8 Nisan 2015, saat 18:00 GS (sakin gün) için g) CODE-TEİ, h) IONOLAB-Fusion TEİ, i) IRI-Plas TEİ, 24 Nisan 2012, saat 23:00 GS (bozulmalı gün), j) CODE-TEİ, k) IONOLAB-Fusion TEİ, l) IRI-Plas TEİ.	101
EK-C.1.	IONOLAB-Fusion kullanıcı arayüzü gösterimi.	119
EK-C.2.	Tarih girişi.	119
EK-C.3.	Model matris oluşturulurken kullanılacak günlerin belirtilmesi.	121
EK-C.4.	Tarihler için liste girişi.	121
EK-C.5.	Düzenli karesel örnekleme gösterimi.	122
EK-C.6.	Sanal yeryüzü alıcısı ekleme.	123
EK-C.7.	YKS uydu ve yeryüzü alıcıları arasındaki ışınların izdüşümleri.	123
EK-C.8.	RO veri ekleme.	124

ÇİZELGELER DİZİNİ

3.1.	Literatürdeki fonksiyon tabanlı çalışmaların özeti.	21
3.2.	$k=5$ ve $\theta_o=24^\circ$ için n_k^m değerleri.	25
5.1.	IONOLAB-RAY algoritması üzerinde yapılan geliştirilmelerin IONOLAB-mRAY algoritması ile karşılaştırmalı açıklaması.	53
6.1.	$\underline{\underline{G}}_1$ model matrisi oluşturulurken kullanılacak beş ayrı veri seti.	67
6.2.	Avrupa bölgesinden seçilen iyonosonda konumları.	69
6.3.	Şekil 6.19’da verilen gün, saat ve iyonosondalar için karşılaştırma sonuçları.....	86
6.4.	$\underline{\underline{G}}_1$ ve $\underline{\underline{G}}_2$ model matrisleri için istasyon sayısına bağlı geriçatma sonuçlarının sakin günler ve tüm saatler için iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilleri ile karşılaştırma metrik sonuçları.	90
6.5.	$\underline{\underline{G}}_1$ ve $\underline{\underline{G}}_2$ model matrisleri için senaryolar için tüm veri setleri üzerinden genel karşılaştırma sonuçları.	96
6.6.	$\underline{\underline{G}}_2$ model matrisi için senaryolar üzerinden tüm veri setlerinin geri çatma sonuçlarının IRI-Plas modeli ile hesaplanan elektron yoğunluğu profilleri ile genel karşılaştırma sonuçları.	98
6.7.	Sakin ve bozulmalı günlerde, günün farklı saatlerinde CODE-TEİ haritaları ile IONOLAB-Fusion TEİ haritaları ve IRI-Plas TEİ haritalarının RMS karşılaştırma sonuçları.	102
EK-A.1.	EUREF Sabit YKS Ağı’ndan seçilen YKS Alıcı İstasyon Koordinatları. .	114
EK-A.2.	EUREF Sabit YKS Ağı’ndan seçilen YKS Alıcı İstasyon Koordinatları (Devam).	115
EK-A.3.	EUREF Sabit YKS Ağı’ndan seçilen YKS Alıcı İstasyon Koordinatları (Devam).	116
EK-B.1.	YKS alıcı istasyonları ile YKS uyduları arasındaki zamana bağlı ışın sayısı.	117
EK-B.2.	YKS alıcı istasyonları ile AYY uyduları üzerinde bulunan alıcılar arasındaki zamana bağlı ışın sayısı.	117
EK-C.1.	Parametreler ve Açıklamaları	120
EK-C.2.	Çıktı Açıklamaları	125

Simgeler ve Kısaltmalar

AE	: Auroral Electrojet
AYE	: Aza Yakın Etkin
AZE	: Az Etkin
COE	: Çok Etkin
CODE	: Center for Orbit Determination in Europe
Dst	: Disturbance Storm Time
foF2	: F2 katmanı kritik frekansı
GLS	: Güneş Lekesi Sayısı
GTD	: Genelleştirilmiş Tikhonov Düzenliştirmesi
GS	: Greenwich Saati
hmF2	: F2 katmanı kritik yükseklik
KKBS	: Küresel Konum Belirleme Sistemi
IGS	: International GNSS Service
IONEX	: Ionosphere Map EXchange Format
IRI	: International Reference Ionosphere
IRI-Plas	: International Reference Ionosphere Extended to Plasmasphere
JPL	: Jet Propulsion Laboratory
KD	: Kısa Dalga
NL2	: Düzgelenmiş L2N
ODE	: Orta Düzeyde Etkin
OYF	: Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu
RMS	: Ortalama Karese Kök Hata
SKLD	: Simetrik Kullback-Leibler Distance
TDA	: Tekil Değer Ayrışımı
TEİ	: Toplam Elektron İçeriği
TKİM	: Tek Katmanlı İyonküre Modeli
YİH	: Yerküresel İyonküre Haritası
YKS	: Yerküresel Konumlama Sistemi
YMA	: Yerküre Manyetik Alanı

Sözlük

Aradeğerleme	: Interpolation
Ampirik	: Empirical
Anlamalı Taban Vektör	: Significant Physical Basis
Avrupa Yörünge Belirleme Merkezi	: Center for Orbit Determination in Europe
Aza Yakın Etkin	: Solar Near Low
Az Etkin	: Solar Low
Beklenti	: Expectation
Bozulmalı Gün	: Disturbed Day
Çok Etkin	: Solar High
Deterministik	: Deterministic
Dağılım	: Distribution
Dağıtılmalı	: Dispersive
Değişinti	: Variance
Doğrulama	: Validation
Döngülü	: Iterative
Düzgelenmiş Birikimli Enerji	: Normalized Cumulative Energy
Düzgün Dağılmamış	: Inhomogeneous
Elektron Yoğunluğu	: Electron Density
Enaz Kareler Kestirimi	: Least Square Estimation
Geri Çatma	: Reconstruction
Güneş Lekesi Sayısı	: Sun Spot Number
Güneşsel Durum	: Solar Condition
Gürbüz	: Robust
Gürültü Altuzayı	: Noise Subspace
Greenwich Saati	: Greenwich Time
Havaküre	: Atmosphere
İlinti	: Correlation
İyonküre	: Ionosphere
Kısa Dalga	: Short Wave
Küresel Konum Belirleme Sistemi	: Global Navigation Satellite Systems

Kritik Frekans	: Critical Frequency
Orta Düzeyde Etkin	: Solar Moderate
Ortanca	: Median
Örnekleme	: Sampling
Sakin Gün	: Calm Day
Standart Sapma	: Standard Deviation
Sonda	: Sounder
Taban	: Basis
Takımyıldız	: Constellation
Tekil Değer Ayrışımı	: Singular Value Decomposition
Toplam Elektron İçeriği	: Total Electron Content
Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu	: Probability Density Function
Uzay-zamansal	: Spatio-temporal
Yerküresel	: Global
Yerküresel İyonküre Haritası	: Global Ionospheric Map
Yerküresel Konumlama Sistemi	: Global Positioning System
Yerküre Manyetik Alanı	: Geomagnetic Field
Yön bağımlı	: Anisotropic
Yön bağımsız	: Isotropic

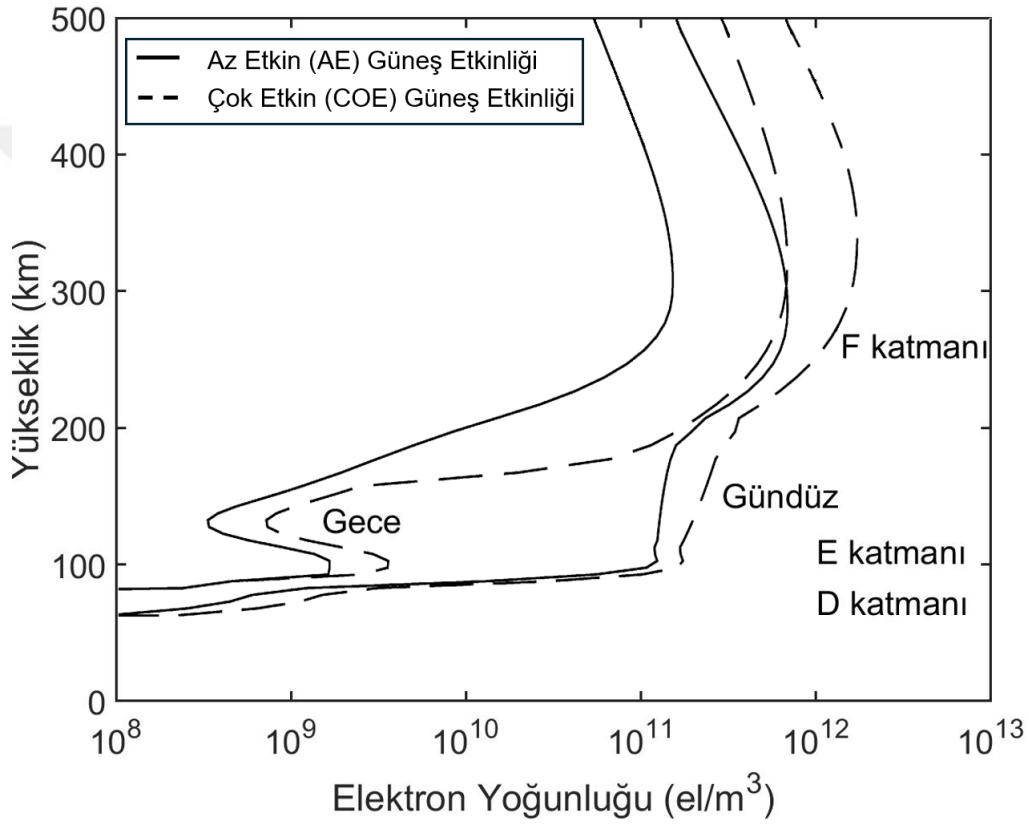
1. GİRİŞ

İyonküre, havakürenin 60 ile 1,000 km yüksekliğinde bulunan katmanıdır [1]. Güneşten gelen mor ötesi ve X ışınları moleküllere çarptığında yeterince yüksek enerjinin sağlanması durumunda elektronlar moleküllerinden kopmaktadır. İyonlaşma olarak adlandırılan bu süreç, iyonkürede pozitif yüklü serbest iyonlar ve negatif yüklü serbest elektronlar ile plazma ortamı yaratmaktadır. İyonküre plazmasının özelliklerinin belirlenmesi dielektrik sabitinin incelenmesi ile mümkündür. Dalga yayılım yolu üzerindeki dielektrik sabitinin konuma ve frekansa bağlı değişmesi nedeniyle iyonküre sırasıyla düzgün dağılmayan ve dağıtılmalı bir ortamdır. İyonküre, yerküre jeomanyetik alanının etkisi ile yön bağımlı bir ortam haline gelmektedir.

İyonküre yapısı nedeniyle elektromanyetik dalgaların yayılabileceği en karmaşık ortamlardan biridir. Bu nedenle uydu tabanlı sistemlerde, seyrüsefer sistemlerinde, ufuk ötesi radar sistemlerinde ve Kısa Dalga (KD) haberleşmesi sırasında iyonküreden geçen işaretler, iyonkürenin yapısı gereği sönmelenme, dağıtma, kutuplanma kaybı, zaman gecikmesi, Faraday dönmesi ve faz kayması gibi birçok etkiye maruz kalmaktadır. İyonkürede işaretlerin yayılımı incelenirken kırılma indisi kullanılmaktadır. İyonküre kırılma indisi zamana, konuma, yerküre jeomanyetik alanı büyüklüğüne ve elektron yoğunluğuna bağlı bir fonksiyondur. Bu nedenle iyonkürenin yapısını ifade eden en önemli parametrelerden biri iyonküre elektron yoğunluğudur. İyonküre elektron yoğunluğu, uzay ve zamanda güneş ve jeomanyetik etkilere, yerçekimsel ve sismik hareketliliklere bağlı olarak değişim göstermektedir.

İyonkürenin alt katmanı yoğun gazlardan oluşmaktadır ve gaz molekülleri birbirleri ile çok yakındır. İyonkürede iyonlaşma, Güneş ışınlarının iyonküre katmanlarını farklı şekilde etkilemesi ve gaz yoğunluğunun yüksekliğe bağlı değişmesi nedeniyle her katmanda aynı değildir [2]. Şekil 1.1’de iyonküre katmanları verilmiştir. D katmanı 60 ile 90 km yükseklikleri arasında yer almaktadır. Bu katman güneşin yüksek enerjili X ışınları tarafından oluşturulmaktadır. Gün batımından sonra iyon ve elektronların yeniden birleşmesi nedeniyle büyük ölçüde dağılmaktadır. E katmanı 90 km’den 140 km’ye kadar uzanmaktadır. Bu katmandaki iyonlaşmaya Güneş’in düşük enerjili X ışınları ve mor ötesi ışınları neden olmaktadır. Bu tabaka uzay ve zamana bağlı büyük değişkenlik göstermektedir. İyonkürede, ince bir katman içerisinde elektron yoğunluğunda büyük artışlara neden olan bozulmalar meydana gelmektedir. Bu durum ortaya çıktığında, Düzensiz E (Sporadik E) tabakasının mevcut ol-

duğu söylenmektedir. F katmanı, iyonkürenin 140 ile 1000 km arasında bulunmaktadır. Bu katman Güneş'in yüksek enerjili mor ötesi ışınları ile iyonlaşma sonucunda oluşmaktadır. Bu katman gündüz saatlerinde F1 ve F2 olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. F1 katmanı, 140 km'den 220 km'ye kadar uzanmaktadır. Gece saatlerinde iyonkürede elektronların nötr rüzgarlar tarafından yukarı taşınması nedeniyle sadece gündüzleri mevcuttur. F2 katmanı, 220 km ve üzerinde bulunmaktadır. Bu katman elektron yoğunluğu profilinin en büyük değerini içermektedir. İyonkürede iyonlaşmanın en çok gözlemlendiği F2 katmanı KD ve uydu haberleşmesi açısından oldukça önemlidir ve iyonkürenin en çok araştırılan katmanıdır.

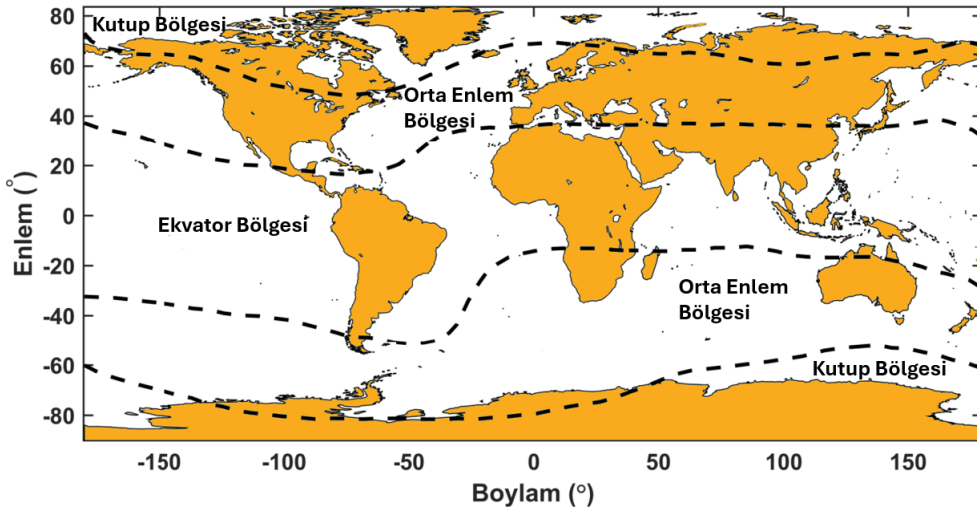


Şekil 1.1: İyonküre katman gösterimi ve zaman ile yüksekliğe bağlı elektron yoğunluğu profilleri.

Güneş'ten gelen mor ötesi ve X ışınları ile iyonlaşma süreci gerçekleşmektedir. Bu süreç sonucunda havakürede pozitif yüklü serbest iyonlar ve negatif yüklü serbest elektronlar oluşmaktadır. Güneş ışınlarının etkisinin azalması ile pozitif yüklü serbest iyonlar ve negatif yüklü serbest elektronlar arasında yeniden birleşme süreci başlamaktadır [1, 3, 4]. Güneş ışınlarının geliş açısına bağlı olarak iyonkürede 24 saatlik bir döngü bulunmaktadır. Gündüz saatlerinde iyonlaşma sürecinin başlaması nedeniyle serbest elektron sayısı yüksek se-

viyededir. Gece saatlerinde, birleşme sürecinin başlaması ile iyonküredeki serbest elektron sayısı azalmaktadır. Ayrıca iyonkürede, Güneş'in kendi etrafında dönmesinden kaynaklanan 27 günlük, Yerküre'nin Güneş etrafında dönmesinden kaynaklanan mevsimlik ve güneş hareketliliklerine bağlı Güneş Lekesi Sayısı'nın (GLS) incelenmesi ile takip edilen 11 yıllık döngüler bulunmaktadır [5].

İyonkürenin özellikleri, yerkürede enleme bağlı değişiklik göstermektedir. Şekil 1.2'de jeomanyetik ekvator, orta enlem ve kutup bölgeleri verilmiştir. İyonkürenin en yüksek elektron yoğunluğuna sahip bölgesi ekvator bölgesidir. Bu bölgede güneş ışınlarının dik açı ile gelmesi nedeniyle iyonlaşma fazladır. Yüksek enlemlerde yerküre jeomanyetik alan çizgileri kutup bölgesinde yere dik olduğundan havaküreye giren yüklü parçacıklar jeomanyetik alan ile birlikte kutup bölgelerinden alt enlem bölgelerine doğru ilerlemektedir. Orta enlem bölgesi, ekvator ve kutup bölgesi arasındaki geçiş bölgesidir ve iyonosonda ile YKS alıcı istasyonlarının büyük bir kısmı bu bölgede yer almaktadır.



Şekil 1.2: İyonküre Coğrafi Bölge Gösterimi.

Nötr bir gaz tabakasından oluşan iyonküre, iyonizasyon seviyesi değiştikçe serbest elektronların bulunduğu bir plazma tabakasına dönüşmektedir. Elektromanyetik dalgaların iyonkürede yayılımı incelenirken kullanılan en önemli parametrelerden biri plazma frekansıdır. Bu frekans, iyonküredeki serbest elektron yoğunluğunu belirlemekte ve elektromanyetik dalgalarının iyonkürede nasıl davrandığını anlamak için kullanılmaktadır. Elektron yoğunluğuna bağlı plazma frekansı, denge konumundaki bir plazmaya kuvvet etkimesi sonucunda gerçekleşen elektronların doğal salınım frekansı olarak tanımlanmaktadır. Elektronun kütlesi m ,

hızı $\vec{v}$, yükü e , sönümlenme kuvveti ν ile ifade edildiğinde, $\vec{E}$ elektrik alanı ile hareket eden tek bir elektronun denklemi,

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = e\vec{E} \quad (1.1)$$

ile ifade edilebilmektedir. Eşitlik 1.1 fazör uzamında,

$$j\omega m \vec{v} = -e\vec{E} \quad (1.2)$$

olarak yazılabilmektedir. İyonküre içerisinde oluşan indüklenme akımı $\vec{J}$,

$$\vec{J} = eN_e \vec{v} \quad (1.3)$$

ile tanımlanarak hareket denkleminin fazör uzamındaki ifadesi kullanıldığında,

$$\vec{J} = \frac{Ne^2}{j\omega m} \vec{E} \quad (1.4)$$

olarak yazılabilmektedir. ω açısal frekansı ifade etmektedir. Maxwell denklemleri kullanılarak Eşitlik 1.2 ve Eşitlik 1.4 ile,

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega \epsilon_0 \left(1 - \frac{Ne^2}{\omega^2 m \epsilon_0} \right) \vec{E} \quad (1.5)$$

elde edilebilmektedir. Plazma ortamı içerisindeki dielektrik katsayısı,

$$\epsilon_r = 1 - \frac{Ne^2}{\omega^2 m \epsilon_0} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (1.6)$$

ile ifade edilebilmektedir. Denklemden ω_p , elektron yoğunluğuna bağlı açısal plazma frekansını ifade etmektedir.

$$\omega_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{m \epsilon_0}} \quad (1.7)$$

İyonküre elektron yoğunluğuna bağlı kritik frekans, f_c , iyonkürenin elektromanyetik dalgalar üzerindeki etkisinin incelenmesinde kullanılan diğer bir önemli parametredir. f_c frekansından daha büyük frekansa sahip olan dalgalar iyonküreden yansımamakta ve kırılarak

yollarına devam etmektedir. Kritik frekans elektron kütlesi, m , ve boş uzak dielektrik sabiti, ϵ_0 , değerleri kullanılarak Eşitlik 1.8 ile hesaplanabilmektedir.

$$f_c = 9\sqrt{N_e} \quad (1.8)$$

İyonkürede elektromanyetik dalga yayılımını etkileyen diğer parametreler sinyallerin iyonküreye giriş açısı ve kırılma indisidir. Appleton-Hartree formülü soğuk bir plazma ortamı için kırılma indisini veren matematiksel ifadedir [6]. Kırılma indisinin hesaplanmasında Appleton-Hartree formülünün kullanılması ile iyonkürenin yön bağımlı yapısı hesaba katılmaktadır. Bu formülde sırasıyla, kırılma indisi n , elektron yoğunluğu N_e , plazma frekansı ω_p , yayılan dalganın frekansı ω , yerkürenin manyetik alanının büyüklüğü B , gelen dalganın ilerleme yönü ile yerkürenin manyetik alanının yönü arasındaki açı θ , elektronun parçacıklarla çarpışma frekansı ω_v , elektronun dönme frekansı ω_h , elektron yükü e , elektronun kütlesi m ve serbest uzaydaki elektrik sabiti ϵ_0 parametrelerine bağlı olarak verilmektedir.

$$n^2 = 1 \pm \frac{X}{1 - jZ - \frac{Y^2 \sin^2 \theta}{2(1-X-jZ)} + \sqrt{\frac{Y^4 \sin^4 \theta}{4(1-X-jZ)^2} + Y^2 \cos^2 \theta}} \quad (1.9)$$

Eşitlik 1.9’de bulunan $\pm$ işaretine göre sıradan ve sıradışı dalgalar için kırılma indisi hesaplanmaktadır. Eşitlik 1.9’deki $X(N_e, \omega)$, $Y(B, \omega)$ ve $Z(\omega)$ parametreleri, Eşitlik 1.10 ’de tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned} X(N_e, \omega) &= \frac{N_e e^2 \omega_p^2}{\epsilon_0 m \omega^2} \\ Y(B, \omega) &= \frac{eB}{\omega m} \\ Z(\omega) &= \frac{\omega_v}{\omega} \end{aligned} \quad (1.10)$$

İyonküre kırılma indisi ile dalga yolunun dışında zayıflama katsayısı, zaman gecikmesi, grup ve faz gecikmesi, Doppler kayması hesaplanabilmektedir.

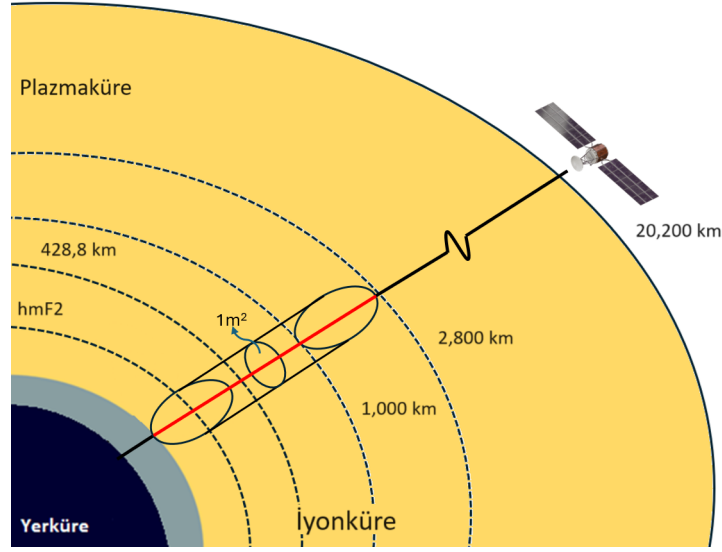
Uydu-yeryüzü ve uydu-uydu haberleşmeleri için iyonküredeki dalga yayılımı ve saçılımının incelenmesi gerekmektedir. İyonküreden geçen işaretler üzerinde oluşan gecikmelerin giderilmesi seyrüsefer sistemlerinde oluşan konumlama hatalarının indirgenmesi için büyük

önem taşımaktadır. İyonküre içerdiği elektron yoğunluğu sayesinde KD bandında elektromanyetik dalgaları yansıtarak uzak mesafe haberleşmesine imkan sağlamaktadır. Bu nedenle elektron yoğunluğunun uzay ve zamanda yeniden yapılandırması, iyonkürenin fiziksel yapısının anlaşılması ve iyonküreden geçen işaretler üzerindeki etkisinin incelenmesi için önem taşımaktadır. İyonküre elektron yoğunluğunun doğrudan ölçümü mümkün olmadığından, kestirimi için çeşitli ölçüm ve hesaplama yöntemleri kullanılmaktadır. İyonküre elektron yoğunluğu dağılımını belirlemek amacıyla farklı geriçatma yöntemleri ile uydu, ionosonda ve evre-uyumsuz radar verileri birlikte kullanılmaktadır [7].

Yörünge yüksekliği yaklaşık 20,000 km'de bulunan Global Navigation Satellite Systems (GNSS) uydularından biri olan Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS) uyduları, iyonküre gözlemlenirken kullanılan önemli ve düşük maliyetli araçlardır. Toplam Elektron İçeriği (TEİ), 1 m² kare kesit alanına sahip silindir içerisindeki toplam serbest elektron sayısına karşılık gelen bir yol üzerindeki elektron yoğunluğunun çizgi integralidir. TEİ birimi TECU'dur ve 1 TECU = 10¹⁶ el/m²'dir. TEİ değerlendirmeleri yerel baş ucu açısı ile hizalandırılarak dikey olarak incelendiğinde Dikey TEİ (DTEİ) olarak tanımlanmaktadır. TEİ, baş ucu açısından sapan eğik yollar boyunca değerlendirildiğinde Eğik TEİ (ETEİ) olarak ifade edilmektedir. ETEİ verileri iyonküre hakkında değerli bir bilgi kaynağıdır. Ancak bu veriler iyonküre elektron yoğunluğu dağılımı hakkında uzamsal bir bilgi içermemektedir. ETEİ verileri ile gelişmiş tomografi yöntemleri birlikte kullanılarak iyonküre elektron yoğunluğu geriçatımı gerçekleştirilmektedir.

Yörünge yüksekliği 2,000 km'ye kadar olan uydular, Alçak Yeryüzü Yörünge (AYY) uydusu olarak tanımlanmaktadır. AYY uyduları üzerinde YYS işaretlerini takip edebilen YYS alıcıları bulunmaktadır. Radyo Örtülme (RO), havaküre tabakalarının yapılarının incelenmesi sırasında AYY uyduları tarafından algılanan YYS ölçümlerini kullanan uzaktan algılama tekniğidir. YYS-AYY verisi kullanılarak troposferin orta ve düşük seviyelerindeki su basıncı profilleri, stratosfer ve yüksek troposferdeki sıcaklık ve basınç değerleri incelenmekte ve iyonkürenin farklı katmanlarına ait bilgiler elde edilmektedir [8]. İyonküre gözlemlenirken kullanılan ve GPS alıcısı taşıyan AYY uydularına örnek olarak GPS/MET, CHAMP, GRACE, FORMOSAT-3/COSMIC verilebilmektedir. AYY uyduları üzerinde bulunan GPS alıcıları tarafından her gün iyonküreye ait binlerce ölçüm toplanmaktadır [9–12].

Bilgisayarlı İyonküre Tomografisi (BİT), iyonküre elektron yoğunluğu kestirimi için YYS



Şekil 1.3: ETEİ Gösterimi.

uydu ve alıcılarına ait kayıtlar ile hesaplanan ETEİ verilerini ve yeniden yapılandırma algoritmalarını kullanan bir uzaktan algılama yöntemidir. İyonküre tomografisi ilk kez [13] tarafından Donanma Seyrüsefer Uydu Sistemi verisi kullanılarak gerçekleştirilmiş, çalışmasında elde ettiği geriçatma sonuçlarını Evreyuysuz Geri Saçılım radar verisi ile karşılaştırılarak tomografi sonuçlarını doğrulamaya çalışmıştır. YKS verileri ile BİT ilk kez [14] tarafından gerçekleştirilmiştir. İyonküre tomografisi ilk olarak 2-B uygulanmış, kolay uygulanabilirliği ve düşük bellek gereksinimi nedeniyle yinelemeli yöntemler tercih edilmiştir. Cebirsel Geriçatma Tekniği (CGT), kullanılan ilk yinelemeli yöntemlerden biridir ve Enaz Kareler yöntemine yakınsamaktadır [13]. Diğer bir yinelemeli algoritma olan ve [15, 16]'da iyonküre tomografisine tanıtılan Çarpımsal Cebirsel Geriçatma Tekniği (ÇCGT), CGT yöntemine göre daha hızlı yakınsama sağlamaktadır. Yinelemeli algoritmalarda yeniden yapılandırma sonuçlarının doğruluğu başlangıç tahminin doğruluğuna bağlıdır. CGT'ye yapılan en önemli katkılardan biri [17]'de Toplam Enaz Kareler ile elde edilen kestirim sonuçlarının hibrit algoritmada, Hibrit Cebirsel Geriçatma Tekniği (HCGT), ilk tahmin olarak kullanılması ile sağlanmıştır. Ancak yinelemeli yöntemlerin gürültülü veride gürültü seviyesine duyarlılığı, yakınsamanın yavaş gerçekleşmesi, dikey elektron yoğunluğu gradyanlarının gaz ardı edilmesi nedeniyle ve yeryüzü üzerindeki GPS alıcı istasyonlarının sayısının artması ile daha karmaşık 3-B tomografi yöntemleri geliştirilmiştir [18–21].

3-B iyonküre tomografisinin doğruluğu büyük ölçüde YKS-ETEİ ölçümlerinin sayısına ve

dağılımına bağlıdır. YKS alıcı istasyonlarının seyrek ve düzensiz olduğu bölgelerde YKS-ETEİ verilerinin yetersiz olması nedeniyle iyonküre tomografisi, kötü koşullandırılmış geriçatma problemine dönüşmektedir [22, 23]. Sadece yeryüzü tabanlı alıcıların kullanılması durumunda iyonkürede yatay yollara ait bilgi içermemekte, sınırlı çözünürlüğe sahip veri setleri oluşturulmaktadır. Yeryüzü alıcılarının konumlarına bağlı olarak bölgeler için veri sayısı değişiklik göstermekte, bazı bölgelerde veri elde edilememektedir. YKS uydularının hızları nedeniyle kısa zamanlı gözlem aralıklarında taranan açılar, iyonküreye ait ön bilgi olmaksızın elektron yoğunluğu yeniden yapılandırması için yeterli olmamaktadır. RO verilerinin eklenmesi, özellikle iyonkürenin üst katmanlarında dikey çözünürlüğü arttırmakta ve kapsanan bölgeyi genişleterek yeryüzü tabanlı ölçümleri tamamlamaktadır.

Literatürde veri seyrekliğinden kaynaklanan sorunların önüne geçmek için yapılan çalışmalarda iyonküre elektron yoğunluğu fonksiyon tabanlı yöntemlerle ifade edilmiş ve geriçatma probleminin çözümü dikgen taban fonksiyonlarının katsayı kestirimine dönüştürülerek problem önceden belirlenmiş problem uzayına sınırlandırılmıştır. Ampirik Dikgen Fonksiyonlar (ADF), iyonküre elektron yoğunluğunu tanımlamak için kullanılan dikgen taban fonksiyonlarıdır ve iyonküreye ait ön bilgi içeren veri setlerinden hesaplanmaktadır. Literatürde birçok fonksiyon tabanlı tomografi yöntemi modeli dikey olarak kısıtlamak için ADF kullanılmaktadır [24–27].

[17] çalışmasında yükseklik ve enleme bağlı 2-B iyonküre tomografisi sırasında enlemde Legendre Çokterimlileri ve Haar Dalgacıkları ile yükseklikte ADF kullanarak geriçatma gerçekleştirmiştir. [28] çalışmasında küresel elektron yoğunluğu geriçatması için enlem ve boylamda Küresel Harmonik (KH) fonksiyonları ile, dikeyde ADF kullanarak tomografi yapmıştır. KH fonksiyonları küresel tomografide kullanılabilmekte, ancak dikgen olma gereğini sağlamadıkları için bölgesel elektron yoğunluğu tomografisi için kullanılamamaktadır. Bu sınırlamanın önüne geçebilmek için [29], enlem ve boylamda Küresel Başlık Harmonikleri (KBH) kullanarak bölgesel tomografi gerçekleştirmiştir. Dikeyde ADF'ler kullanılarak bu yöntem Kutup bölgesinde uygulanmıştır. [30] çalışmasında enlem ve boylamda iyonküreyi 2-B Haar Dalgacık fonksiyonları ile ifade etmiş ve dikeyde ADF kullanarak İran üzerindeki iyonküre için elektron yoğunluğu yeniden yapılandırması yapmıştır. [31] çalışmasında tensör çarpım teknikleri ile birlikte yatayda Öklid Karesel B-spline taban fonksiyonlarını kullanmış, ancak sonuçlarını ölçüm verisi ile doğrulamamış sadece Güney Afrika bölgesi

için simülasyon sonuçlarını paylaşmıştır. [32] çalışmasında düzensiz sınır şekillerine sahip bölgelerde enlem ve boylamda iyonküreyi Slepian fonksiyonları ile ifade ederek geriçatma problemini çözmeyi hedeflemiş ve Afrika bölgesi için elektron yoğunluğu yeniden yapılandırması yapmıştır.

KBH, Haar Dalgacıkları, B-Spline ve Slepian fonksiyonları kullanılarak elektron yoğunluğu yeniden yapılandırması sırasında sınırları geniş alanlarda gereken uzamsal çözünürlüğü sağlamak için kestirilmesi gereken katsayı sayısı büyük değerler almaktadır. Bu da bellek kullanımını ve hesaplama maliyetlerini arttırmakta, özellikle YKS istasyonlarının seyrek olduğu bölgelerde geriçatım probleminin çözülmesini zorlaştırmaktadır. Ayrıca literatürde verilen bu yöntemlerde, model matrisin nasıl oluşturulduğu ve örnekleme matrisi oluşturulurken YKS uyduları ve alıcılar arasındaki ışınların izlediği yol uzunluklarının nasıl hesaplandığı bilgisi yer almamaktadır.

IONOLAB-CIT, orta enlem iyonküresi için yinelemeli en iyileme algoritmaları ile iyonküre modelinden hesaplanan sentetik ETEİ verileri ve alıcı kayıtları kullanılarak kestirilen YKS-ETEİ verilerini karşılaştırarak F2 katman kritik frekansı, foF2, ve en çok iyonlaşmanın olduğu yükseklik, hmF2 parametrelerini güncellemekte ve iyonküre modelinde oluşan sapmaları izleyerek bölgesel 4-B iyonküre elektron yoğunluğu dağılımı elde etmektedir [33]. Çalışmada Türkiye üzerindeki iyonküre modelini ifade etmek için doğrusal yüzey yönseme fonksiyonu kullanılmış ve 6 adet yüzey yönseme parametresi için sayısal en iyileme modelleri ile optimize edilmiştir. [34] çalışmasında, IONOLAB-CIT ile kestirilen yüzey yönseme katsayılarının belirli bir zaman çerçevesi içerisinde birbirleri ile ilintili olduğu belirlenmiş ve katsayıların zaman içerisinde takip edilmesi için Kalman süzgeci uygulanmıştır. Kalman süzgeci ile elde edilen yüzey yönseme katsayıları kullanılarak hesaplanan elektron yoğunluğunun, verinin az ve gürültülü olduğu günlerde daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Böylece Kalman süzgeci ile katsayı takibi yapılarak daha gürbüz bir tomografi yöntemi elde edilmiştir. IONOLAB-CIT, orta enlem iyonküresi için elektron yoğunluğu yeniden yapılandırmasında çok iyi başarımlar sergilemektedir. IONOLAB-CIT ile orta enlem iyonküresi için en iyi elektron yoğunluğu profilleri hesaplanmaktadır, ancak ekvator ve kutup bölgeleri için karesel veya Gauss benzeri yönseme fonksiyonlarının kullanılması gerekmektedir [35].

Tekil Değer Ayırışımı (TDA) bir matrisin üç ayrı matrise ayrışmasını sağlayan önemli bir doğrusal cebir yöntemidir [36]. Bu matrisler taban vektörlerini içeren sol ve sağ tekil mat-

risleri ile köşegen tekil değer matrisidir. Bu ayrışma ana matris bilgilerinin korunarak daha küçük boyutlarda temsil edilmesini sağlamaktadır. TDA ile ilk kez [37]'de iyonküre modeli tabanlı sentetik ETEİ verileri ile küresel iyonküre elektron yoğunluğu tomografisi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada sentetik ETEİ verileri kullanılarak, sadece dört taban fonksiyonu ile küresel iyonküre elektron yoğunluğu yeniden yapılandırması yapılmıştır. Çok daha küçük bölgeler için KBH ile 48 [29], Haar Dalgacıkları ile 64 [30], B-Spline fonksiyonları ile 5832 [31] ve Slepian fonksiyonları ile 63 [32] katsayı ile elektron yoğunluğu geriçatımı gerçekleştirilebilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, 4-B iyonküre elektron yoğunluğu geriçatımı için TDA tabanlı, kapalı formda bir BİT algoritması olan IONOLAB-Fusion geliştirilmiştir. Tomografi sırasında kullanılacak olan ve iyonküreye ait ön bilgi içeren model matris farklı yöntemlerle oluşturularak eniyilenmiştir. Model matris oluşturulurken arka plan iyonküresi, IONOLAB-RAY algoritması temel alınarak geliştirilen IONOLAB-mRAY algoritması kullanılarak oluşturulmuştur. IONOLAB-mRAY ile arka plan iyonküresi oluşturulurken iyonkürenin değişken yapısının modellenmesi için, iyonküre enlem, boylam ve yükseklikte 3-B küresel hücrelere bölünmektedir. 3-B küresel hücreler zamanda leksikografiksel olarak sıralanarak 4-B iyonküre, 1-B vektör ile ifade edilmektedir. IONOLAB-mRAY algoritması, iyonküre parametrelerini IRI-Plas iyonküre modelini kullanarak hesaplamaktadır. IRI-Plas iyonküre modeline yüksek çözünürlüklü TEİ ve foF2 haritaları girdi olarak verilerek kullanılacak veri seti eniyilenmiştir. IONOLAB-Fusion algoritması ile örnekleme matrisi, hem YKS uyduları ile yeryüzü alıcı istasyonlarını hem de YKS uyduları ile AYY uyduları üzerinde bulunan alıcılar arasındaki ışınları kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Geriçatım yapılan bölge için algoritmada kullanılacak yeryüzü alıcı istasyon seçimi belirlenmiş ve yeryüzü alıcı istasyon bulunmayan veya seyrek olan bölgeler için sanal istasyon ekleme rutini geliştirilmiştir. Tomografi sırasında kullanılan YKS uydu sayısının sonuçlara etkisi incelenerek eniyilenmiştir. Tomografide dikey çözünürlüğün artırılması için AYY-YKS uyduları arasındaki ışınlar iyonküre uzay-zaman Geniş Anlamda Durağanlık (GAD) süresi boyunca izlenmiştir. AYY-YKS uyduları arasındaki ışınların aynı hücrelerden geçmemesinin sağlanması için iyonküre GAD süresi boyunca en uygun zaman çözünürlüğü hesaplanmıştır. Geliştirilen IONOLAB-mRAY algoritması kullanılarak YKS uydu ve alıcı çiftleri arasındaki dikey ve yatay yollar izlenmiş ve örnekleme matrisi oluşturulmuştur. Ölçüm vektörü oluşturulurken YKS uydu ve yeryüzü alıcı çiftleri arasındaki ETEİ değerleri alıcı kayıtlarından, YKS uyduları ve AYY uyduları ile

sanal alıcılar arasındaki ETEİ değerleris, geliştirilen iyonküre model tabanlı ETEİ hesaplama algoritması IRI-Plas-mSTEC kullanılarak hesaplanmıştır. Geriçatma sonuçları literatürde yer alan diğer fonksiyon tabanlı yöntemler ile karşılaştırılmıştır.

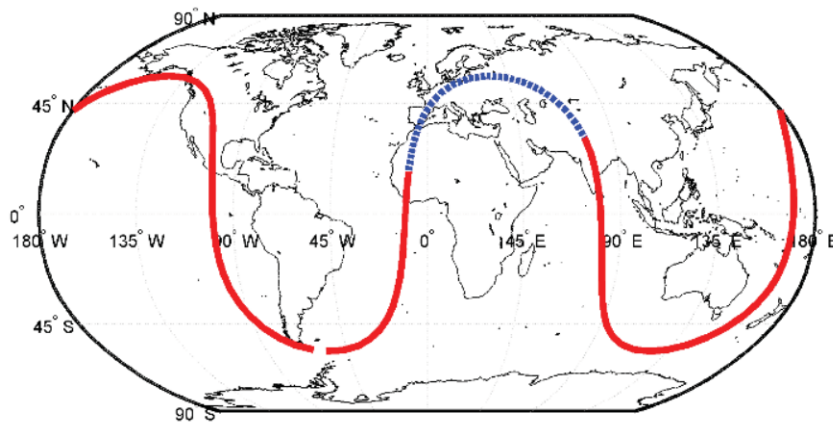
Bu tezde, gerçekleştirilen çalışma kapsamında geliştirilen IONOLAB-Fusion algoritmasının tasarım detayları, özellikleri, sunduğu yenilikler ve faydalar ile geliştirilebilecek yönleri yer almaktadır. Bölüm 2’de iyonküreyi incelemek için kullanılan iyonküre ölçümleri detaylandırılmıştır. Bölüm 3’de literatürde yer alan fonksiyon tabanlı yöntemler anlatılmıştır. Bölüm 4’de 4-B iyonküre elektron yoğunluğu tomografisi için geliştirilen IONOLAB-Fusion yöntemi anlatılmıştır. Bölüm 5’te IONOLAB-Fusion algoritması içerisinde iyonküre tomografisinde kullanılmak üzere geliştirilen IONOLAB-mRAY ve IRI-Plas-mSTEC algoritmaları sunulmuştur. Bölüm 6’de bu tez çalışması kapsamında yapılan analizeler ve sonuçları paylaşılmıştır. Bölüm 7’de elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve gelecek çalışmalara yer verilmiştir.

2. İYONKÜRE ÖLÇÜMLERİ

İyonküre yön bağımlı, dağınık ve düzgün dağılmayan yapısı nedeniyle elektromanyetik dalgaların yayılımını etkileyen önemli bir havaküre katmanıdır. İyonosondalar ve Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS) alıcı istasyonları gibi yer tabanlı sistemlere ait ölçümler bölgesel iyonküre parametreleri hakkında veriler sağlamaktadır. Uydu tabanlı sistemler ise iyonküreye ait daha geniş ve kapsamlı bir ölçüm sunarak küresel örüntüleri yakalamaktadır. İyonküre çalışmalarında araştırmacılar, havakürenin bu dinamik bölgesi hakkında kapsamlı bir veri seti hazırlamak amacıyla uydu tabanlı ve yer tabanlı yöntemlerin bir kombinasyonunu iyonküre modelleri ile birlikte kullanmaktadır.

2.1 Uydu Tabanlı Yöntemler

Global Navigation Satellite Systems (GNSS) biri olan Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS), bir YKS alıcısının üçgenleme yöntemi ile konumunun belirlenmesini sağlayan tek yönlü uydu tabanlı bir seyrüsefer konumlandırma sistemidir ve 1995 yılından beri işlevini yürütmektedir. YKS uyduları yeryüzünden yaklaşık 20,000 km yükseklikte konumlandırılmışlardır ve uyduların izlediği altı adet yörünge düzlemi bulunmaktadır. YKS uyduları bir gün içerisinde yerküreyi iki kez çevrelemekte ve aynı noktaların üzerinden bir önceki güne göre dört dakika daha erken geçmektedir. Şekil 2.1’de PRN 13 YKS uydusuna ait uydu yolu örnek olarak verilmiştir.



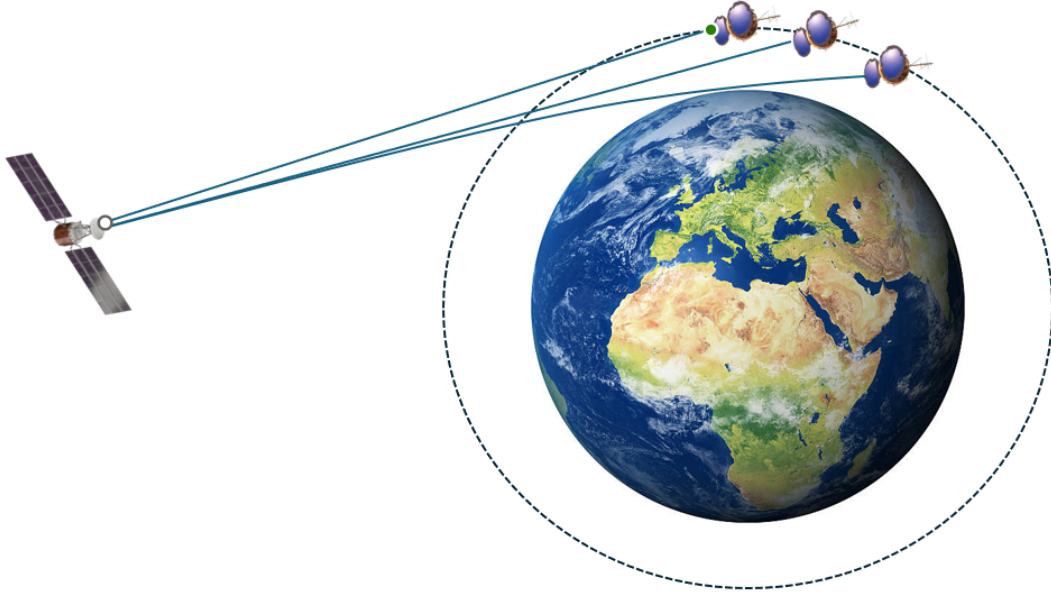
Şekil 2.1: PRN 13 uydusunun izlediği uydu yolu (kırmızı) ve Avrupa bölgesinden 40°’den büyük yükseliş açısı ile görüldüğü aralık (kesikli mavi).

International GNSS Service (IGS), küresel olarak yerleştirilmiş sabit YKS alıcı istasyon ağ-

larından edilen ve farklı organizasyonlar tarafından yürütülen küresel bir işbirliği çalışmasıdır. Bu YKS alıcı ağlarına, Avrupa ve komşu bölgelerine dağılmış 500'den fazla sürekli çalışan çift frekanslı YKS alıcı istasyonlarına sahip European Reference Frame (EUREF) ve Türkiye ve KKTC üzerine düzgün dağılmış, sürekli çalışan, çift frekanslı YKS alıcı istasyonundan oluşan Türkiye Ulusal Sabit Ağı (TUSAGA) - Aktif örnek olarak gösterilebilmektedir. YKS uydularından yeryüzü alıcı istasyonlarına gönderilen L1 ve L2 frekanslı sinyaller zamanda gecikmeye ve faz kaymasına uğramaktadır. Bu parametreler alıcı istasyon kayıtlarında zamanda 30 saniye çözünürlük ile Receiver Independent Exchange Format (RINEX) formatında kaydedilmektedir. Toplam Elektron İçeriği (TEİ) kestirimi yapılırken yaygın kullanımı, düşük maliyeti ve kesintisiz çalışması nedeniyle çift frekanslı YKS alıcı kayıtları iyonküre incelenirken kullanılan en önemli araçlardan biridir [38, 39]. TEİ kestirimleri, sürekli çalışan sabit YKS alıcı istasyon ağlarına ait kayıtlar ile zamanda yüksek çözünürlük ile elde edilebilmektedir. TEİ verilerinin uzayda çözünürlüğü ilgilenilen bölgede bulunan istasyon sayısına bağlı olarak değişmektedir. Sözde menzil ile kestirilen ETEİ verilerinde gürültü ve çok-yol etkisi oluşabilmektedir. Faz kayması ölçümleri ile gerçekleştirilen ETEİ verilerinde ise ilk faz belirsizliği ve faz kopmaları nedeniyle seviye hataları oluşmaktadır. Faz kopmasının gerçekleşmediği bir zaman diliminde geometriden bağımsız doğrusal sözde menzil birleşimi ve faz birleşimi değerleri arasındaki fark hesaplanarak dayanak değer olarak tanımlanmaktadır. Dayanak değer ile faz ölçümleri, sözde menzil seviyesine getirilerek faz belirsizliği giderilmektedir [40–44].

IONOLAB-TEC, Düzgünleştirilmiş TEİ (D-TEİ) algoritması ile yerel başucu açısına göre 10°'den büyük açılarla geçen uydular için kaydedilen alıcı kayıtlarından hesaplanan dayanak değerlerini kullanarak TEİ kestirimi yapan yöntemdir [40–43, 45, 46]. IONOLAB-TEC ile TEİ kestirimi yapılırken, IONOLAB-STEÇ algoritması ile elde edilen ETEİ temel alınmaktadır. IONOLAB-STEÇ yönteminde diferansiyel uydu yanlılığı, Ionosphere Map Exchange (IONEX) dosyalarında yer alan CODE merkezine ait uydu yanlılık değerleri kullanılmaktadır [47]. IONOLAB grubu tarafından geliştirilen IONOLAB-BIAS yöntemi ile kestirilen uydu yanlılığı değerleri, diferansiyel alıcı yanlılığı olarak kullanılmaktadır [43, 48]. IONOLAB-BIAS yöntemi, farklı bölgeler, iyonküre koşulları ve zaman çözünürlükleri için diferansiyel alıcı yanlılık değerlerini doğru, güvenilir ve gürbüz bir şekilde kestiren bir yöntemdir. IONOLAB-STEÇ'e www.ionolab.org üzerinden çevrimiçi bir uzay-hava uygulaması olarak erişilebilmektedir.

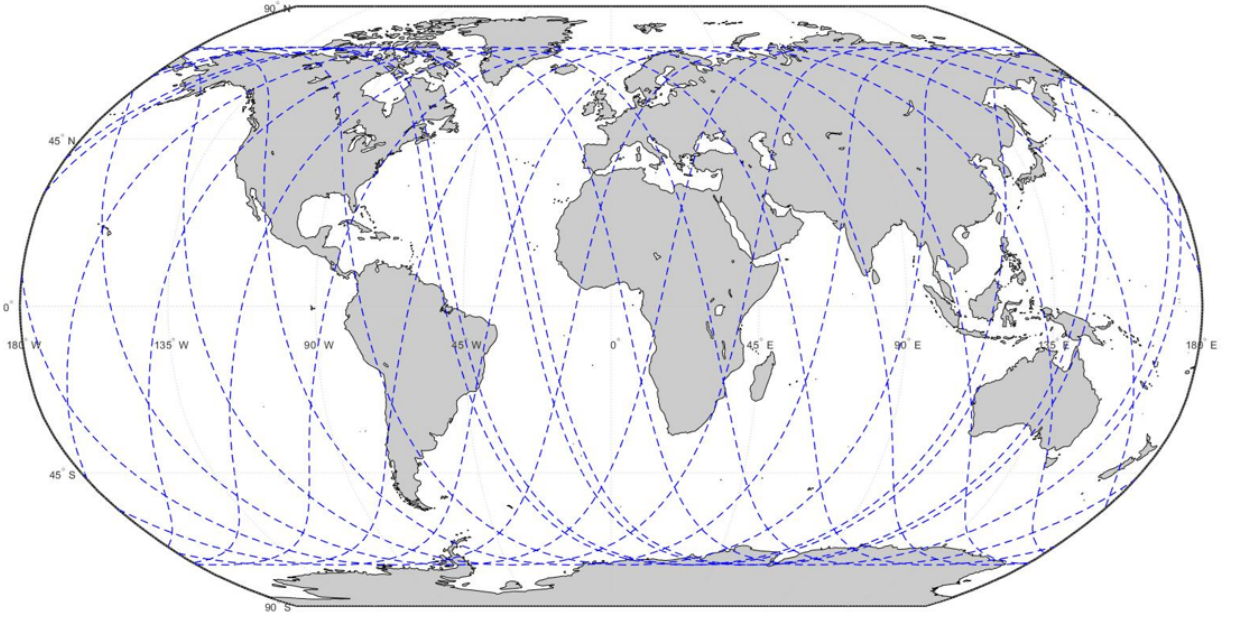
YKS uyduları ile yeryüzü alıcı istasyonları arasındaki ölçümler yüksek yatay çözünürlüğe sahiptir. Yeryüzü alıcıları tarafından başucu açısına göre 10° 'den küçük yükseliş açıları ile görülen YYS uyduları ile aralarındaki sinyallerin kullanımı dikey çözünürlüğü arttırmakta, ancak çoklu yol etkisi ve yakın alandaki nesnelerden kaynaklanan saçılmalar nedeniyle oluşan ek gürültüden dolayı kullanılması tercih edilmemektedir. Alçak Yerküre Yörünge (AYY) uyduları ile YYS uyduları arasındaki sinyallerin izlediği yollar yüksek dikey çözünürlüğe sahiptir.



Şekil 2.2: YYS uydusu ile AYY uyduları arasındaki ışınların gösterimi.

Radio Örtülme (RO), havaküreye ait katmanların yapılarının incelenmesinde AYY uyduları üzerindeki YYS alıcılarını kullanan uzaktan algılama yöntemidir. AYY uyduları yaklaşık 90 dakikalık yörünge periyoduna sahiptir. COSMIC-1'e ait AYY-1 uydusunun bir gün içerisinde takip ettiği uydu yolları Şekil 2.3'de verilmiştir.

AYY uyduları hareket ederken görüş hattı içerisindeki farklı YYS uyduları ile arasındaki sinyaller iyonkürenin farklı yüksekliklerinden geçmekte ve farklı iyonküre katmanlarına dair bilgi içermektedir. İyonküre gözlemlenirken kullanılan YYS alıcılarını içeren AYY görevlerine örnek olarak GPS/MET (GPS/Meteorology), CHAMP (Challenging Mini Satellite Payload), GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) ve FORMOSAT-3/COSMIC (Formosat Satellite 3/ Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate) olarak verilebilmektedir [9–12]. GPS/MET deneyi, havaküre çalışmaları için RO uygulanabilirliğini gösteren ilk deneylerden biridir [9]. CHAMP görevi, 2000-2010 yılları ara-



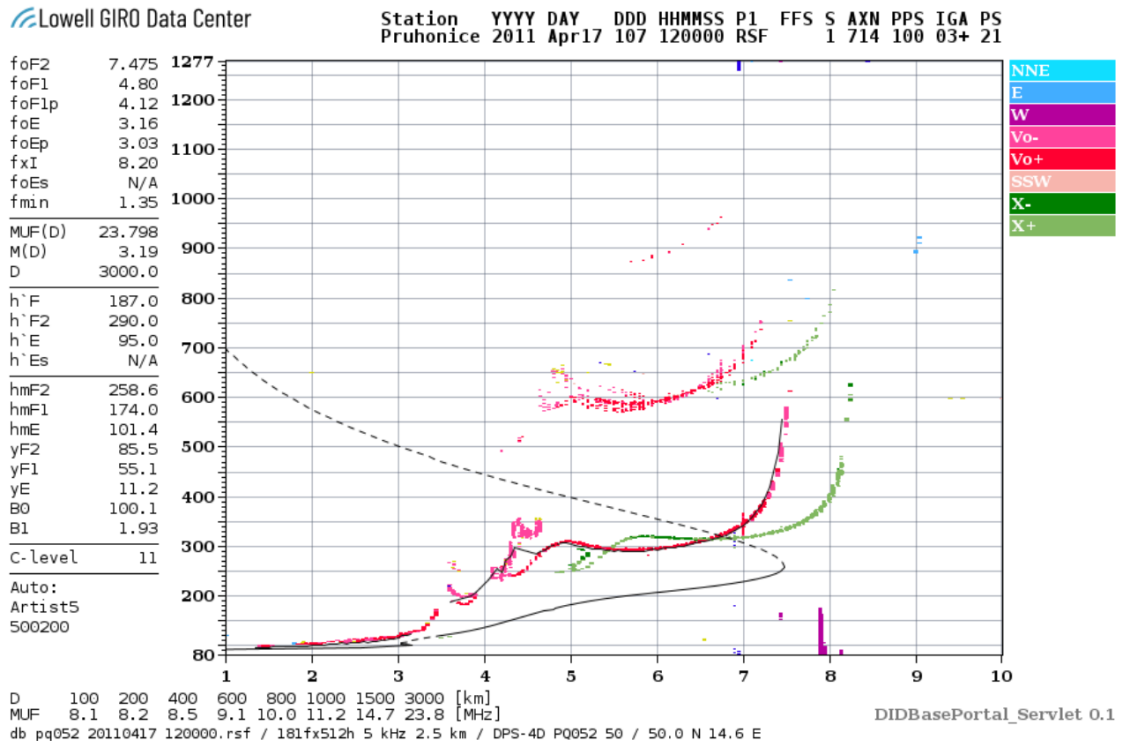
Şekil 2.3: COSMIC-1 AYY uydusunun izlediği uydu yolu.

sında tropoküre ve iyonküre incelemelerinde kullanılmıştır [10]. Yerküre yerçekim alanının incelenmesi için kullanılan GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) görevi RO verileri ile 2009 yılına kadar iyonküre araştırmalarına katkıda bulunmuştur [11]. Son olarak altı AYY uydusundan oluşan FORMOSAT-3/COSMIC (Formosat Satellite 3/ Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate) görevi altı AYY uydusundan oluşmakta, iyonküre dinamiklerini incelemek ve iyonküreye ait parametrelerin kestirimlerini gerçekleştirmek için kapsamlı ve sürekli küresel iyonküre verileri sunmaktadır [12].

2.2 Yeryüzü Tabanlı Yöntemler

İyonosondalar, iyonküreyi incelemek için geliştirilen araçlardır. Bir radara benzer şekilde, iyonküreye KD frekans bandında (1-20 MHz) darbeler göndererek geri dönen darbelerin yol alma sürelerini kullanmakta ve iyonküredeki elektron dağılımını hesaplamaktadır. İyonküredeki kırılma indisi nedeniyle elektromanyetik dalgaların yayılma hızı ve yansıma yüksekliği frekansa ve elektron yoğunluğu profiline bağlı değişmektedir. Bu nedenle, ışığın serbest uzaydaki yayılma hızı varsayımı altında elde edilen bir katmanın görünür yüksekliği veya sanal yüksekliği, katmanların gerçek yüksekliğine karşılık gelmemektedir. Sanal yüksekliğin iletilen frekansa göre grafiği iyononogram olarak tanımlanmaktadır. Elektron yoğunluğunun gerçek yüksekliğe göre yeniden yapılandırılması ve katmanın kritik parametrelerinin tahmin

edilmesi işlemi, ionogram ölçekleme veya gerçek yükseklik analizi olarak ifade edilmektedir [49]. Literatürde ionogram ölçekleme için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. F2 katmanına kadar geri yansıyan darbeler kullanılarak geriçatma algoritmaları ile dikey elektron yoğunluğu profilleri hesaplanmakta, ionkürenin daha yüksek katmanlarında elektron yoğunluğu profilleri model tabanlı yöntemler ile temsil edilmektedir. Günümüzde en yaygın kullanılan otomatik yöntem Automatic Real Time Ionogram Scaler with True Height (ARTIST) olarak belirlenmiştir [50]. Pruhonice’de bulunan PQ052 ionosondası için 17 Nisan 2011, saat 12:00 GS’de elde edilen örnek ionogram Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 2.4: PQ052 ionosondası için 17 Nisan 2011, 12:00 GS tarihli ionogram ve dikey elektron yoğunluğu profili.

Dijital tasarım, kontrol ve sinyal işleme işlevlerine sahip ionosondalar, digisonde olarak adlandırılmaktadır. YKS alıcı istasyonlarına göre daha yüksek maliyetli sistemler olan ionosondalardan yerküre üzerinde yaklaşık 100 adet bulunmaktadır. Bu nedenle ionosonda ölçümleri ionküre elektron yoğunluğunun incelenmesinde kullanılması için yeterli uzamsal çözünürlüğe sahip değildir. İyonosondaların zamanda çözünürlüğü ise en fazla 15 dakika olarak belirlenmiştir. İyonosonda ölçümleri SAO uzantılı dosyalara kaydedilmekte ve çevrimiçi uygulama olan SAO Explorer kullanılarak elde edilmektedir.

2.3 İyonküre Modelleri

İyonküre modelleri, iyonkürenin yapısını anlamak ve kestirmek için kullanılan önemli yöntemlerdir. Bu modeller, yer tabanlı gözlemler ve uydu ölçümleri gibi çeşitli kaynaklardan elde edilen iklimsel, ampirik ve deterministik verilerin birlikte kullanılması ile oluşturulmaktadır. İyonkürenin değişken yapısının temsil edilmesi amacıyla oluşturulan uzun süreli veri setleri, matematiksel yaklaşımlar kullanılarak incelenmektedir. Bu modeller iyonkürenin değişim örüntüsünü etkili bir şekilde takip edecek şekilde geliştirilmekte ve elektron ile iyonların oluşumu, yeniden birleşmesi ve iletimi işlevlerini matematiksel olarak temsil etmektedir. Ampirik iyonküre modelleri, uzun süreli veri setlerinin analizleri sonucu elde edilen iyonküre parametrelerinin mevsimlik, aylık ve saatlik ortalama değerleri kullanılarak oluşturulmaktadır.

International Reference Ionosphere (IRI), Committee on Space Research (COSPAR) ve International Union of Radio Science (URSI) tarafından yürütülen ve iyonkürenin kapsamlı bir ampirik modelini oluşturmayı amaçlayan önemli bir işbirliği çalışmasıdır [51]. Bu modele, 1969 yılındaki başlangıcından günümüze kadar çok sayıda iyileştirme yapılmıştır. IRI modeli ile elektron yoğunluğu, elektron sıcaklığı, iyon sıcaklığı, iyon bileşimi, katman parametreleri ve 80 ile 2,000 km yükseklikleri arasındaki TEİ ile elektron yoğunluğu profilleri gibi çeşitli iyonküre parametreleri hakkında bilgiler elde edilmektedir [52]. IRI modeli, orta enlem bölgesinde bulunan iyonosondalara ait uzun süreli ölçümlerin kullanılması ile oluşturulmuştur. İyonkürenin anlık olarak temsili için modele Güneş akısı (F10.7), jeomanyetik indisi (Ap) ve katman parametreleri girdi olarak verilebilmektedir [53].

IRI Extended to Plasmasphere (IRI-Plas) modeli, özellikle plazmakürenin modellenmesine odaklanan IRI modelinin önemli bir geliştirmesi olarak ortaya çıkmaktadır [54–56]. IRI-Plas modeli ile IRI modeli 2,000 km'den YKS uydularının yörünge yüksekliği olan 20,000 km'ye kadar genişletilmektedir. Bu gelişmiş model iyonküre durumunu güncellemek için TEİ verilerini girdi olarak kullanabilmektedir [57, 58]. Ayrıca IRI-Plas modeline, modelin çeşitli Güneş koşulları için doğruluğunu arttıran dokuz adet Güneş indisi girdi olarak verilebilmektedir [59, 60]. IRI-Plas modeli IONOLAB grubu araştırmalarında, KD haberleşme, KD ışın izleme, Bilgisayarlı İyonküre Tomografisi (BİT), 1-B ve 2-B iyonküre görüntüleme algoritmalarının geliştirilmesinde etkili bir şekilde kullanılmaktadır [33–35, 37, 61–67]. IRI-Plas modeli için www.ionolab.org adresinde, kullanıcı dostu bir arayüz sunan çevrimiçi uzay

hava durumu hizmeti entegre edilmiş, böylece geniş kapsamlı çalışmalar için erişebilirliği ve kullanılabilirliği kolaylaştırılmıştır [68]. 2014 yılında IRI ve dolayısıyla IRI-Plas, ISO (SO 16457:2014) tarafından tanınarak modellerin iyonküre araştırmalarındaki öneminin ve faydasının altı çizilmiştir [69].

Ekvator ve kutup bölgeleri için model çıktıları, iklimsel, ampirik ve deterministik IRI ve IRI-Plas modellerinin matematiksel yaklaşımlarının orta enlem iyonosondalarına ait veriler kullanılarak yapılması nedeniyle anlık iyonküreden farklılık göstermektedir. Ayrıca modeller, hesaplama katsayılarının ve veri setlerinin aylık ve saatlik ortalama değerlerinden hesaplanması nedeniyle iyonküredeki Güneş ve sismik hareketlilikler ile yerkürenin yerçekimine bağlı kısa süreli ve ani bozulmaları takip edememektedir.

Uydu tabanlı ve yer tabanlı sistemler ile iyonküre modelleri Bilgisayarlı İyonküre Tomografisi (BİT) ile iyonküre elektron yoğunluğu geriçatımında ön bilgi ve ölçüm verisi olarak birlikte kullanılmaktadır. Bölüm 3'te fonksiyon tabanlı BİT yöntemi anlatılarak literatürde yer alan çalışmalar detaylandırılmıştır.

3. BİLGİSAYARLI İYONKÜRE TOMOGRAFİ YÖNTEMLERİ

İyonküre yapısı nedeniyle elektromanyetik dalganın yayılabileceği en karmaşık ortamlardan biridir. İyonkürenin sinyaller üzerindeki etkisinin nedeni kırılma indisidir ve kırılma indisinin en önemli değişkeni elektron yoğunluğudur. Bu nedenle iyonküre elektron yoğunluğunun yeniden yapılandırması iyonkürenin fiziksel yapısının incelenmesi için çok önemlidir. İyonküre elektron yoğunluğu uzay ve zamana bağlı bir fonksiyondur. r yükseklik, θ enlem, ϕ boylamında ve t anında $e(r, \theta, \phi; t)$ ile ifade edilebilmektedir.

İyonküre elektron yoğunluğunun doğrudan ölçümü mümkün olmadığından, kestirimi için çeşitli ölçüm ve hesaplama yöntemleri kullanılmaktadır. Bilgisayarlı İyonküre Tomografisi (BİT), ilgilenilen iyonküre bölgesinde uydu ve alıcı çiftleri arasındaki farklı yollar boyunca hesaplanan çizgi integral ölçümleri ve yeniden yapılandırma algoritmaları kullanılarak geriçatma probleminin çözülmesi ile elektron yoğunluğu kestiren bir yöntemdir [70]. Eğik Toplam Elektron İçeriği (ETEİ), Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS) uyduları ve alıcı istasyonlar arasındaki elektron yoğunluğunun çizgi integralidir. YKS alıcı istasyonlarının görüş açısına aynı anda birden fazla uydu girebilmektedir. Seçilen bir bölge için YKS alıcı istasyon sayısı $1 \leq n_u \leq N_u$ olarak sınırlandırılmıştır. n_t anı için seçilen bölge içerisindeki alıcı istasyonların görüş açısına giren uydu sayısı n_m ile ifade edilmektedir ve $1 \leq n_m \leq N_m$ olarak sınırlandırılmıştır. n_t anındaki YKS alıcı istasyonları ve uydu çiftleri sıralaması Eşitlik 3.1 ile tanımlanmıştır.

$$n_p(n_t) = n_u + (n_m - 1)N_u \quad (3.1)$$

n_p , $1 \leq n_p \leq N_p$ arasında değerler almaktadır. $N_p = N_u N_m$ ile hesaplanmaktadır. m uydusu ve u alıcısı arasındaki ETEİ ile elektron yoğunluğu arasındaki ilişki Eşitlik 3.2 ile tanımlanmıştır. Eşitlik 3.2’de elektron yoğunluğu kartezyen koordinatlarda verilmiştir.

$$y_{d,h}(n_p(n_t)) = \int_0^1 e_{d,h}(x_u + d_x l, y_u + d_y l, z_u + d_z l; n_t) d_u^m dl \quad (3.2)$$

(x_u, y_u, z_u) alıcı, (x_m, y_m, z_m) uydu kartezyen koordinatlarını ve d_x , d_y ve d_z uydu ile alıcı kartezyen koordinatları arasındaki farkı ifade etmektedir. d_u^m , Eşitlik 3.3 ile tanımlanmıştır.

$$d_u^m = \sqrt{(x_u - x_m)^2 + (y_u - y_m)^2 + (z_u - z_m)^2} \quad (3.3)$$

d günü ve h saatinde YKS alıcı ve uydu çiftleri için $N_p \times 1$ boyutlu ETEİ vektörü Eşitlik 3.4’de verilmiştir.

$$\underline{y}_{d,h} = [y_{d,h}(1) \dots y_{d,h}(n_p(n_t)) \dots y_{d,h}(N_p(n_t))]^T \quad (3.4)$$

Kestirilen elektron yoğunluğu dağılımının doğruluğu büyük ölçüde YKS uydu-alıcı çiftleri arasındaki ETEİ verisinin sayısına ve ölçüm doğruluğuna bağlıdır. Ancak YKS alıcılarının düzgün dağılmaması ve bazı bölgelerde bulunmaması nedeniyle BİT sırasında kullanılan veriler, 3-B elektron dağılımı elde edilirken iyonkürenin değişken yapısı modellenmekte yetersiz kalmaktadır. Ayrıca YKS uydularından yeryüzü alıcılarına gönderilen sinyaller iyonkürede dikey yollar izlemekte ve yatay yollara dair bilgi elde edilememektedir. 3-B geometride bilinmeyenlerin sayısının artması çözümü kötü koşullu geriçatma problemine çevirmekte ve elektron yoğunluğu dağılımı hakkında ön bilgi kullanılmadan çözülemez hale getirmektedir [22,23]. Literatürdeki çalışmalarda, iyonküre elektron yoğunluğu fonksiyon tabanlı yöntemler ile ifade edilerek geriçatma probleminin çözümü dikgen tabanların katsayı kestirimine dönüştürülmekte, böylece problem önceden belirlenmiş problem uzayına sınırlandırılmaktadır.

Literatürdeki fonksiyon tabanlı çalışmalarda, iyonküre elektron yoğunluğu yatayda matematiksel fonksiyonlar ile dikeyde ise iyonküreye ait ön bilgiler kullanılarak hesaplanan Ampirik Dikgen Fonksiyonlar (ADF) kullanılarak temsil edilmektedir. ADF’ler, bir iyonküre modeli kullanılarak oluşturulan model matrislere, $\underline{G}_{d,h}$, Temel Bileşenlerine Ayırma (TBA) ve Tekil Değer Ayrışımı (TDA) gibi yöntemlerin uygulanması ile hesaplanan taban vektörleri kullanılarak elde edilmektedir [36, 71]. Literatürde yer alan başlıca fonksiyon tabanlı yöntemlere Çizelge 3.1’de yer verilmiştir.

Literatürde elektron yoğunluğunu, enlem ve boylamda temsil etmek için kullanılan taban vektörü hesaplama çalışmaları sırasıyla Küresel Başlık Harmonikleri (KBH) için Bölüm 3.1’de, Haar Dalgacıklar için Bölüm 3.2’de, B-Spline fonksiyonları için Bölüm 3.3’de ve Slepian fonksiyonları için Bölüm 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.1: Literatürdeki fonksiyon tabanlı çalışmaların özeti.

Kapsama	Yatay Taban Fonksiyonlar	Dikey Taban Fonksiyonlar	Literatür
Küresel	2-B Küresel Harmonikler	ADF	[28]
Bölgesel	2-B Küresel Başlık Harmonikleri	ADF	[29]
Bölgesel	2-B Haar Dalgacıkları	ADF	[30]
Bölgesel	2-B B-Spline Fonksiyonları	ADF	[31]
Bölgesel	2-B Slepian Fonksiyonları	ADF	[32]

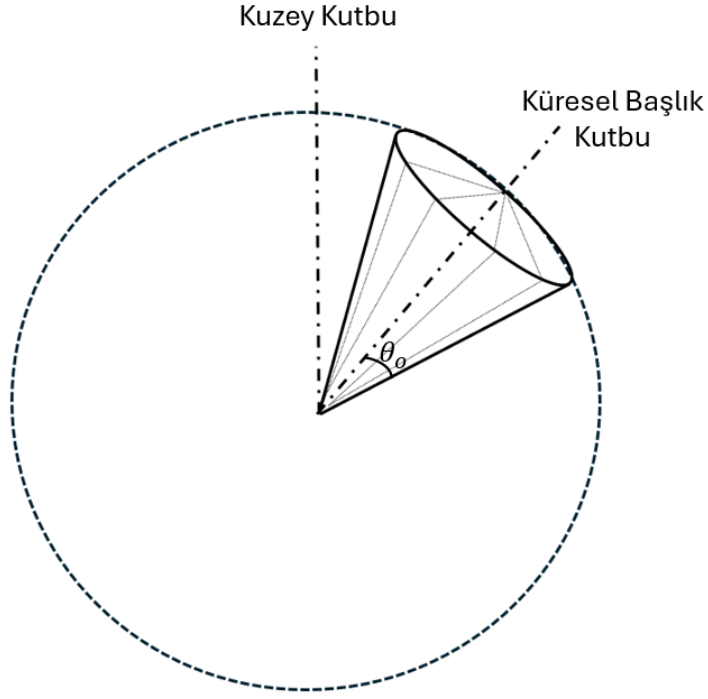
3.1 Küresel Başlık Harmonikleri

Küresel Harmonikler (KH), literatürde küresel elektron yoğunluğunu temsil etmekte kullanılmaktadır [28]. KH fonksiyonları yerküre üzerinde sınırları belirli bir bölgede, bölge içerisinde dikgen olma koşulunu sağlamadıkları için kullanılamamaktadır. [29] çalışmasında bölgesel modelleme için Küresel Başlık Harmonikleri (KBH) analizini geliştirmiştir. KBH fonksiyonları, bir düzlem tarafından kesilmiş küreyi temsil eden küresel bir başlık yüzeyindeki skaler alanların davranışını ifade etmek için kullanılan matematiksel fonksiyonlardır. KBH'ler, iyonküre elektron yoğunluğunun fonksiyon tabanlı açılımı yapılırken taban fonksiyon olarak kullanılabilir.

Bir küre üzerinde tanımlanan enlem, θ , ve boylam, ϕ için genel bir fonksiyon, $f(\theta, \phi)$, küresel harmoniklerin bir açılımı olarak yazılabilmektedir.

$$f(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^K \sum_{m=0}^n (a_n^m \cos(m\phi) + b_n^m \sin(m\phi)) P_n^m(\cos \theta) \quad (3.5)$$

$P_n^m(\cos \theta)$, m tamsayı mertebeli ve n dereceli Legendre polinomudur. a_n^m ve b_n^m , açılımı karakterize eden küresel katsayılarıdır. $P_n^m(\cos \theta) \sin(m\phi)$ ve $P_n^m(\cos \theta) \cos(m\phi)$, sıradan yüzey küresel harmonikleri olarak tanımlanmaktadır. Yerküre üzerinde belirli bir bölge ile sınırlı uygulamalar için Legendre polinomları dikgen olma koşulunu sağlamadıkları için taban fonksiyon olarak kullanılamamaktadır. Küresel Başlık Harmonik Analizi (KBHA) yöntemi, tamsayı mertebeli, ancak tamsayı olmayan dereceli Legendre fonksiyonları ile başlık benzeri bölgeler için genel bir fonksiyonu modellemekte kullanılabilir. Küresel başlık bölgesi Şekil 3.1'de örnek olarak verilmiştir.



Şekil 3.1: Küresel Başlık gösterimi.

KBH fonksiyonları, değişkenlere ayırma yöntemi ve sınır koşullarına tabi özdeğer problemlerinin çözülmesi ile bulunan Legendre denkleminin çözümüdür. Yeni tanımlanan Legendre fonksiyon ve türevleri, başlık kenarına gelen θ_o açısında Eşitlik 3.6'da verilen sınır koşullarını sağlamalıdır.

$$\frac{dP_{n_k}^m(\cos \theta_o)}{d\theta} = 0 \quad (3.6)$$

$$P_{n_k}^m(\cos \theta_o) = 0$$

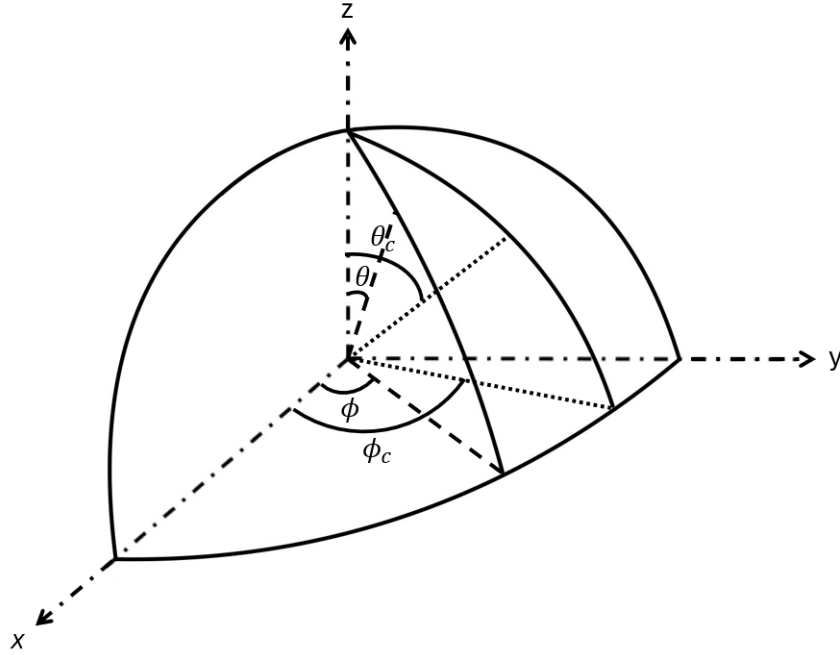
Bu sınır koşulları ile her biri birbirine dik olan iki taban fonksiyon seti hesaplanmaktadır. k , belirli bir m mertebesi için Eşitlik 3.6'nın köklerini indekslemek için kullanılmaktadır. n_k^m değeri, her m mertebesi için artan şekilde k indekslerine göre sıralanmakta ve Eşitlik 3.6'da verilen sınır koşullarını sağlamak için gerekli olan denklemlerin çözümü olarak belirlenmektedir. n_k^m değerinin belirlenmesi ile yeni açılım Eşitlik 3.7'de verildiği gibi elde edilebilmektedir.

$$f(\theta, \phi) = \sum_{k=0}^{K_{\max}} \sum_{m=0}^k (a_k^m \cos(m\phi) + b_k^m \sin(m\phi)) P_{n_k}^m(\cos \theta) \quad (3.7)$$

Küresel başlık kutbu, başlığın merkezinde olacak şekilde yeni tanımlanan referans sisteminde, başlık benzeri bir bölge üzerinde geliştirilen küresel açılımın kesildiği maksimum derece $K_{\max}$ olarak ifade edilmektedir. KBH analizinde ilk olarak coğrafi koordinat sistemindeki enlem ve boylam değerleri, küresel başlık koordinat sistemindeki karşılıklarına dönüştürülmektedir. Koordinat dönüşümü Bölüm 3.1.1’de verilmiştir.

3.1.1 Koordinat Dönüşümü

Coğrafi koordinat sistemi ile küresel başlık koordinat sistemi arasındaki ilişki Şekil 3.2’de verilmiştir. Yerküre üzerindeki (θ, ϕ) noktasının küresel başlık koordinat sistemindeki yeri (θ_c, ϕ_c) olarak tanımlanmaktadır ve yeni enlem ve boylam değerleri Eşitlik 3.8 ve 3.9 kullanılarak hesaplanabilmektedir.



Şekil 3.2: Küresel başlık koordinat gösterimi.

$$\cos(\theta_c) = \cos(\theta_o) \cos(\theta) + \sin(\theta_o) \sin(\theta) \cos(\phi - \phi_o) \quad (3.8)$$

$$\tan(\pi - \phi_c) = \frac{\sin(\theta) \cos(\phi - \phi_o)}{\sin(\phi_o) \cos(\theta) + \cos(\theta_o) \sin(\theta) \cos(\phi - \phi_o)} \quad (3.9)$$

(θ_c, ϕ_c) için tam sayılı mertebe ve tam sayı olmayan derece ile tanımlanan Legendre fonksiyonlarının hesaplanması Bölüm 3.1.2’de açıklanmıştır.

3.1.2 Legendre Fonksiyonunun Hesaplanması

m . mertebeden ve n_k . dereceden Legendre fonksiyonu $P_{n_k}^m(\cos \theta)$ Eşitlik 3.10 ile tanımlanmaktadır.

$$P_{n_k}^m(\cos \theta) = \sum_{k=0}^{\infty} A_k(m, n) \left(\frac{\sin \theta}{2} \right)^{2k} \quad (3.10)$$

$A_k(m, n)$ katsayıları Eşitlik 3.11 ile hesaplanmaktadır.

$$A_k(m, n) = \begin{cases} K_n^m \sin^m \theta, & k = 0 \\ \frac{(k+m-1)(k+m) - n(n+1)}{k(k+m)} A_{k-1}(m, n), & k > 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

Düzgeleştirme parametresi K_n^m , Eşitlik 3.12 kullanılarak elde edilmektedir.

$$K_n^m = \begin{cases} 1, & m = 0 \\ \frac{2^{-m}}{\sqrt{m\pi}}, \left(\frac{n+m}{n-m} \right)^{\frac{1}{2}n+\frac{1}{4}} p^{\frac{1}{2}m} e^{e_1+e_2}, & m > 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

Mertebe ve dereceye bağlı sabit değerler Eşitlik 3.13 ile hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} p &= \left(\frac{n}{m} \right)^2 - 1 \\ e_1 &= -\frac{1}{12m} \left(1 + \frac{1}{p} \right) \\ e_2 &= \frac{1}{360m^3} \left(1 + \frac{3}{p^2} + \frac{4}{p^3} \right) \end{aligned} \quad (3.13)$$

$m = 0$ için Eşitlik 3.14'ün ikinci terimi sıfıra eşit olmaktadır.

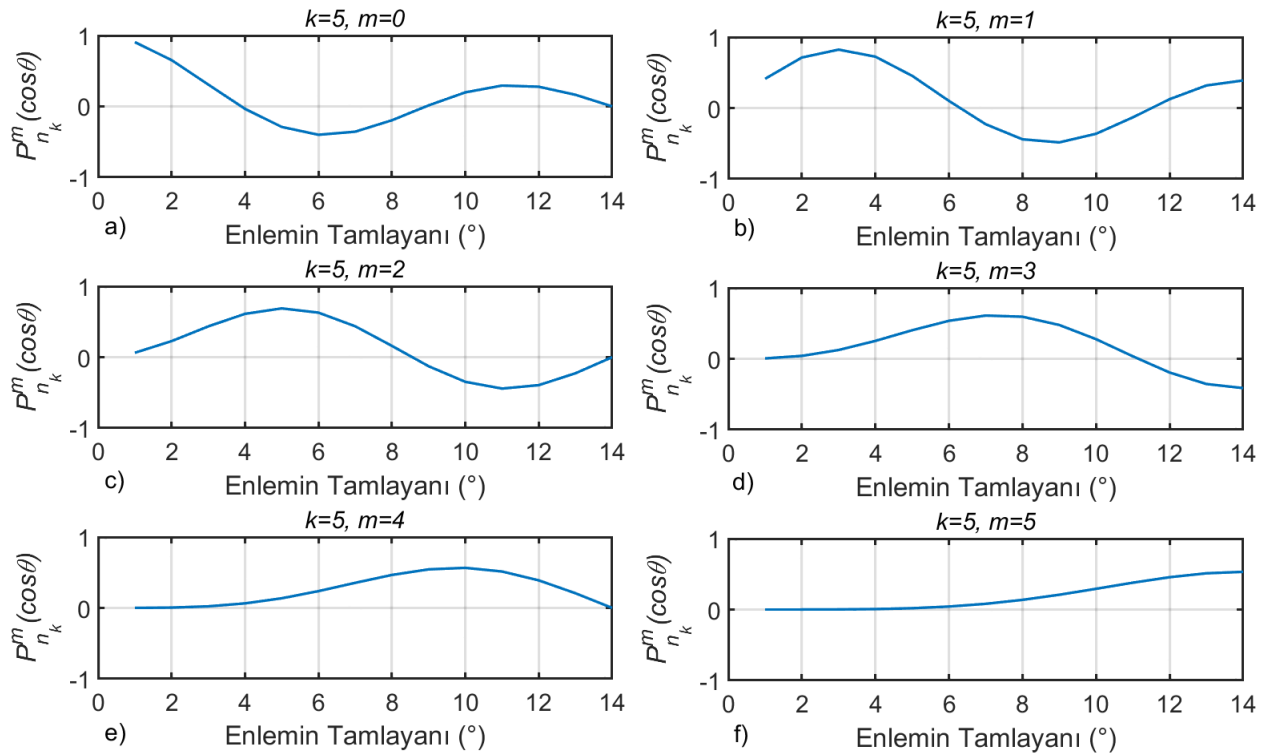
$$\frac{dP_{n_k}^m(\cos \theta)}{d\theta} = \frac{\sin \theta}{2} \sum_{k=1}^{\infty} k A_k(m, n) \left(\sin \frac{\theta}{2} \right)^{2(k-1)} + \cos \theta \left[\frac{m}{\sin \theta} P_{n_k}^m(\cos \theta) \right] \quad (3.14)$$

Eşitlik 3.10 ve 3.14'ün kökleri hesaplanarak n_k^m değerleri kestirilmektedir. $k=5$ ve $\theta_o = 24^\circ$ için kestirilen n_k^m değerleri Çizelge 3.2 'de örnek olarak verilmiştir.

Şekil 3.3'de, $\theta_o = 24^\circ$, $k=5$ ve $m=0, 1, 2, 3, 4, 5$ için ilgili Legendre fonksiyonları, $P_{n_k}^m(\cos \theta)$ örnek olarak verilmiştir. $k-m$ değerleri tekil olan fonksiyonları, başlık sınırlarında sıfır değerini almakta ve Eşitlik 3.6'de verilen sınır koşullarının sağlandığı görülmektedir.

Çizelge 3.2: $k=5$ ve $\theta_o=24^\circ$ için n_k^m değerleri.

k	m					
0	0	1	2	3	4	5
1	0					
2	5.2337	3.9779				
3	8.6613	8.6613	6.9184			
4	12.6750	12.2515	11.8120	9.71126		
5	16.2560	16.2560	15.5607	14.8285	12.43521	
6	20.1572	19.8935	19.6261	18.7223	17.7627	15.1178



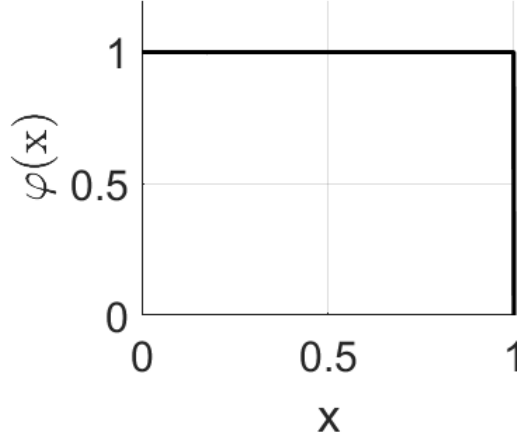
Şekil 3.3: Küresel başlık için Legendre fonksiyonları.

İyonküre elektron yoğunluğu yatayda KBH taban fonksiyonları ve dikeyde ADF'ler ile temsil edilebilmektedir.

3.2 Haar Dalgacıkları

Macar matematikçi Alfred Haar'ın adını taşıyan Haar dalgacıkları, birlikte bir dalgacık ailesi oluşturan yeniden ölçeklenmiş kutu fonksiyonlar dizisidir. Dalgacıkların en basit formu olan Haar dalgacıkları, hızlı değişen veya sürekli olmayan sinyalleri farklı ölçeklerde ve çözünürlüklerde temsil etme yetenekleri sayesinde önemli araçlardır. Görüntü işleme, veri sıkıştırma ve örüntü tanıma gibi alanlarda da kullanılan Haar dalgacıkları, iyonkürede elektron yoğunluğu dağılımını tanımlamak için kullanılmaktadır. Haar dalgacıkları, iyonküre elektron yoğunluğunun farklı çözünürlüklerde analizini mümkün kılmakta ve iyonküredeki uzun süreli ve ani değişiklikleri yakalayabilmektedir. Bu özellikleri, iyonkürenin yapı ve dinamiklerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına yardımcı olmaktadır

Dalgacık analizi sırasında ϕ ve dalgacık ψ fonksiyonları büyük öneme sahiptir. Bu iki fonksiyon ile bir sinyali parçalamak ve yeniden yapılandırmak için kullanılacak fonksiyon kümeleri oluşturmaktadır. En basit dalgacık analizi, Şekil 3.4'de verilen Haar ölçeklendirme fonksiyonu kullanılarak hesaplanmaktadır.



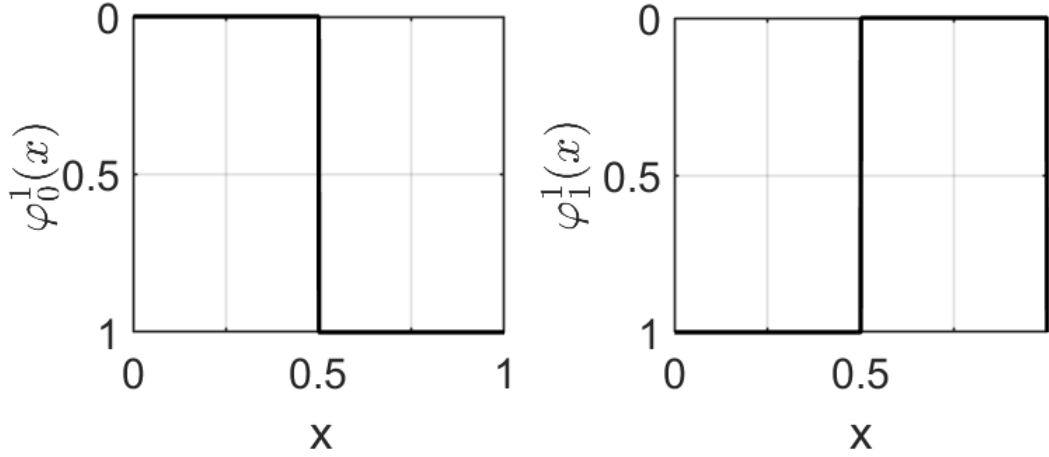
Şekil 3.4: Haar ölçeklendirme fonksiyonu.

Haar ölçekleme fonksiyonu, $[0, 1)$ aralığının tamamında sabit değerler almakta ve aralık dışında sıfıra eşit olmaktadır. V^j vektör uzayı, $[0, 1)$ aralığı içerisinde tanımlanan ve 2^j kadar eşit aralığa bölünmüş sabit parçalı fonksiyonları içermektedir. V^j 'de bulunan her vektör aynı zamanda V^{j+1} içerisinde de bulunmaktadır. V^j vektör uzayı içerisindeki taban fonksiyonlar,

ölçeklendirilmiş ve kaydırılmış kutu fonksiyonları kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\varphi_k^j(x) = \varphi(2^j x - k), \quad k = 0, \dots, 2^j - 1 \quad (3.15)$$

V^1 vektör uzayı için taban fonksiyonlarını oluşturan iki adet kutu fonksiyon Şekil 3.5’de verilmiştir.



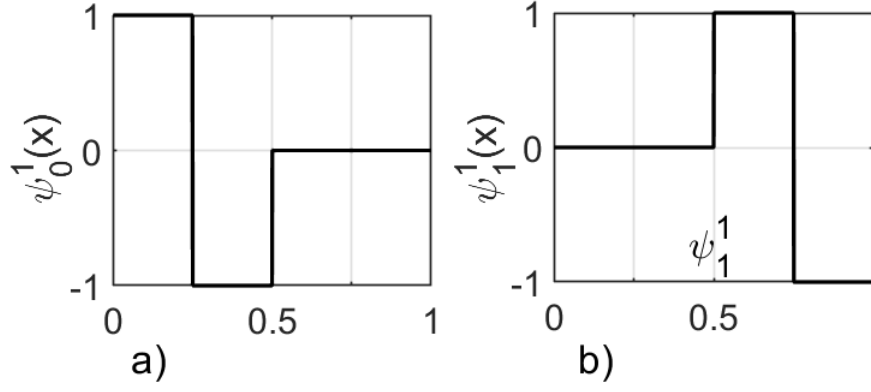
Şekil 3.5: V^1 vektör uzayı için kutu fonksiyonlar.

W^j , V^{j+1} 'de V^j vektör uzayının dikgen tümleyenidir. Bu nedenle W^j vektör uzayının elemanları, V^{j+1} 'de V^j tarafından temsil edilemeyen fonksiyonları temsil etmek için kullanılmaktadır. W^j 'yi kapsayan doğrusal olarak bağımsız fonksiyon kümesine dalgacık denilmektedir. Haar Dalgacık ailesi, $x \in [0, 1]$ aralığında Eşitlik 3.16 ile tanımlanmaktadır.

$$\psi_k^j = \psi(2^j x - k), \quad k = 0, \dots, 2^j - 1$$

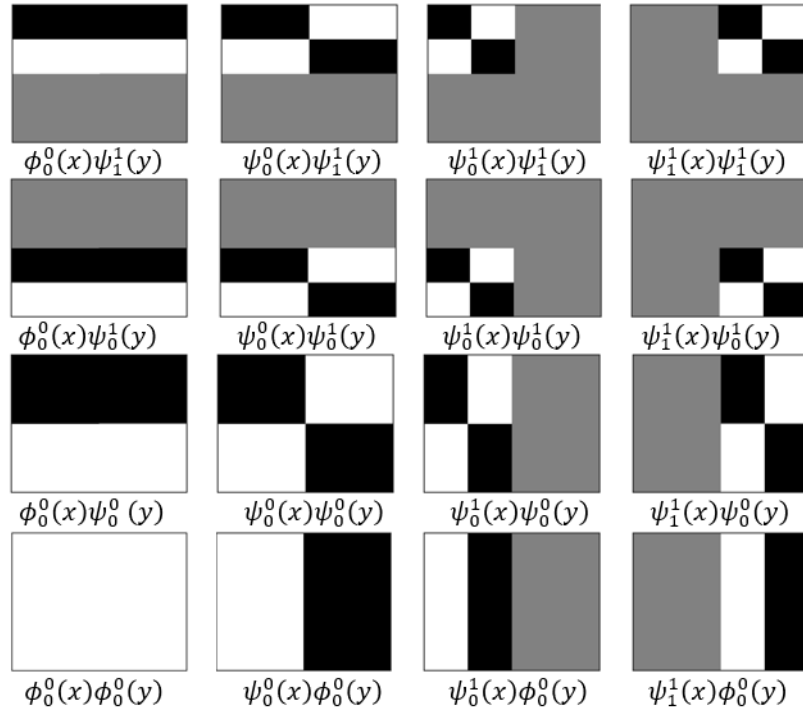
$$\psi(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq 0.5 \\ -1, & 0.5 \leq x \leq 1 \\ 0, & x \notin [0, 1] \end{cases} \quad (3.16)$$

V^j vektör uzayındaki fonksiyonlar, j çözünürlük seviyesinde sinyallerin düşük frekanslı bileşenlerini temsil etmektedir. W^j vektör uzayındaki fonksiyonlar, V^j tarafından yakalanamayan yüksek frekanslı sinyal bileşenlerini temsil etmektedir. W^1 için iki Haar Dalgacık Şekil 3.6'da örnek olarak verilmiştir.



Şekil 3.6: W^1 vektör uzayı için örnek iki Haar dalgacık

İyonküre elektron yoğunluğunu Haar Dalgacıkları ile ifade etmek amacıyla 1-B Haar Dalgacık fonksiyonları kullanılarak, 2-B taban fonksiyonları hesaplanmaktadır. V^2 için iki boyutlu Haar dalgacık tabanlarının standart yapısı Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7: V^2 vektör uzayı için 2-B Haar dalgacık tabanları.

Haar dalgacıkları, iyonküre elektron yoğunluğunun profillerinin genel yönsemelerini ve keskin gradyanlarını temsil edebilmesi nedeniyle fonksiyon tabanlı BİT sırasında tercih edilen bir yöntemdir. İyonküre elektron yoğunluğu yatayda Haar dalgacıkları, dikeyde ise ADF’ler ile temsil edilmektedir.

3.3 B-Spline Fonksiyonları

B-spline fonksiyonları genellikle düzgün eğrileri ve yüzeyleri temsil etme kapasiteleri için tercih edilen matematiksel fonksiyonlar olup bilgisayar destekli tasarım, görüntü işleme ve sayısal analiz olmak üzere çeşitli alanlarda uygulanmaktadır [31, 72, 73]. BİT sırasında B-spline fonksiyonları ile taban fonksiyonları hesaplamak, iyonküre elektron yoğunluğundaki uzamsal değişimleri modellemek için esnek ve uygulanabilir bir yaklaşım sunmaktadır. Bir dizi düğüm üzerinde parçalı polinom fonksiyonları olarak tanımlanan B-spline fonksiyonları, iyonküredeki bölgesel özellikleri incelemek için çok yönlü bir çerçeve sağlamaktadır. B-spline taban fonksiyonlarının dereceleri ve düğüm noktalarının konumları ayarlanarak iyonküredeki büyük ölçekli yapıları ve küçük ölçekli ayrıntıları takip edebilmekte ve elektron yoğunluğu dağılımının yeniden yapılandırılmasında kullanılabilir. B-spline fonksiyonları

[31, 72, 73], çalışmalarında iyonküre tomografisi için Öklid karesel B-Spline dalgacıkları ve tensör çarpımlarına dayanan çok boyutlu bir yaklaşım uygulamıştır. Matematiksel olarak m . mertebeden bir düzgelenmiş B-Spline gösterimi $\phi_{j,k} = N_k^{m,j}(x)$ yapılmaktadır. k kontrol sayısını ve j düğüm dizisini ifade etmektedir. m_j taban fonksiyonu sayısıdır, v^j vektör uzayı, m_j boyuta sahiptir. Elektron yoğunluğu modellenirken B-Spline fonksiyonları $m = 3$ mertebesinde, $m_j = 2^j + (m - 1) = 2^j + 2$ taban fonksiyonu ile, $k = 0, 1, \dots, m_j - 1$ kontrol noktası için modellenmiştir [31]. Sabit bir j değeri için düğüm dizisi, Eşitlik 3.17 arasında değerler almaktadır. B-Spline fonksiyonlarının değerleri belirli bir aralık içerisinde sıfırdan farklı değerler almaktadır. $N_k^{3,j}$ için bu aralık $[t_k^j, t_{k+3}^j]$ karşılık gelmektedir. Bu yaklaşım bölgesel modellemede kullanıldığı için $[0, 1]$ aralığı içerisinde tanımlanan taban fonksiyonları oluşturulmuştur. $[0, 1]$ aralığının uç noktalarında devamlılığın sağlanması için fonksiyonların davranışlarına dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle bu noktalarda uç nokta aradeğerleme B-Spline tanımlanmıştır. İlk üç düğüm değeri sıfır ve son üç düğüm değeri bir olarak kararlaştırılmış, böylelikle uç noktalara birden fazla düğüm eklenerek sınır koşullarına uyum sağlanması hedeflenmiştir.

$$0 = t_0^j = t_1^j = t_2^j \leq t_3^j \leq t_4^j \leq \dots \leq t_{m_j-1}^j \leq t_{m_j}^j = t_{m_j+1}^j = t_{m_j+2}^j = 1 \quad (3.17)$$

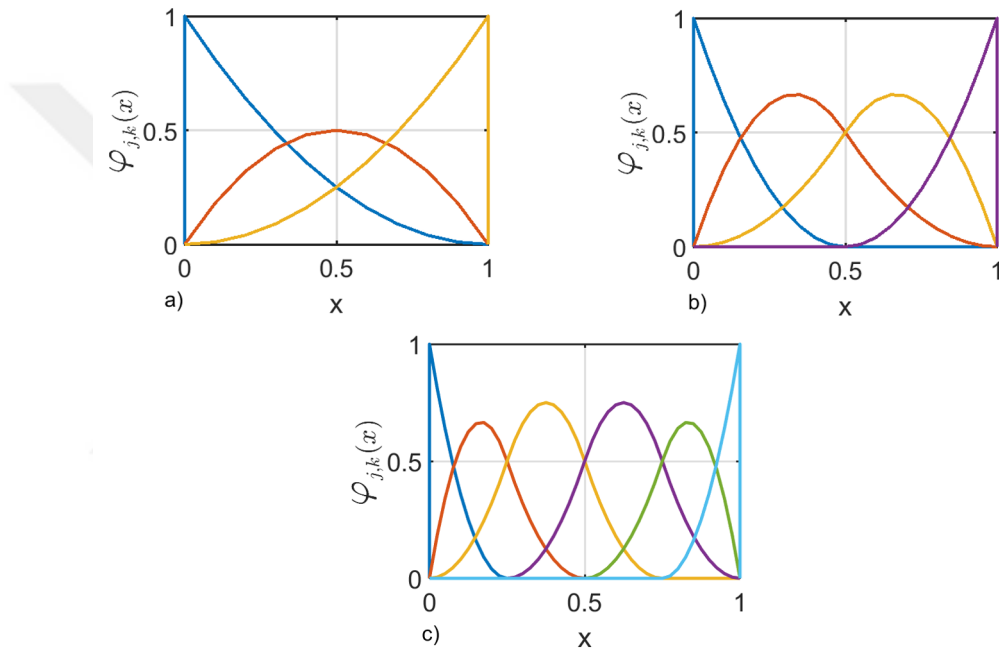
m_j adet taban fonksiyon, $\phi_j^k = N_k^{3,j}(x)$, $k = 0, 1, \dots, m_j - 1$ ve $x \in [0, 1]$ için Eşitlik 3.18 ile

tanımlanmaktadır.

$$N_k^{1,j}(x) = \begin{cases} 1, & t_k^j \leq x \leq t_{k+1}^j \\ 0, & \text{veya} \end{cases} \quad (3.18)$$

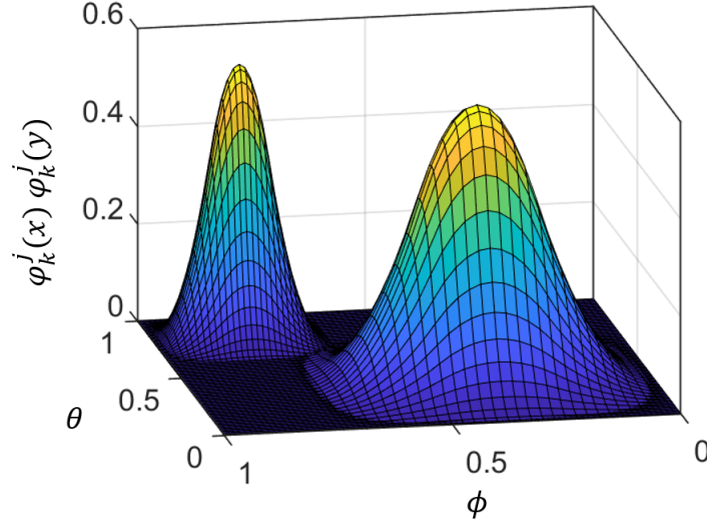
$$N_k^{m,j}(x) = \frac{x - t_k^j}{t_{k+m-1}^j - t_k^j} N_k^{m-1,j}(x) + \frac{t_{k+m}^j - x}{t_{k+m}^j - t_{k+1}^j} N_k^{m-1,j}(x)$$

Farklı kontrol noktalarına sahip düğüm dizinleri için B-spline fonksiyonları Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8: B-spline fonksiyonları, a) $j = 0$, b) $j = 1$, c) $j = 2$.

Şekil 3.9, seçilen 2-B ölçeklendirme fonksiyonlarını, $\varphi_k^J(\theta)\varphi_k^J(\phi)$, $j = 3$ ve $k = 7$ ile $j = 2$ ve $k = 2$ için görselleştirmektedir. j seviyesi ne kadar yüksek değer alırsa tepe noktası da o kadar keskin olmaktadır.



Şekil 3.9: 2-B ölçeklendirme fonksiyonları, $\varphi_k^j(\theta)\varphi_k^j(\phi)$, $j = 3$ ve $k = 7$ (sol) ile $j = 2$ ve $k = 2$ (sağ).

İyonküre elektron yoğunluğu yatayda B-spline taban fonksiyonları ve dikeyde ADF'ler ile temsil edilebilmektedir.

3.4 Slepian Fonksiyonları

Slepian fonksiyonlar, sinyal enerjisini belirli bir bölgeye odaklayabilme yetenekleri nedeniyle önem taşımaktadır. BİT sırasında Slepian fonksiyonlarının taban fonksiyon olarak kullanılması, iyonküre elektron yoğunluğu dağılımının uzamsal yapısını takip etmek için etkili bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir. Spektral sızıntı, belirli sınırların ötesinde enerjinin istenmeyen şekilde yayılması durumudur ve yeniden yapılandırma sırasında hatalara neden olabilmektedir. Bu nedenle spektral sızıntıyı en aza indirmesi, yeniden yapılandırılan elektron yoğunluğunun belirli bir uzamsal bölge içerisinde doğruluğunun sağlanması için büyük öneme sahiptir. Slepian taban fonksiyonları, maksimum L derecesine sahip bant sınırlı harmoniklerdir ve aynı zamanda bir hedef bölge içinde uzamsal olarak yoğunlaşmıştır. Bu nedenle, küresel harmoniklerin belirli bir doğrusal kombinasyonu olarak tanımlanabilmekte ve küresel olarak tanımlanan küresel harmoniklerin aksine, hedef bölge içerisindeki enerji konsantrasyonlarına göre düzenlenebilmektedir.

$$g(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^L \sum_{m=-l}^l g_{l,m} Y_{l,m}(\theta, \phi) \quad (3.19)$$

θ ve ϕ sırasıyla enlem ve boylam değerlerini ifade etmektedir. l ve m değerleri sırasıyla küresel harmoniklerin derece ve mertebe değerlerini ifade etmektedir ve bant sınırlı harmoniklerin en büyük derecesi L 'dir. $Y_{l,m}(\theta, \phi)$ küresel harmonik fonksiyonları ve $g_{l,m}$ katsayıyı ifade etmektedir. $g(\theta, \phi)$ konsantrasyonunun belirli bir bölge, R , içerisinde en büyük değere çıkarılması için Eşitlik 3.20'de verilen normların oranı en büyük değere çıkarılmalıdır.

$$\Lambda = \max \frac{\|g(\theta, \phi)\|_R^2}{\|g(\theta, \phi)\|_\Omega^2} = \max \frac{\int_R g^2(\theta, \phi) d\Omega}{\int_\Omega g^2(\theta, \phi) d\Omega} \quad (3.20)$$

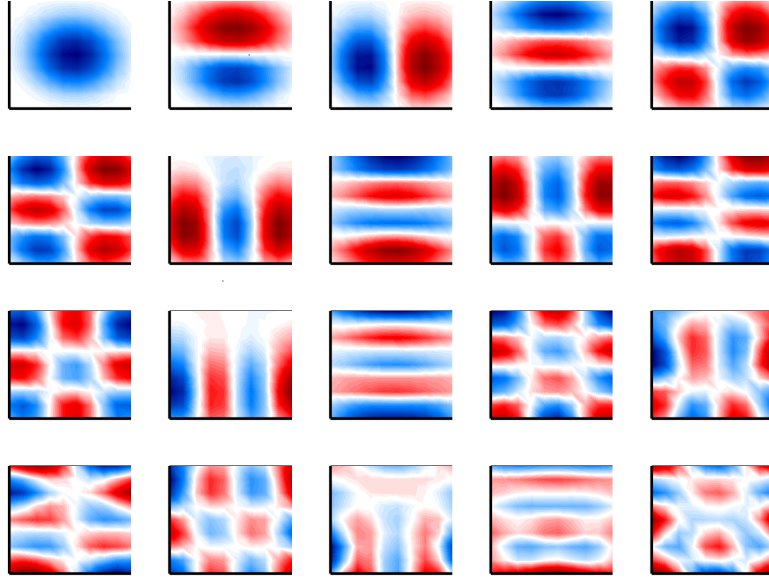
Λ , $g(\theta, \phi)$ bölge içerisindeki yoğunluğunu ifade etmektedir ve $0 < \Lambda < 1$ olarak sınırlandırılmıştır. Λ değeri bire yaklaştıkça R bölgesi içerisindeki enerji yoğunluğu artmaktadır. Ω tüm küreyi ifade etmektedir. Bu konsantrasyon kriterinin en büyük değerinin bulunması, spektral olarak cebirsel özdeğer probleminin çözülmesi ile gerçekleşmektedir.

$$\begin{cases} \sum_{l'=0}^L \sum_{m=-l'}^{l'} D_{l,m,l',m'} g_{l,m} = \Lambda g_{l,m}, & 0 \leq l \leq L \\ D_{l,m,l',m'} = \int_R Y_{lm} Y_{l'm'} d\Omega \end{cases} \quad (3.21)$$

Konsantrasyon faktörü Λ ve Slepian harmonik açılımı $g_{l,m}$ Eşitlik 3.21'de verilen özdeğer ve özvektörlerin sırasıyla çözümüdür. Şekil 3.10'de bir orta enlem bölgesi için ilk 20 Slepian fonksiyonunun bölge içerisinde enerji dağılımı verilmiştir.

İyonküre elektron yoğunluğu yatayda Slepian taban fonksiyonları ve dikeyde ADF'ler ile temsil edilebilmektedir.

KBH fonksiyonları ile [29] çalışmasında kutup bölgesinde elektron yoğunluğu geriçatımı üç adet KBH fonksiyonu ve üç adet ADF kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elektron yoğunluğu yeniden yapılandırması sırasında toplam 48 katsayı kestirimi yapılmıştır. KBH fonksiyonları ile bölge içerisinde KH fonksiyonlarının dik olma problemi çözülmekte ancak çözüm simetrik sınır belirleme koşulu uygulamayı sınırlandırmaktadır. Haar dalgacıkları ile 24°K ile 40°K enlemlerinde ve 44°K ile 64° boylarında elektron yoğunluğu kestirimi gerçekleştirilmiştir [30]. Elektron yoğunluğu yeniden yapılandırması sırasında 192 katsayı kestirimi yapılmıştır. Haar dalgacıkları parçalı sabit fonksiyonlardır ve bölgesel yönselemelerde ani değişikliklere yol açabilmektedir. B-Spline fonksiyonları, -60°G ile 30°G enlemleri ve 250°B



Şekil 3.10: Orta enlem bölgesinde yoğunlaşan ilk 20 Slepian taban fonksiyon örnekleri.

ile 340°B boylamları arasındaki bir bölge için simülasyon verileri ile elektron yoğunluğu geriçatımı gerçekleştirilmiştir [31]. Elektron yoğunluğu yeniden yapılandırması sırasında 5832 katsayı kestirimi yapılmıştır. B-Spline fonksiyonları, modellenen bölge sınırlarında elektron yoğunluğunu doğru bir şekilde temsil edememektedir. Bu durum bölge sınırlarında ek kısıtlamalar uygulanmasını gerektirmektedir. [32] çalışmasında, 20°G ile 40°G enlemleri ve 280°D ile 320°D boylamları arasındaki bölge için 63 katsayı kestirimi ile elektron yoğunluğu geriçatımı gerçekleştirilmiştir. Enerji konsantrasyonu problemini çözmeyi amaçlayan Slepian fonksiyonları, küresel analizlerin gerekli olduğu daha geniş sınırlara sahip bölgelerde elektron yoğunluğunu temsil edememektedir. Ayrıca bu çalışmalarda ADF'lerin hesaplandığı model matrislerin nasıl oluşturulduğu anlatılmamaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, Bölüm 4'te anlatılan 4-B BİT algoritması IONOLAB-Fusion ile yeniden yapılandırılan elektron yoğunluğu değerleri ve literatürde yer alan KBH, Haar dalgacıkları, B-Spline ve Slepian fonksiyonları kullanılarak geriçatılan elektron yoğunluğu değerleri birlikte incelenerek başarımlar karşılaştırması yapılmıştır. Karşılaştırma sonuçları Bölüm 6'da yer almaktadır.

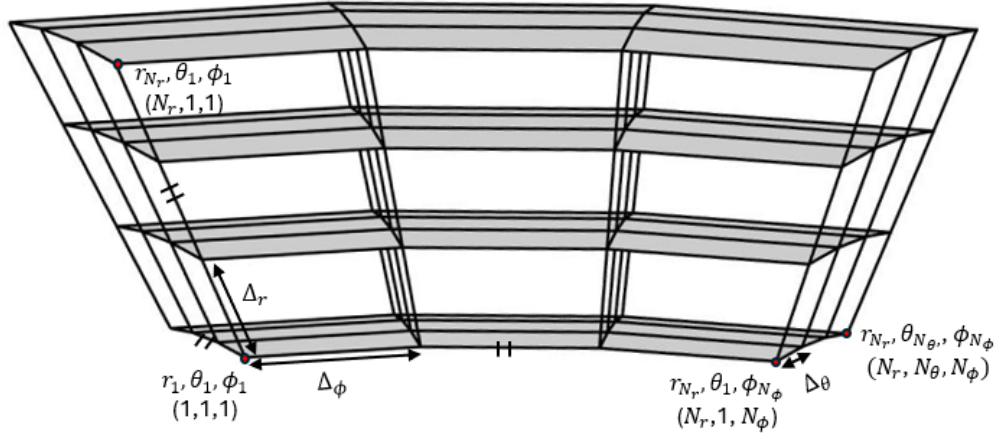
4. IONOLAB-FUSION ALGORİTMASI

Tekil Değer Ayrışımı (TDA), bir matrisi üç ayrı matrise ayırıştıran ve ana matris ile ilgili önemli özellikleri ortaya çıkaran doğrusal cebir yöntemidir [36]. Bir veri kümesinin temel özelliklerini başarılı bir şekilde çıkarma ve temsil etme yeteneği sayesinde veri analizi, dijital sinyal işleme ve sayısal hesaplama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. TDA yöntemi, Bilgisayarlı İyonküre Tomografisi (BİT) ile havakürede elektromanyetik dalga yayılımını önemli ölçüde etkileyen iyonküre elektron yoğunluğu dağılımını yeniden yapılandırmasında kullanılmaktadır. TDA yöntemi ile büyük boyutlu veri setleri sinyal ve gürültü alt uzaylarına ayrılabilir. Veri setleri için hesaplanan tekil değerlerden anlamlı bilgi verenlere karar verilerek taban vektörleri seçilmekte ve sinyaller taban katsayıları ve taban vektörleri kullanılarak temsil edilebilmektedir. BİT kapsamında TDA, karmaşık veri matrislerini etkili bir şekilde ayırıştırma ve böylece iyonküre elektron yoğunluğu dağılımının temel yönsemesini çıkarma özelliği sayesinde büyük önem taşımaktadır. İyonküre tomografisinde TDA yöntemi ilk kez [37] tarafından sadece dört taban vektörü kullanılarak sentetik ETEİ verileri ile küresel iyonküre elektron yoğunluğu yeniden yapılandırmasında uygulanmıştır.

Bu çalışmada [37]'de verilen yöntem geliştirilerek 4-B iyonküre elektron yoğunluğu geriçatımı için TDA yöntemi tabanlı, kapalı formda bir BİT algoritması olan IONOLAB-Fusion geliştirilmiştir [74]. İyonküreye ait ön bilgiyi içeren model matris oluşturma yöntemi en iyilenmiş, örnekleme matrisi hem YKS uyduları ile yeryüzü alıcı istasyonları hem de YKS uyduları ile AYY uyduları üzerindeki alıcılar arasındaki yolları içerecek şekilde genişletilmiştir. Örnekleme vektörü optimum sayıda yeryüzü alıcı istasyonu ve AYY uyduları üzerindeki alıcılar kullanılarak oluşturulmuştur. Algoritma alıcı istasyonların seyrek ve düzgün dağılmadığı bölgelere sanal dikey ve yatay yollar eklenecek şekilde geliştirilmiştir. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak örnekleme matrisi geometrik uzaklık değerleri ile değil, YKS uyduları ve alıcılar arasındaki ışınların, ışın izleme algoritması ile takip edilmesiyle hesaplanan gerçek yol mesafeleri kullanılarak oluşturulmuştur.

IONOLAB-Fusion algoritması, iyonküreyi 3-B küresel hücrelere bölmekte ve bu hücreleri n_t anı için Şekil 4.1'de gösterildiği üzere yükseklik, enlem ve boylama bağlı olarak leksikografiksel olarak sıralamaktadır.

r_1 , θ_1 , and ϕ_1 hücrelerin başlangıç noktasıdır. Δr , $\Delta \theta$ ve $\Delta \phi$ yükseklik, enlem ve boylamda



Şekil 4.1: Küresel Hücre Gösterimi.

çözünürlük değerleridir. Hücre içerisindeki $[n_r, n_\theta, n_\phi]$ noktası Eşitlik ile 4.1-4.3 ifade edilebilmektedir.

$$r_{n_r} = r_1 + n_r \Delta r \quad (4.1)$$

$$\theta_{n_\theta} = \theta_1 + n_\theta \Delta \theta \quad (4.2)$$

$$\phi_{n_\phi} = \phi_1 + n_\phi \Delta \phi \quad (4.3)$$

n_r ve n_θ ve n_ϕ , $1 \leq n_r \leq N_r$, $1 \leq n_\theta \leq N_\theta$ ve $1 \leq n_\phi \leq N_\phi$ olacak şekilde sınırlandırılmıştır. N_r , N_θ ve N_ϕ yükseklik, enlem ve boylam için hücre sayısını ifade etmektedir.

$$N_r = \frac{r_{N_r} - r_1}{\Delta r} + 1 \quad (4.4)$$

$$N_\theta = \frac{\theta_{N_\theta} - \theta_1}{\Delta \theta} + 1 \quad (4.5)$$

$$N_\phi = \frac{\phi_{N_\phi} - \phi_1}{\Delta \phi} + 1 \quad (4.6)$$

t_1 ilk tomografi saati ve t_{N_t} son tomografi saatidir. Δt zamanda çözünürlüğü ifade etmektedir. Zaman indeksi n_t Eşitlik 4.7 ile tanımlanmaktadır.

$$t_{n_t} = t_1 + n_t \Delta t \quad (4.7)$$

n_t , $1 \leq n_t \leq N_t$ olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Bir gün içinde yer alan zaman aralıklarının sayısının indeks aralığı olarak tanımlanan N_t değeri Eşitlik 4.8 ile ifade edilebilmektedir.

$$N_t = \frac{t_{N_t} - t_1}{\Delta t} + 1 \quad (4.8)$$

Geriçatma probleminde kullanılan toplam hücre sayısı Eşitlik 4.9 ile hesaplanmaktadır.

$$N_l = N_r N_\theta N_\phi N_t \quad (4.9)$$

Leksikografik indeksleri ile her bir hücrenin numaralandırılması sayesinde yükseklik, enlem, boylam ve zamanda 4-B iyonküre, 1-B vektör ile ifade edilebilmektedir. Leksikografik indeks, $n_l = [n_r, n_\theta, n_\phi, n_t]$, Eşitlik 4.10 ile hesaplanmaktadır.

$$n_l = n_r + (n_\phi - 1)N_r + (n_\theta - 1)N_r N_\phi + (n_t - 1)N_r N_\phi N_\theta, \quad 1 \leq n_l \leq N_l \quad (4.10)$$

Uzay ve zamanın sürekli bir fonksiyonu olan iyonküre elektron yoğunluğu, 3-B hücresel iyonküre modelinde d günü ve h saati için Eşitlik 4.11 kullanılarak ayırık bir fonksiyon olarak yazılabilmektedir.

$$e_{d,h}[n_l] = e[n_r, n_\phi, n_\theta; n_t] \quad (4.11)$$

d ve h tomografinin gerçekleştiği gün ve zamanı ifade etmektedir. Eşitlik 4.11 ile her bir hücre için tanımlanan elektron yoğunluğu, 3-B uzayda Eşitlik 4.12 kullanılarak vektör olarak ifade edilebilmektedir.

$$\underline{e}_{d,h} = \begin{bmatrix} e_{d,h}[1] & \dots & e_{d,h}[n_l] & \dots & e_{d,h}[N_l] \end{bmatrix}_{N_l \times 1}^T \quad (4.12)$$

T transpoze operatörünü ifade etmektedir. Seçilen N_d gün için iyonküre modeli ile hesaplanan elektron yoğunluğu değerleri kullanılarak tomografinin gerçekleştirileceği gün ve saat için model matris Eşitlik 4.13 ile oluşturulmaktadır.

$$\underline{\underline{G}}_{d,h} = \begin{bmatrix} e_{d_1,h} & \dots & e_{n_d,h} & \dots & e_{N_d,h} \end{bmatrix}_{N_l \times N_d}^T \quad (4.13)$$

TDA yöntemi model matrisi fiziksel taban fonksiyonlarına ayrıştırarak elde edilen tekil değerleri kullanarak enerjiyi en iyilerken kullanılacak taban vektör sayısını en aza indirmektedir. TDA yöntemi ile BİT sırasında model matris, $\underline{\underline{G}}_{d,h}$, üç farklı matrise ayrıştırılmaktadır.

$$\underline{\underline{G}}_{d,h} = \underline{\underline{U}}_{N_l \times N_d} \underline{\underline{\Sigma}}_{N_d \times N_d} \underline{\underline{V}}_{N_d \times N_d}^T \quad (4.14)$$

$\underline{\underline{U}}_{N_l \times N_d}$ ve $\underline{\underline{V}}_{N_d \times N_d}^T$ dikgen matrislerdir ve sırasıyla, $\underline{\underline{G}}_{d,h}$ matrisinin sol ve sağ tekil matrisleridir. TDA ile hesaplanan sol ve sağ tekil matrisler, iyonküre elektron yoğunluğunun uzay ve zamandaki değişimini yakalayan dikgen taban fonksiyonlarını kapsamaktadır. $\underline{\underline{\Sigma}}_{N_d \times N_d}$ köşegen matristir ve köşegen elemanları, $\underline{\underline{G}}_{d,h}$ matrisinin tekil değerlerini içermektedir.

$$\underline{\underline{\Sigma}}_{N_d \times N_d} = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{N_s}, \dots, \sigma_{N_d}) \quad (4.15)$$

$\underline{\underline{\Sigma}}_{N_d \times N_d}$ köşegen matrisi içerisindeki tekil değerler sırasıyla azalmaktadır.

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_{N_s} \geq \dots \geq \sigma_{N_d} \geq 0 \quad (4.16)$$

Tekil değerler, model matrisi içerisinde karşılık geldikleri taban vektörlerindeki enerji hakkında bilgi vermektedir. Tekil değerlerin sıralı olarak azalan enerji içeriği kullanılarak matris, sinyal alt uzayı ve gürültü alt uzayına ayrıştırılabilmektedir. Sinyal alt uzayına karşılık gelen taban vektörlerine ait tekil değerler, toplam enerjiye yaptıkları anlamlı katkılar ile ayırt edilebilmektedir. Bu nedenle anlamlı tanımı, bir eşik değerinin üzerindeki enerji seviyesini ifade etmektedir. Bu eşik sinyal alt uzayını, gürültü alt uzayından ayırmaktadır. Anlamlı tekil değerlerin sayısı N_s ile gösterilmektedir. Gürültü uzayına karşılık gelen matris elemanları çıkarılarak sinyal gürültüden arındırılabilir. Eşitlik 4.16 'deki σ_1 ile σ_{N_s} arasındaki tekil değerler sinyal alt uzayını, σ_{N_s+1} ile σ_{N_d} arasındaki tekil değerler ise gürültü alt uzayını ifade etmektedir. Sol tekil matris, $\underline{\underline{U}}_{N_l \times N_d}$, iyonküre elektron yoğunluğu yapısının uzamsal yapısını kapsamaktadır. Elektron yoğunluğu, $\underline{\underline{U}}_{N_l \times N_d}$ ile katsayı vektörü $\underline{\underline{\alpha}}_{N_d \times N_1}$ kullanılarak Eşitlik 4.17 ile oluşturulabilmektedir.

$$\underline{\underline{e}}_{d,h} = \underline{\underline{U}}_{N_l \times N_d} \underline{\underline{\alpha}}_{N_d \times 1} \quad (4.17)$$

Tekil değerler incelenerek sinyal uzayı enerjisinin toplam enerjiye oranı Eşitlik 4.18 ile hesaplanmaktadır.

$$E(N_s) = \frac{\sum_{n_d=1}^{N_s} \sigma_{n_d}^2}{\sum_{n_d=1}^{N_d} \sigma_{n_d}^2} \times 100(\%) \quad (4.18)$$

$\underline{\underline{U}}_{N_l \times N_d}$ matrisinde seçilen anlamlı tekil değerlere karşılık gelen sütunlar kullanılarak $\underline{\underline{G}}_{d,h}$ matrisinin dikgen taban fonksiyonları belirlenmekte ve elektron yoğunluğu Eşitlik 4.19 ile ifade edilebilmektedir.

$$\tilde{e}_{d,h} = \underline{\underline{U}}_{N_l \times N_s} \alpha_{N_s \times 1} \quad (4.19)$$

$\alpha_{N_s \times 1}$ seçilen taban vektörlerinin katsayı vektörüdür. BİT sırasında YKS uydu ve alıcı çiftleri arasındaki ETEİ değerleri, belirli hücrelerden geçen ışınların hücre içerisindeki elektron yoğunluğu ile ağırlıklandırılmış birikimli yol uzunlukları olarak tanımlanmaktadır. $\underline{\underline{A}}_{d,h}$ matrisinin içerisinde N_p adet YKS uydu ve alıcı çifti arasındaki işaretlerin hücrelerden geçerken kat ettikleri mesafe değeri yazmaktadır. L işaretlerin hücrelerden geçerken kat ettikleri uzunluk değeridir. İşaretlerin geçmedikleri hücreler için $\underline{\underline{A}}_{d,h}$ matrisine sıfır yazılmaktadır.

$$A_{d,h}(n_p(n_t), n_l) = \begin{cases} L(n_p(n_t), n_l), & \text{eğer } n_l \text{ hücresinden geçiyorsa} \\ 0, & \text{eğer } n_l \text{ hücresinden geçmiyorsa} \end{cases} \quad (4.20)$$

$$(\underline{\underline{A}}_{d,h})_{N_p \times N_l} = \begin{bmatrix} A_{d,h}(1,1) & \cdots & A_{d,h}(n_p(n_t), N_l) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{d,h}(N_p(n_t), 1) & \cdots & A_{d,h}(N_p(n_t), N_l) \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Seçilen gün ve saat için uydu ve istasyonlara ait veriler kullanılarak elde edilen ETEİ verileri ile $\underline{y}_{d,h}$ vektörü oluşturulmaktadır. 3-B iyonküre modelinde, $\underline{y}_{d,h}$ vektörü ve elektron yoğunluğu arasındaki ilişki Eşitlik 4.22 'de verilmiştir.

$$(\underline{y}_{d,h})_{N_p \times 1} = (\underline{\underline{A}}_{d,h})_{N_p \times N_l} (\tilde{e}_{d,h})_{N_l \times 1} \quad (4.22)$$

$\tilde{e}_{d,h}$ yerine $\tilde{\underline{\underline{U}}}_{N_l \times N_s} \alpha_{N_s \times 1}$ yazılarak Eşitlik 4.23 elde edilmektedir.

$$(\underline{y}_{d,h})_{N_p \times 1} = (\underline{\underline{A}}_{d,h})_{N_p \times N_l} \underline{\underline{U}}_{N_l \times N_s} \alpha_{N_s \times 1} \quad (4.23)$$

Ölçüm matrisi Eşitlik 4.24 ile oluşturulmaktadır.

$$\underline{\underline{\mathbf{B}}}_{N_p \times N_s} = (\underline{\underline{\mathbf{A}}}_{d,h})_{N_p \times N_l} \underline{\underline{\mathbf{U}}}_{N_l \times N_s} \quad (4.24)$$

Eşitlik 4.23 ve 4.24 kullanılarak taban bileşenleri ile ifade edilen elektron yoğunluğu Eşitlik 4.25’de verilmiştir.

$$(\underline{\underline{y}}_{d,h})_{N_p \times 1} = \underline{\underline{\mathbf{B}}}_{N_p \times N_s} \underline{\underline{\alpha}}_{N_s \times 1} \quad (4.25)$$

Taban katsayıları, $\hat{\underline{\underline{\alpha}}}_{N_s \times 1}$, Enaz Kareler Kestirimi yöntemi ile kestirilmektedir.

$$\hat{\underline{\underline{\alpha}}}_{N_s \times 1} = \min_{\underline{\underline{\alpha}}} ((\underline{\underline{y}}_{d,h} - \underline{\underline{\mathbf{B}}}_{N_p \times N_s} \underline{\underline{\alpha}}_{N_s \times 1})^T (\underline{\underline{y}}_{d,h} - \underline{\underline{\mathbf{B}}}_{N_p \times N_s} \underline{\underline{\alpha}}_{N_s \times 1})) \quad (4.26)$$

$$\hat{\underline{\underline{\alpha}}}_{N_s \times 1} = (\underline{\underline{\mathbf{B}}}_{N_p \times N_s}^T \underline{\underline{\mathbf{B}}}_{N_p \times N_s})^{-1} \underline{\underline{\mathbf{B}}}_{N_p \times N_s}^T \underline{\underline{y}}_{d,h} \quad (4.27)$$

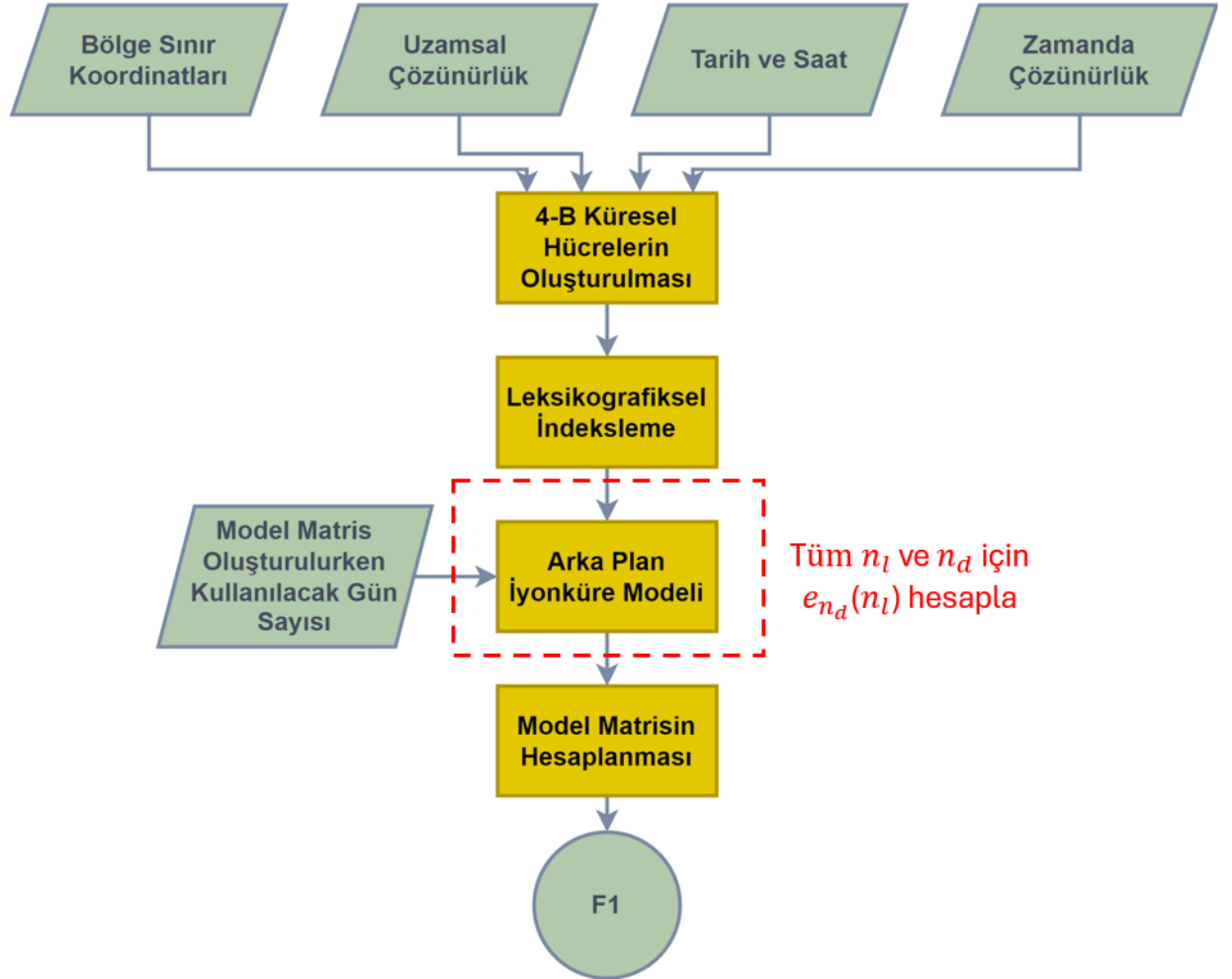
Kestirilen taban katsayıları ve taban vektörleri kullanılarak elektron yoğunluğu yeniden yapılandırması Eşitlik 4.28 ile gerçekleştirilmiştir.

$$\hat{\underline{\underline{e}}}_{d,h} = \underline{\underline{\mathbf{U}}}_{N_l \times N_s} \hat{\underline{\underline{\alpha}}}_{N_s \times 1} \quad (4.28)$$

IONOLAB-Fusion algoritmasında, yeryüzü alıcı istasyonları ile AYY uyduları üzerindeki alıcılar ile sanal dikey ve yatay yollar kullanılarak hem küresel hem de bölgesel elektron yoğunluğu yeniden yapılandırması için 4-B iyonküre elektron yoğunluğu geriçatmasını gerçekleştirilmektedir. IONOLAB-Fusion algoritmasının uygulaması dört alt bölümde detaylandırılmıştır. Bölüm 4.1’de model matrisin oluşturulması anlatılmaktadır. Bölüm 4.2’de oluşturulan model matrise TDA yöntemi uygulanmıştır. Bölüm 4.3’de ölçüm vektörü ve örnekleme matrisinin oluşturulması detaylandırılmıştır. Son olarak Bölüm 4.4 ’de elektron yoğunluğu kestirimi anlatılmıştır.

4.1 Arka Plan İyonküre ve Model Matrisinin Oluşumu

Bu bölümde model matrisinin oluşturulma yöntemi anlatılmaktadır. Model matrisi oluşturulurken izlenecek adımlar Şekil 4.2'deki akış şeması F1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.2: Model matrisin oluşum adımlarını gösteren akış şeması F1.

Model matrisi oluşturma algoritması, Algoritma 4.1'de ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

Algoritma 4.1 Model Matrisin Oluşturulması

Girdiler: İyonküre modelinden hesaplanan elektron yoğunluğu,

Çıktılar: Model matris ($\underline{G}_{d,h}$).

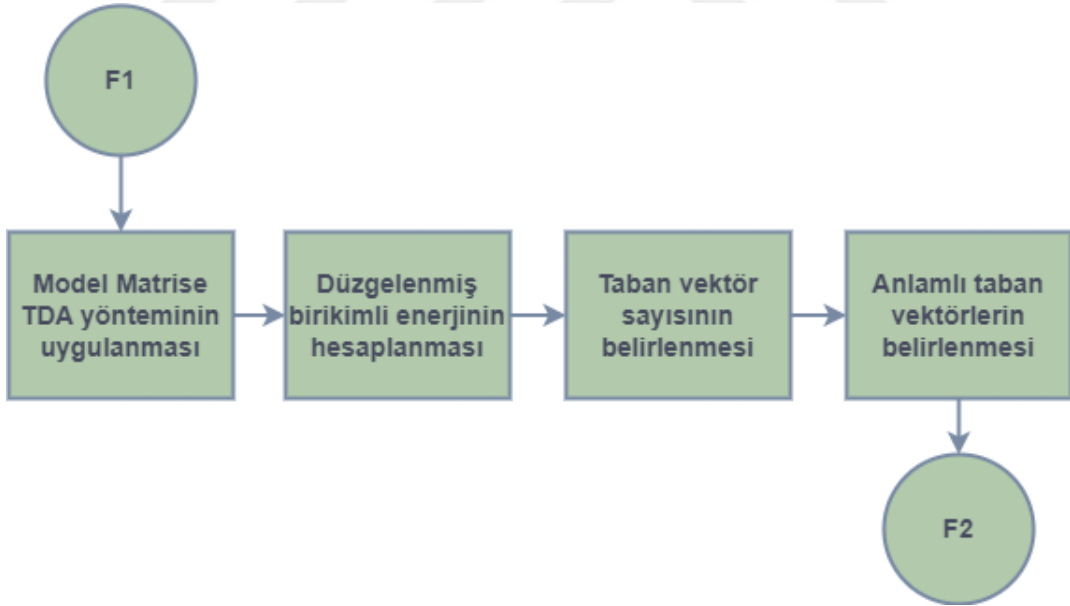
1. 3-B bölgeyi tanımlayan enlem, boylam ve yükseklik için başlangıç ve bitiş değerleri, (θ_1, ϕ_1, r_1) ile $(\theta_{n_\theta}, \phi_{n_\phi}, r_{n_r})$ sırasıyla tanımlanır;
2. Seçilen bölge için enlem, boylam ve yükseklik çözünürlükleri, $(\Delta\theta, \Delta\phi, \Delta r)$, tanımlanır. Yükseklik çözünürlükleri (r_1, r_{n_r}) arasında farklı değerler alabilmektedir;
3. Tomografinin gerçekleştirileceği tarih ve saatler girilir;
4. Zamansal çözünürlük, Δt , girilir;
5. 4-B iyonküre, her bir n_t için Eşitlik 4.1-4.6 kullanılarak enlem, boylam ve yükseklikte seçilen çözünürlüklerde belirtilen bölge içerisinde 3-B küresel hücrelerin kombinasyonu olarak modellenir;
6. Her n_t için küresel hücreler Eşitlik 4.10 kullanılarak leksikografiksel sıralamaya göre indekslenir;
7. Model matrisin oluşturulacağı N_d gün sayısı tanımlanır;
8. Her bir n_t için elektron yoğunluğu, iyonküre modeli ile hesaplanarak Eşitlik 4.12'deki gibi tanımlanır;
9. Model matris, N_d gün için hesaplanan elektron yoğunluğu kullanılarak Eşitlik 4.13 ile oluşturulur.

Algoritma, girilen enlem ve boylam sınır değerlerini kullanarak bölgenin tanımlanması ile başlamaktadır. Kullanıcı, yükseklik değerlerini düzenli veya düzensiz aralıklı belirli çözünürlüklerde girebilmektedir. Düzenli aralıklar için yükseklik aralığı r_1 'den başlamakta ve çözünürlük eşit Δr km ile r_{N_r} değerine kadar uzanmaktadır. Düzensiz aralıklar için kullanıcı tarafından tanımlanan farklı yükseklik aralıklarında farklı çözünürlükler istenilen değerlerde ayarlanabilmektedir. Kullanıcının yükseklik ve çözünürlük değeri belirtmediği durumda bu değerler International Reference Ionosphere Extended to Plasmasphere (IRI-Plas) modelinde kullanılan değerler olarak tanımlanmaktadır. Tomografinin gerçekleştirileceği tarih ve saatler

girildikten sonra yükseklik, enlem, boylam ve zaman çözünürlükleri belirtilerek iyonküre 4-B küresel hücrelere ayrılmaktadır. Eşitlik 4.1-4.6 kullanılarak 4-B iyonküre, leksikografiksel sıralama ile 1-B vektör ile temsil edilebilmektedir. Kullanıcı, model matris oluşturulurken kullanılacak N_d gün sayısını girebilmektedir. Her bir hücre için elektron yoğunluğu geriçatması için gerekli ön bilgi, girilen N_d için iyonküre modeli kullanılarak hesaplanmakta ve Eşitlik 4.10'de verilen leksikografiksel sıraya göre düzenlenmektedir. Model matris, kullanıcının seçime bağlı olarak farklı yöntemler ile oluşturulabilmektedir. Model matris oluşturulurken kullanılacak günler, benzer güneş aktivitesine sahip günler kullanılarak belirlenmekte veya N_d gün geriye gidilerek seçilebilmektedir. Alternatif olarak kullanıcı model matris oluşturmak için kullanmak istediği günler liste olarak algoritmaya girebilmektedir. Model matris oluşturma yöntemleri ve sonuçların karşılaştırılması Bölüm 6'da verilmiştir.

4.2 Tekil Değer Ayrıştırmasının (TDA) Model Matrisine Uygulanması

Taban vektörleri hesaplamak için model matrise Tekil Değer Ayrışımı (TDA) yöntemi uygulanmaktadır. İzlenecek adımlar Şekil 4.3'deki akış şeması F2'de verilmiştir.



Şekil 4.3: Model matrisine TDA yönteminin uygulama adımlarını gösteren akış şeması F2.

TDA yönteminin model matrisine uygulanması Algoritma 4.2'de ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

Algoritma 4.2 Anlamalı tekil değerlerin, $\sigma_1 \dots \sigma_{n_s}$ ve bunlara karşılık gelen taban vektörlerinin, $\underline{U}_{N_l \times N_s}$, belirlenmesi

Girdiler: Model matrisi.,

Çıktılar: Tekil değerler ve taban vektörleri.

1. Sütun uzayı taban vektör kümesini, $\underline{U}_{N_l \times N_d}$ ve tekil değerleri, $\sigma_1 \dots \sigma_{n_d}$, hesaplamak için model matrise Eşitlik 4.14 kullanılarak TDA yöntemi uygulanır;
 2. Her bir N_d sinyal alt uzay seçimi için düzgelenmiş birikimli enerji Eşitlik 4.18 ile hesaplanır;
 3. Düzgelenmiş birikimli enerji değerleri ve tekil değerler kullanılarak anlamlı taban vektör sayısına, N_s , karar verilir;
 4. Sütun uzayı temel vektör setinden, bir dizi fiziksel temel vektör, N_s , seçilir.
-

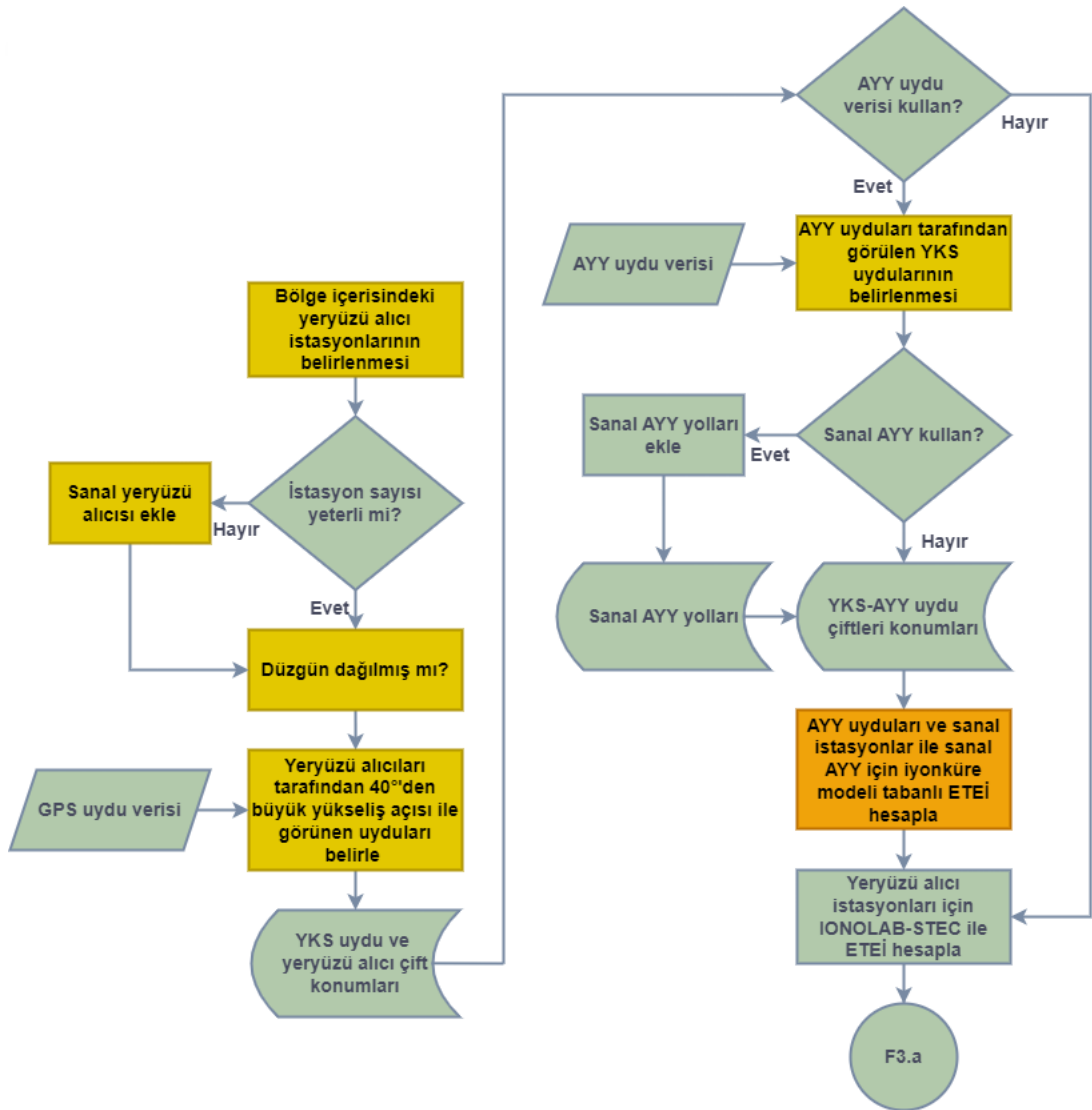
TDA yöntemi, sütun uzayı taban vektörleri, $\underline{U}_{N_l \times N_d}$, ve taban vektörlerin katkısını gösteren tekil değerlerini, $\sigma_1 \dots \sigma_{n_s}$, hesaplamak için Eşitlik 4.14'de verildiği üzere F1'de oluşturulan model matrisine uygulanır. N_d tekil değer her biri için birikimli enerji hesaplanarak Eşitlik 4.18 ile toplam enerjiye göre düzgeleştirilir ve anlamlı tekil değer sayısına, N_s karar verilir. $\underline{U}_{N_l \times N_d}$ 'den N_s adet sütun seçilerek yeniden yapılandırmada kullanılacak fiziksel taban vektörler, $\underline{U}_{N_l \times N_s}$, oluşturulur.

4.3 Ölçüm Vektörünün ve Örneklem Matrisinin Oluşturulması

IONOLAB-Fusion iyonküre elektron yoğunluğu tomografisi için yeryüzü alıcı istasyon ve YKS uydu çiftleri ile AYY ve YKS uydu çiftlerini kullanmaktadır. Ölçüm vektörü YKS uydu ve alıcı çiftleri arasındaki ETEİ değerlerini kullanılarak oluşturulmaktadır. IONOLAB-Fusion algoritması ile YKS uydu ve alıcı çiftleri arasındaki ışınların iyonküreden geçerken izledikleri yol boyunca geçtikleri hücrelerde kat ettikleri mesafe hesaplanarak örneklem matrisi oluşturmaktadır. IONOLAB-Fusion, YKS uydu ve alıcı çiftleri arasındaki ışınların küresel hücrelerden geçerken takip etmek için arka planda ışın izleme algoritması olan IONOLAB-RAY tabanlı IONOLAB-mRAY algoritmasını kullanmaktadır [61–64]. IONOLAB-mRAY algoritmasının detayları Bölüm 5'te verilmiştir. YKS uydu ve alıcı çiftlerinin belirlenmesi ve IONOLAB-STEC ile IRI-Plas-mSTEC yöntemleri ile ETEİ değerlerinin hesap-

lanarak ölçüm vektörünün oluşturulması süreci Şekil 4.4’de verilen akış şeması F3.a’da özetlenmiştir. IRI-Plas-mSTEC yöntemleri algoritmasının detayları Bölüm 5’de verilmiştir. YKS uydusu ve alıcı çiftleri arasındaki ışın yollarının izlenmesi ve örnekleme matrisinin oluşturulması süreci 4.5’de akış şeması F3.b’de detaylandırılmıştır. F3.a ve F3.b akış şemalarında, IONOLAB-mRAY algoritmasının kullanıldığı adımlar sarı ile, IRI-Plas-mSTEC algoritmasının kullanıldığı adımlar turuncu ile belirtilmiştir.

Yeryüzü alıcıları ile YKS uyduları ve AYY-YKS uydusu çiftlerinin belirlenerek ETEİ verilerinin hesaplanması ve ölçüm vektörünün oluşturulması süreci Şekil 4.4’de F3.a akış şemasında verilmiştir.



Şekil 4.4: Ölçüm vektörünün oluşturulma adımlarını gösteren akış şeması F3.a.

Ölçüm vektörü oluşturma algoritması Algoritma 4.3'te ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

Algoritma 4.3 Ölçüm Vektörünün Oluşturulması

Girdiler: Yeryüzü alıcı istasyon konumları ve YKS ile AYY uydu verileri,

Çıktılar: Yeryüzü alıcıları ve YKS uydu ile AYY-YKS uydu çiftleri ve ölçüm vektörü, $\underline{y}_{d,h}$.

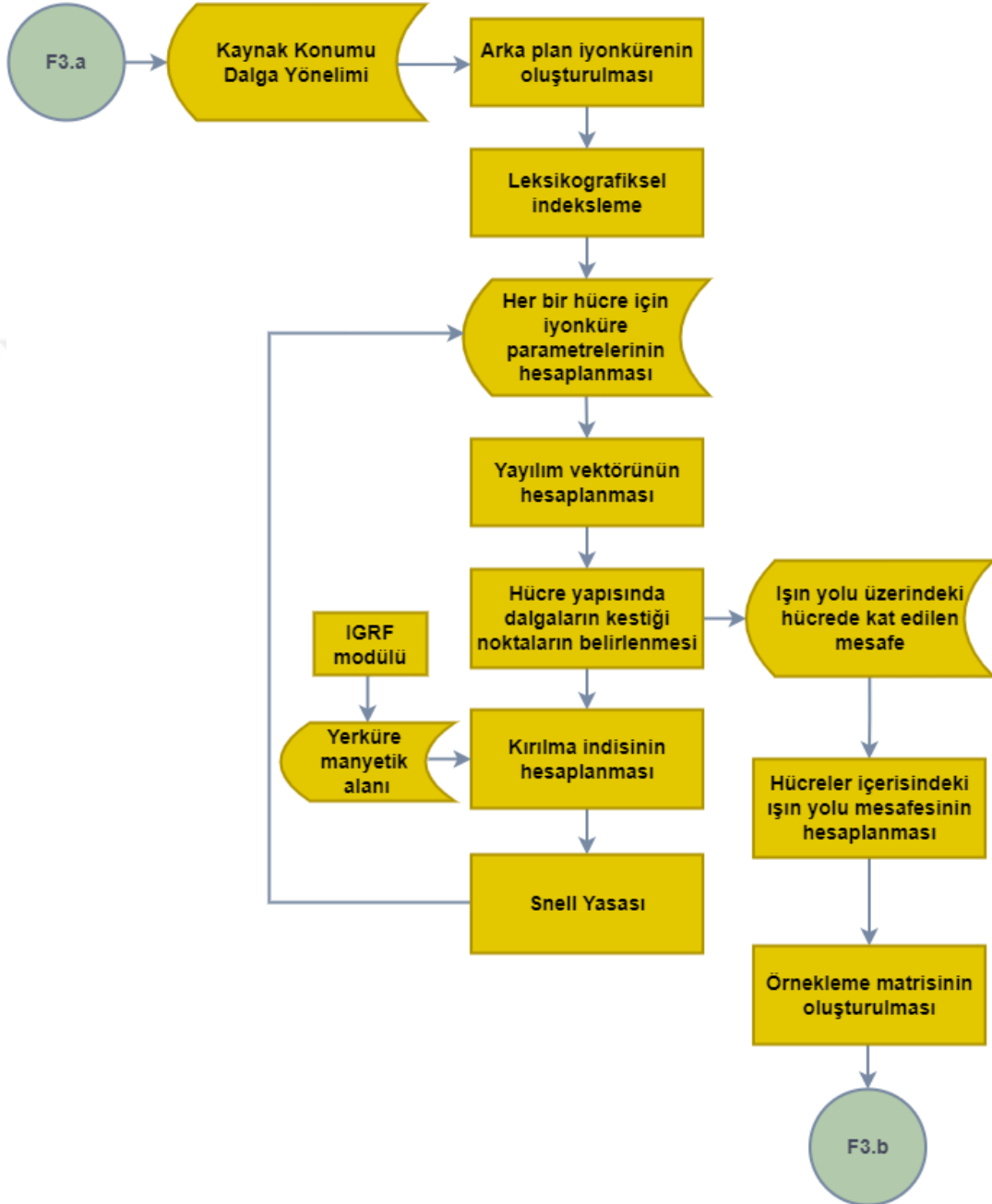
1. Tanımlanan bölge içerisindeki yeryüzü alıcı istasyonları tespit edilir;
 2. Bölge içerisindeki istasyon dağılımının düzenli örnekleme yapmak için yeterli olup olmadığı değerlendirilir;
 3. Bölge içerisinde yeryüzü alıcı istasyonu yoksa veya mevcut istasyonların sayısı düzenli dağılım için yeterli değilse seyrek alanlar için sanal alıcılar eklenir;
 4. Yeryüzü alıcı istasyonlarına ve sanal istasyonlar düzenli karesel örnekleme yapılır;
 5. YKS yörünge verileri otomatik olarak indirilir;
 6. Her bir yeryüzü alıcı istasyonu ve sanal istasyonlar tarafından 40° 'den büyük yükseliş açısı ile görülen YKS uyduları tespit edilir;
 7. Yeryüzü alıcı istasyonu ile YKS uydu ve sanal istasyon ve YKS uydu çiftleri kaydedilir;
 8. Kullanıcıdan tomografiye AYY uydularını dahil etmek isteyip istemedikleri sorulur;
 9. AYY uyduları için yörünge verileri otomatik olarak indirilir;
 10. AYY uydularının görüş hattı içerisindeki YKS uyduları tespit edilir;
 11. Kullanıcıya sanal AYY ışınlarının tomografiye dahil edilme seçimi sunulur;
 12. Yeryüzü alıcı istasyonu ve YKS uydu çiftleri arasındaki ETEİ verileri, istasyonlar tarafından kaydedilen alıcı kayıtları kullanılarak hesaplanır; Sanal yeryüzü alıcıları ile YKS uydu çiftleri, AYY-YKS uydu çiftleri ve sanal AYY yolları için ETEİ değerleri, iyonküre modeli tabanlı ETEİ hesaplama algoritması kullanılarak hesaplanır.
-

Alıcı koordinatları, Dünya çapında dağılmış 500'den fazla istasyondan oluşan uluslararası International GNSS Service (IGS)'ten elde edilmektedir [75]. Tanımlanan bölge içerisindeki yeryüzü alıcı istasyonları otomatik olarak tespit edilmektedir. Ayrıca kullanıcı tarafından alıcı listesi ve konumları da girdi olarak alınabilmektedir. YKS alıcılarının düzgün dağılmaması ve bazı bölgelerde bulunmaması nedeniyle BİT sırasında kullanılan veriler, 3-B elektron dağılımı elde edilirken iyonkürenin değişken yapısı modellenmekte yetersiz kalmaktadır. Bu sorunu ele almak için sanal istasyonlar, istasyonların bulunmadığı veya seyrek olduğu bölgelere dahil edilerek alıcıların düzgün dağılması hedeflenmektedir. Ancak sadece yoğun bir alıcı ağından gelen verileri kullanmak, özellikle gürültülü ve birbirleri ile çelişkili verilerin varlığında aşırı uyum sorununa neden olmaktadır. Bu nedenle çok sayıda alıcı olması her zaman en güvenilir sonucu vermemektedir. İstasyon yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelere düzgün dağılım uygulanmaktadır. Bölge içerisindeki en uygun alıcı sayısının belirlenmesi için iki kriterin ele alınması gerekmektedir. Komşu alıcılara ait ışınların aynı hücrelerden geçmemesi sağlanırken, düzenli kare dağılımı ile bölgenin 20%'sini kapsayacak kadar alıcının bölgede bulunması gerekmektedir [76–78]. Algoritma, kullanılabilir veri sayısını dikkate alarak belirlenen bölgedeki YKS alıcı sayısını ve dağılımını otomatik olarak değerlendirmektedir. Eğer çok fazla alıcı varsa, algoritma bunların sayısını azaltmaktadır. Çok az sayıda alıcı olduğu veya hiç alıcı olmadığı durumlarda, örneklemede gerekli örnekleme oranına ulaşmak için bölgeye sanal alıcılar eklenmektedir. Çoklu yol etkilerini azaltmak için sadece 40°'den büyük yükseliş açısına sahip YKS uyduları kullanılmaktadır.

Tomografide, iyonküreye ait yatay bilgi sunan veri kaynaklarının entegre edilmesi dikey çözünürlüğü arttırmaktadır. AYY uydusu temelli gözlemlerin kullanılması veri setini yüksek hassasiyet ve dikey çözünürlük ile tamamlamakta ve iyonkürenin yüksek katmanları hakkında bilgi kazandırmaktadır. Kullanıcı AYY uyduları üzerindeki alıcıları kullanmayı seçerse AYY uydularının görüş hattı içerisindeki YKS uyduları tespit edilerek AYY-YKS uydusu çiftleri oluşturulmaktadır. Kullanıcı uygun bir uzamsal çözünürlüğe sahip sanal AYY yollarını dahil etmeyi seçerse, yatayda sanal AYY ışınları belirtilen bölgeye eklenmektedir. Belirlenen çiftler arasındaki ETEİ değerleri ölçüm matrisini oluşturmak için kullanılmaktadır. Yeryüzü alıcı istasyonları ve YKS uydusu çiftleri arasındaki ETEİ, alıcı istasyonlar tarafından toplanan alıcı kayıtları ve IONOLAB-STEAC algoritması kullanılarak hesaplanmaktadır. Sanal yeryüzü alıcı istasyonları ve YKS uydusu ile AYY-YKS uydusu çiftleri ve sanal AYY ışınları için ETEİ değerleri IRI-Plas-mSTEAC algoritması kullanılarak hesaplanmaktadır. IRI-Plas-mSTEAC al-

goritmasının detayları Bölüm 5’te verilmiştir.

Belirlenen çiftler için örnekleme matrisinin oluşturulmasına yönelik izlenecek adımlar Şekil 4.5’te F3.b’de verilmiştir.



Şekil 4.5: Örnekleme matrisinin oluşturulma adımlarını gösteren akış şeması F3.b.

Örnekleme matrisi oluşturma algoritması Algoritma 4.4'te ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

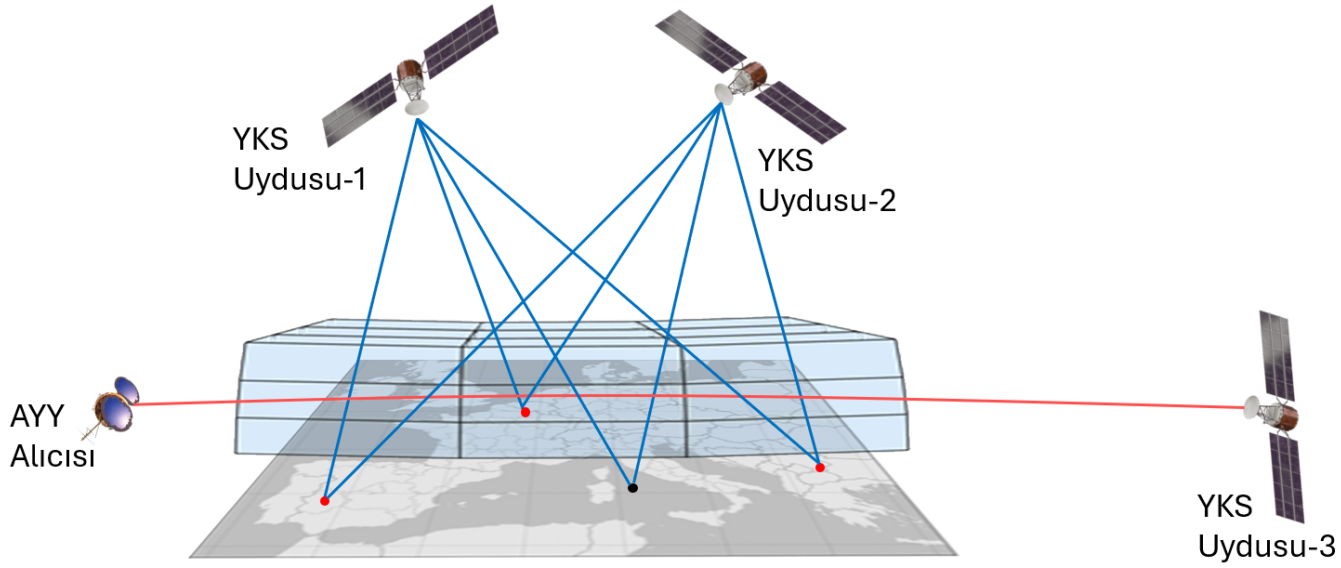
Algoritma 4.4 Örnekleme Matrisinin Oluşturulması

Girdiler: Yeryüzü alıcı istasyon konumları,

Çıktılar: Örnekleme matrisi, $\underline{A}_{d,h}$.

1. F3.a'da tanımlanan YKS uydu ve alıcı çiftleri F3.b'ye yüklenir;
2. Arka plan iyonküre, iyonküre modeli kullanılarak tomografi için belirlenen tarih ve saat için oluşturulur;
3. Arka plan iyonküre leksikografiksel olarak sıralanır;
4. Kırılma indeksinin hesaplanması için gerekli iyonküre parametreleri leksikografiksel indeksleme ile kaydedilir;
5. Dalga yayılım vektörü oluşturulur;
6. Işın yolu ile küresel hücre arasındaki kesişim noktası hesaplanır;
7. Kesişim noktaları leksikografiksel indeksleme ile kaydedilir;
8. Kaydedilen iyonküre parametreleri ve jeomanyetik alan kullanılarak kırılma indeksi hesaplanır;
9. Snell yasası uygulanır ve ışın yayılımı hücreden hücreye hesaplanır;
10. Işın belirlenen bölgeden çıktığında bölge içerisindeki kaydedilen noktalar için hücrelerden geçerken kat ettikleri yol uzunlukları hesaplanır ve bu değerler Eşitlik 4.21'de olduğu gibi ilgili çift ve leksikografiksel indekslere atanarak örnekleme matrisi oluşturulur.

F3.a'da kaydedilen çiftler F3.b'ye yüklenerek kaynak ve alıcı konumları olarak kullanılmaktadır. Arka plan iyonküre bir iyonküre modeli kullanılarak oluşturulmakta ve her bir hücre içerisindeki kırılma indisini hesaplamak için gereken iyonküre parametreleri leksikografiksel olarak sıralanmaktadır.

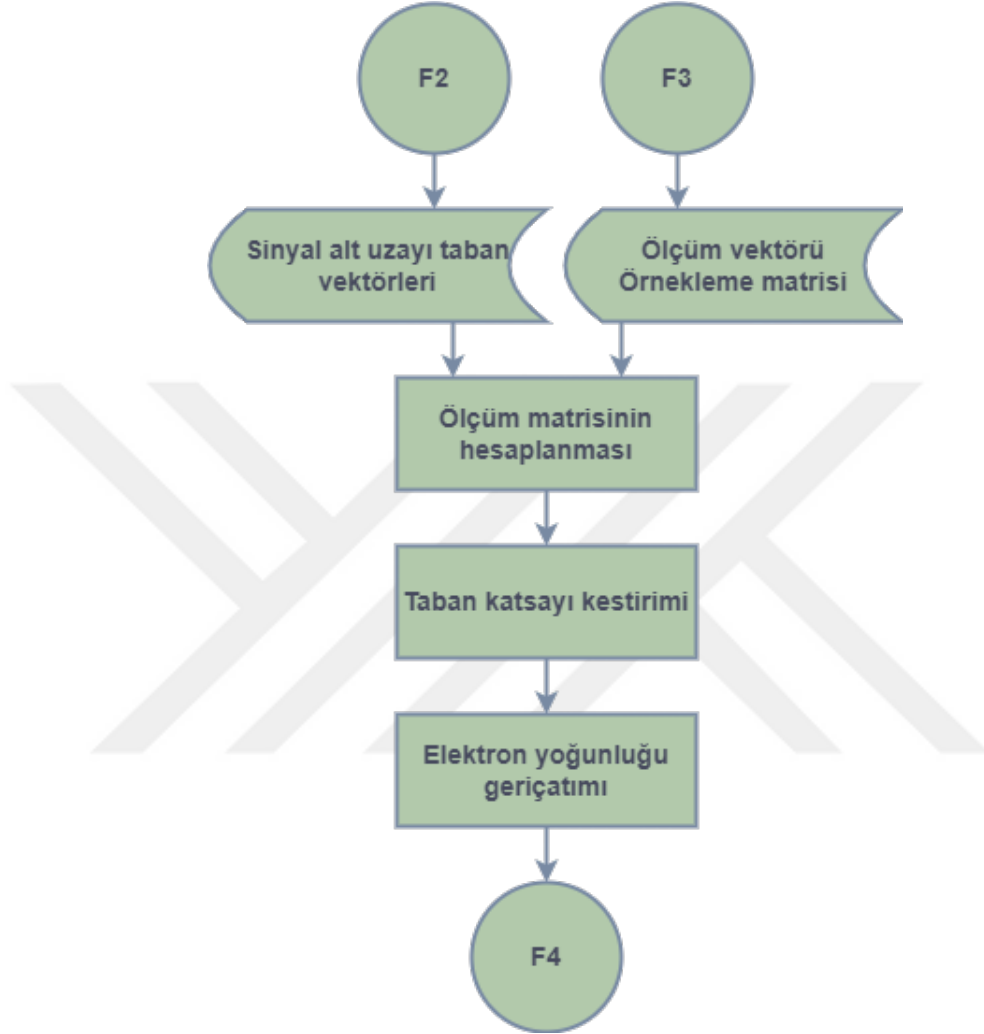


Şekil 4.6: Avrupa bölgesi üzerindeki iyonkürenin 3-B küresel hücreler ile gösterimi. Yeryüzü alıcı istasyonları (●) ile YKS uydu çiftleri ve sanal alıcı (●) ile YKS uydu çifti arasındaki ışınlar ile AYY-YKS uydu çiftleri arasındaki ışınların gösterimi.

Elektromanyetik dalgalar, iyonküreye ulaşana kadar belirtilen yönde serbest uzay koşulları varsayılarak yayılmaktadır. Işın yolu ile küresel hücreler arasındaki kesişme noktaları belirlenmekte ve kaydedilmektedir. Snell yasası uygulanmakta ve ışının yayılım yolu hücreden hücreye takip edilmektedir. Işın yolu boyunca her bir hücre için jeomanyetik alan yönü ile gelen ışının yayılma yönü arasındaki açı hesaplanmaktadır. Kırılma indisi her bir hücre için Appleton-Hartree formülü kullanılarak hesaplanmaktadır [6]. YKS frekanslar L-bandında olduğu için iyonküreye izotropik olarak kabul edilmekte ve sadece normal ışın yolları takip edilmektedir [61–64]. Işınların geçtiği tüm noktalar kaydedilmekte ve ışınlar ilgilenilen bölgeden çıktıktan sonra iyonküreye hücrelerinden geçerken kat ettikleri yol uzunlukları hesaplanmaktadır. Yol uzunluğu ilgili çifti içeren satıra ve ilgili leksikografiksel indeksi içeren sütuna yazılarak Eşitlik 4.21'deki gibi örnekleme matrisi oluşturulmaktadır.

4.4 Geriçatma Algoritmasının Uygulanması

Şekil 4.7’de verilen F4 akış şemasında, F2 ve F3 çıktıları girdi olarak kullanılarak gerçekleştirilen geriçatma algoritmasının detayları verilmiştir.



Şekil 4.7: Elektron yoğunluğu yeniden yapılandırma adımlarını gösteren akış şeması F4.

Yeniden yapılandırma algoritmasının uygulanması Algoritma 4.5’te ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

Algoritma 4.5 Yeniden yapılandırma algoritmasının uygulanması

Girdiler: F2 ve F3 akış çıktıları,

Çıktılar: Elektron yoğunluğu geriçatım sonuçları.

1. F2’de hesaplanan anlamlı tekil değerlere karşılık gelen taban vektörler girdi olarak alınır;
2. F3’te oluşturulan ölçüm vektörü ve örnekleme matrisi girdi olarak alınır;
3. Ölçüm matrisi, sinyal alt uzayı taban katsayıları ve örnekleme matrisi kullanılarak Eşitlik 4.24 ile hesaplanır;
4. Taban katsayıları ölçüm vektörü ve ölçüm matrisi kullanılarak Eşitlik 4.27 ile kestirilir;
5. Kestirilen taban katsayıları ve sinyal alt uzay taban vektörleri kullanılarak iyonküre elektron yoğunluğunun yeniden yapılandırılması Eşitlik 4.28 ile gerçekleştirilir.

F2’de hesaplanan ve sinyal alt uzayını ifade eden anlamlı tekil değerlere karşılık gelen taban vektörleri ve F3’te oluşturulan örnekleme matrisi kullanılarak Eşitlik 4.24 ile ölçüm matrisi hesaplanmaktadır. Eşitlik 4.27 ile ölçüm vektörü ve ölçüm matrisi birlikte kullanılarak taban katsayıları Enaz Kareler Kestirimi yöntemi ile kestirilmektedir. Bölge içerisindeki elektron yoğunluğu yeniden yapılandırması, Eşitlik 4.28’deki gibi her bir hücre için taban vektörleri ve kestirilen taban katsayıları kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

Bölüm 6’da IONOLAB-Fusion algoritması kullanılarak gerçekleştirilen iyonküre elektron yoğunluğu tomografisinin karşılaştırmalı sonuçları sunulmaktadır.

5. BİLGİSAYARLI İYONKÜRE TOMOGRAFİSİNDE KULLANILAN GELİŞTİRİLMİŞ IONOLAB-RAY VE IRI-PLAS-STEÇ ALGORİTMALARI

IONOLAB-RAY, IONOLAB grubu tarafından iyonkürede dalga yayılımının incelenmesi için geliştirilmiş bir ışın izleme algoritmasıdır [61–64]. Literatürde bulunan benzer amaçlı yazılımlar ve iyonogram ölçümleri kullanılarak doğrulanan IONOLAB-RAY algoritması ile öncelikle iyonkürenin düzgün dağılmayan yapısının modellenmesi için ilgilenilen bölgeye ait iyonküre enlem, boylam ve yükseklikte 3-B küresel hücrelere bölünmektedir. İyonküre parametreleri her bir hücre için International Reference Ionosphere Extended to Plasmasphere (IRI-Plas) iyonküre modeli kullanılarak hesaplanmaktadır. Modellenen bölgede enlem, boylam ve yüksekliğe ait çözünürlük değerleri IRI-Plas iyonküre modelinin hesaplama limitleri de dikkate alınarak kullanıcı tarafından belirlenebilmektedir. IONOLAB-RAY algoritmasında, IRI-Plas modeli ile arka plan iyonküre oluşturulurken iyonkürenin yakın gerçek zamanda durumunun temsil edilmesi amacıyla International GNSS Service (IGS) tarafından IONEX formatında sunulan Global Ionospheric Map (GIM)-TEİ haritaları modele girdi olarak verilebilmektedir. Enlem ve boylamda sırasıyla 2.5° ve 5° çözünürlükte sunulan ve periyodu 2 saat olan GIM-TEİ haritaları, seçili bölge ve saat için belirlenen çözünürlüklere uygun olarak aradeğerlenmektedir. Her bir hücre için kırılma indisi, Eşitlik 1.9 ve 1.10'de verilen Appleton-Hartree formülü ile hesaplanmakta ve böylece iyonkürenin yön bağımlı yapısı algoritma içerisinde ele alınmaktadır [6]. Yerküre jeomanyetik vektör bileşenleri, algoritmanın bir parçası olan International Geomagnetic Reference Field (IGRF) modülü tarafından otomatik sağlanmaktadır [79]. Kırılma indisi her bir hücredeki faz ve grup hızının hesaplanmasında kullanılmaktadır. Hücreden hücreye ışınların yansıma ve kırılmaları Snell yasası kullanılarak takip edilmektedir.

Bu tez kapsamında IONOLAB-RAY algoritması temel alınarak haberleşme ve tomografi uygulamalarında kullanılmak üzere esneklik sağlayan IONOLAB-mRAY algoritması geliştirilmiştir. IONOLAB-RAY algoritması üzerinde yapılan geliştirmeler Çizelge 5.1'de özetlenmektedir.

Çizelge 5.1: IONOLAB-RAY algoritması üzerinde yapılan geliştirilmelerin IONOLAB-mRAY algoritması ile karşılaştırmalı açıklaması.

	IONOLAB-RAY	IONOLAB-mRAY
Kaynak ve alıcı konumları	Kaynak ve alıcı konumları yeryüzü üzerinde bulunmaktadır.	Hem kaynak hem de alıcı konumları yerküre üzerinde veya havakürede tanımlanabilmektedir.
Kaynak, alıcı konumları ve bölgenin belirlenmesi	Alıcı ve kaynak konumları ile bu noktaları içerecek şekilde bölge sınırları kullanıcı tarafından girilmektedir.	İlgilenilen bölge sınırları kullanıcı tarafından girilmekte ve bölge içerisinde bulunan YKS alıcı istasyonları 500’den fazla istasyondan oluşan IGS’ten otomatik olarak belirlenmektedir. Bu istasyonlardan optimum örnekleme ile bölge içerisinde düzenli dağılım elde edilmektedir. İlgilenilen tarih ve saat için yörünge bilgileri otomatik olarak indirilerek YKS uydularının konumları belirlenmektedir. Yeryüzü alıcı istasyon ve YKS uydu konumları kullanılarak bölge sınırları otomatik olarak eniyilenmektedir.
Yatay yolların kullanımı	Işınlar yeryüzü kaynaklarından iyonküreye $[0^\circ \ 90^\circ]$ yükseliş açılarında gönderilmekte, yatay yollar takip edilmemektedir.	Kullanıcının AYY takımuydusunu belirtmesi ile AYY yörünge ve RI-NEX verileri otomatik olarak indirilmektedir. AYY uyduları ile görüş hattı içerisindeki YKS uyduları arasında ışınların izlediği yatay yollar takip edilebilmektedir.

Sanal istasyon ekleme	Kaynak ve alıcı noktaları al- goritmaya kullanıcı tarafın- dan girilmektedir.	Alıcı istasyonlarının olmadığı veya seyrek olduğu bölgelerde otomatik olarak düzenli dağılan sanal yer- yüzü alıcıları eklenmektedir. Kulla- nıcının tercih etmesi durumunda sa- nal yatay yollar tanımlanabilmekte- dir.
Arka plan iyonküre modeli	IRI-Plas-2017 kullanılmakta- dır.	IRI-Plas-2020 kullanılmaktadır.
Hesaplanan dalga pa- rametreleri	Zayıflama katsayısı, grup hızı, faz hızı, zaman ge- cikmesi, faraday dönmesi hesaplanmaktadır.	Kaynak ve alıcı çiftleri arasındaki ışınların her bir küresel hücrede- deki giriş ve çıkış noktaları kay- dedilerek hücrelerden geçerken kat ettikleri mesafe hesaplanmaktadır. Hücre içerisindeki elektron yoğun- luğu ve hesaplanan mesafe değer- lerinin yol boyunca çarpılarak biri- kimli toplanması ile ETEİ hesapla- nabilmektedir.
Yazılım Özellikleri	Sınırları belirlenen bir bölge, tarih ve saat için çalışmakta- dır.	Otomatik olarak eniyilenen bölgede kullanıcı tarafından belirlenen tarih ve saat veri seti için döngü içeri- sinde çalışmaktadır.

IONOLAB-mRAY algoritmasının, IONOLAB-Fusion algoritmasında kullanım yerleri Bölüm 4'te akış şemalarında sarı ile belirtilmiştir. IONOLAB-mRAY algoritmasının uygulama sonuçları Bölüm 6'da verilmiştir.

Krigleme yöntemi ile seçilen bir noktanın değeri, çevre ölçüm noktalarına ait değerler ve bu noktaların birbirleri arasındaki uzaklığa bağlı ilinti kullanılarak doğrusal ağırlıklandırma ile kestirilmektedir [78, 80]. IONOLAB grubu tarafından geliştirilen IONOLAB-MAP yönteminde iki aşamada aradeğerleme yapılmaktadır [81]. İlk aşamada uzaklığın karesi ile ters orantılı ağırlıklandırma, ikinci aşamada Ortalamasız Krigleme ile aradeğerlendirme yapılmaktadır. [82] çalışmasında, IONOLAB-MAP yöntemini kullanılarak uzay zamanda bir veri seti üzerinden Eş-Krigleme yöntemini uyumlandırmıştır. Eş-Kriglemede, iyonosondalardan elde edilen foF2 ve YKS alıcı kayıtlarından IONOLAB-TEC ile kestirilen TEİ verileri birlikte kullanılmıştır. Yüksek çözünürlüklü foF2 haritası elde etmek amacıyla foF2 verisi birinci modalite ve TEİ verisi ikinci modalite olarak belirlenerek IONOLAB-CK yöntemi geliştirilmiştir [82]. IONOLAB-CK yönteminde iki aşamalı krigleme yapılmaktadır. İlk aşamada iki modalite için ayrı ayrı Ortalamasız Krigleme ile aradeğerleme yapıldıktan sonra iki modalitenin verilerinin Eş-Kriglenmesi sonucunda yüksek çözünürlüklü birinci modalite haritaları elde edilmektedir.

IRI-Plas-STEÇ, iyonküre modeli tabanlı bir Eğik Toplam Elektron İçeriği (ETEİ) hesaplama yöntemidir. IONOLAB grubu tarafından geliştirilen IRI-Plas-STEÇ algoritması ile ETEİ hesaplanırken 80 km'den 20,200 km'ye kadar uzanan iyonküre ve plazmaküre yatayda, 80 km'den 600 km'ye kadar 10 km, 600 km'den 1,300 km'ye kadar 100 km, 1,300 km'den 20,200 km'ye kadar 500 km çözünürlüklü yükseklikteki adımlar ile katmanlara ayrılarak yeryüzü alıcıları ile YKS uyduları arasındaki sinyallerin ilgili katman içerisinde kat ettiği eğik yol uzunluğu belirlenmekte ve IRI-Plas modeli kullanılarak katman için elektron yoğunluğu hesaplanmaktadır. Uydu ve alıcı istasyonları arasındaki ETEİ değerleri, her bir katmanın elektron yoğunluğuna katkısı ile katmanlar içerisindeki eğik yol uzunluğunun çarpılıp birikimli olarak toplanması ile elde edilmektedir. İyonkürenin sakin günlerinde IRI-Plas-STEÇ ile hesaplanan ETEİ değerleri ile YKS alıcı kayıtlarından kestirilen ETEİ değerlerinin uyumlu olduğu belirlenmiştir [83–85].

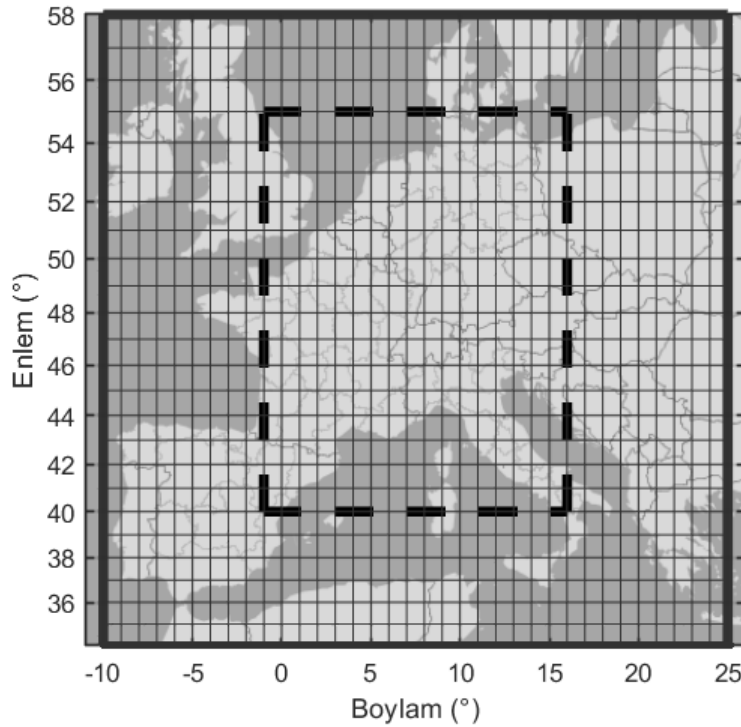
Bu tez çalışmasında, IRI-Plas-STEÇ algoritması AYY uyduları üzerindeki alıcılar ile hesaplamak üzere geliştirilerek IRI-Plas-mSTEÇ algoritması oluşturulmuştur. IRI-Plas-mSTEÇ

algoritmasında iyonküre, katman yükseklikleri AYY uydu yüksekliğini içerecek şekilde değerlendirilerek katmanlara ayrılmıştır. AYY ve YKS uyduları arasındaki yanca ve yükseliş açıları belirlenerek ve AYY uydusu başlangıç noktası olarak seçilerek eğik yol hesaplanmaktadır. YKS-AYY uyduları arasındaki katmanlarda eğik yol boyunca elektron yoğunluğu katman yüksekliği ile çarpılarak birikimli olarak toplanmakta ve ETEİ değerleri hesaplanmaktadır. IRI-Plas-mSTEC algoritması ile istenilen tarih ile saatlerde AYY takımıydu tercihinin belirtilmesi ve AYY ile YKS uydu numaralarının girilmesi ile ETEİ değerleri otomatik olarak hesaplanmaktadır. IRI-Plas-STEC algoritmasında arka planda iyonküre elektron yoğunluğu hesaplanırken kullanılan IRI-Plas modeline güncel iyonküreyi temsil edebilmek için IONOLAB-MAP ve IONOLAB-CK algoritmaları ile elde edilen yüksek çözünürlüklü TEİ ve foF2 haritaları girdi olarak verilebilmektedir.

IRI-Plas-mSTEC algoritmasının, IONOLAB-Fusion algoritmasında kullanım yerleri Bölüm 4'te akış şemalarında turuncu ile belirtilmiştir. IRI-Plas-mSTEC algoritmasının uygulama sonuçları Bölüm 6'da verilmiştir.

6. BULGULAR

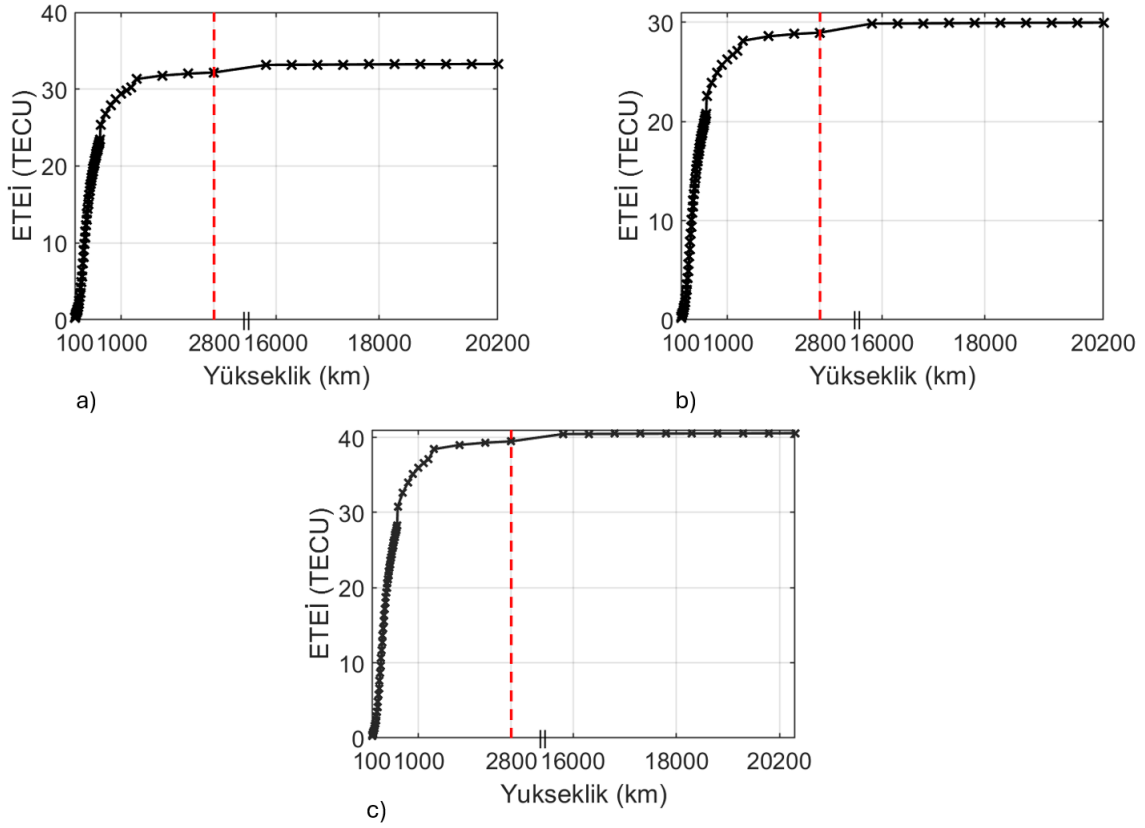
IONOLAB-Fusion algoritmasının uygulamasının yapılması için Kuzey Yarımküre’de, Avrupa’da yer alan bir orta enlem bölgesi seçilmiştir. Avrupa bölgesi yoğun bir YKS yeryüzü alıcı istasyon ağına ve iyonosondalara sahiptir. Bu bölgenin seçilmesi ile algoritma sonuçlarının doğruluğunun iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilleri ve bölgesel YKS-TEİ haritaları ile karşılaştırılarak incelenmesi hedeflenmiştir. İlgilenilen bölge 40°K ile 55°K ve -1°E ile 15°E arasındaki enlem ve boylamları kapsamaktadır. Bu bölge, ilgili bölgede bulunan yeryüzü alıcı istasyonları ile YKS uyduları arasındaki ETEİ yollarının yanı sıra AYY uyduları üzerindeki alıcılar ile YKS uyduları arasındaki yolları da kapsayacak şekilde otomatik olarak genişletilmiştir. Genişletilmiş bölgenin sınırları 34°K ve 58°K enlemleri ile -10°E ve 25°E boylamları arasında yer almaktadır. Böylece YKS uydu ve alıcı çiftleri arasındaki ışınların eğik yollarının yörüngeleri boyunca bölge içinde kalması sağlanarak elektron yoğunluğunun doğru bir şekilde yeniden yapılandırılması amaçlanmıştır. İyonküre, enlem ve boylamda sırasıyla $\Delta\theta = 1^{\circ}$ ve $\Delta\phi = 1^{\circ}$ çözünürlüğe sahip 3-B küresel hücrelere bölünmüştür. İlgilenilen bölge ve genişletilmiş bölge Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1: Kesikli çerçeve, genişletilmiş bölge (siyah çerçeve) içerisindeki ilgilenilen alanı göstermektedir. Bölge enlem ve boylamda 1° çözünürlükte ızgaralara bölünmüştür.

Yükseklikteki çözünürlük değeri, elektron yoğunluğu dağılımının önemine uygun olarak sabit olmayan bir değer olarak seçilebilmektedir. İyonküre, elektron yoğunluğuna bağlı olarak farklı katmanlara ayrılmaktadır [2]. En yüksek iyonlaşma F2 katmanında gerçekleşmektedir ve tepe iyonlaşma yüksekliği h_mF2 ile ifade edilmektedir. Genel olarak, h_mF2 yüksekliği 400 km'den daha küçük değerler almaktadır. İkinci önemli yükseklik sınırı 428.8 km'de bulunan Chapman yüksekliğidir [86]. Chapman yüksekliğinin üzerindeki yüksekliklerde iyonlaşma yüksek bir gradyanla azalmaktadır. İyonosondalar ile 1,000 km'ye kadar dikey elektron yoğunluğu profilleri elde edilebilirken, International Reference Ionosphere (IRI) modeli ile 2,000 km'ye kadar elektron yoğunluğu hesaplanabilmektedir [52, 53]. International Reference Ionosphere Extended to Plasmasphere (IRI-Plas) modeli ile 20,200 km'ye kadar iyonküre elektron yoğunluğu hesaplanabilmektedir [54–56]. Arka plan iyonküre modeli seçimine bağlı olarak kullanıcı tarafından elektron yoğunluğu geriçatma için yükseklik değerleri 80 km ile 20,200 km arasında tanımlanabilmektedir. Bu çalışmada, farklı yükseklikler için ETEİ katkısının hesaplanması için IRI-Plas-STEÇ yöntemi kullanılmıştır [83–85]. IRI-Plas-STEÇ, www.ionolab.org adresinden erişilebilen bir uzay hava durumu hizmeti olarak sunulmaktadır. İlgilenilen bölge için 2,800 km ile 20,000 km arasındaki ETEİ farkının 1 TECU'dan az olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle bu çalışmada yükseklik aralığı 100 km ile 2,800 km arasında seçilmiştir. 4 Nisan 2013 saat 08:00 GS için gope yeryüzü alıcı istasyonu ile PRN 5, PRN 8 ve PRN 10 YKS uyduları arasındaki yüksekliğe bağlı birikimli ETEİ değerleri örnek olarak Şekil 6.2'de verilmiştir.

Yükseklikteki çözünürlük, elektron yoğunluğu dağılımının önemine uygun olarak düzenli aralıklarda veya düzenli olmayan aralıklarda seçilebilmektedir. Bu çalışmada yükseklik çözünürlüğü, 100 km ile 700 km arasında $\Delta r = 10$ km, 700 km ile 1300 km arasında $\Delta r = 100$ km, 1,300 km ile 2,800 km arasında $\Delta r = 500$ km olarak belirlenmiştir. Her bir hücre Eşitlik 4.1-4.6 kullanılarak leksikografiksel sıraya göre dizilmektedir. $n_t = 1$ için toplam hücre sayısı Eşitlik 4.9 kullanılarak $N_t = 55,800$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.2: 4 Nisan 2013 08:00 GS gope yeryüzü alıcı istasyonu ile a) PRN 5, b) PRN 8 ve c) PRN 10 uydusu arasındaki yüksekliğe bağlı birikimli ETEİ değerleri.

Bilgisayarlı İyonküre Tomografisi (BİT) ile iyonküre elektron yoğunluğu yeniden yapılan-
dırması yapılırken iyonküreye ait ön bilgi sunan model matrisinin seçimi büyük önem ta-
şımaktadır. Bu çalışmada iki farklı yaklaşım kullanılarak model matris oluşturulmaktadır.
Bölüm 6.1’de model matris oluşturma yöntemleri anlatılmaktadır.

6.1 Model Matris Oluşturulması

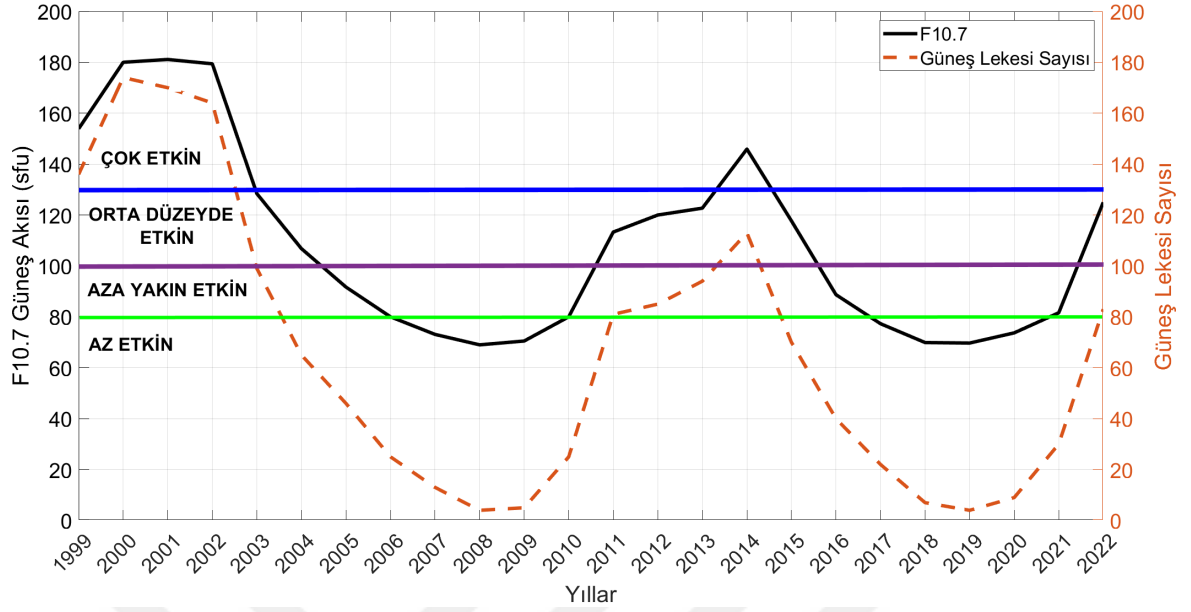
Model matris oluşturulurken kullanılan ilk yaklaşımda model matris, $\underline{G}_1$, seçilen gün ve saat için N_d gün geriye gidilerek Bölüm 4’de Şekil 4.2’de verilen akış şeması F1 ile Algoritma 4.1’de anlatıldığı gibi oluşturulmuştur. Model matris oluşturulurken kullanılacak gün sayısının geriçatma sonuçlarında etkisinin incelenmesi için $N_d = 3, 5, 7, 9$ ve 30 seçilerek incelenmiştir.

Geliştirilen IONOLAB-mRAY ile iyonküre modellenirken arka plan IRI-Plas modeline IONOLAB-MAP ve IONOLAB-CK ile elde edilen yüksek çözünürlüklü TEİ ve foF2 haritaları girdi olarak verilebilmektedir. Bu çalışmada model matris oluşturulurken, IONOLAB-mRAY ile arka plan iyonküre hesaplanırken kullanılan IRI-Plas iyonküre modeline girdi olarak kullanılacak veri setini eniyilemek için elektron yoğunluğu hesaplanırken girdi olarak IONOLAB-MAP ve IONOLAB-CK haritaları kullanılmıştır. En iyi sonucu veren veri setinin ve N_d değerinin belirlenebilmesi için iyonkürenin sakin ve bozulmalı günleri ve günün farklı saatleri için model matris oluşturulmuştur.

Güneş Lekeleri, Güneş üzerinde yoğun manyetik alana sahip bölgelerde oluşan siyah noktalardır. Güneş Lekesi Sayısı (GLS), 11 yıllık Güneş Döngüsü’ne bağlı değişiklik göstermektedir. Manyetik kutuplar güçlü olduğunda GLS artmakta, kutuplar kaymaya başladığında ise azalmaktadır. GLS yüksek olduğu dönemlerde iyonkürede gerçekleşen jeomanyetik fırtına sayısı ile bozulmalar artmaktadır [87]. Güneş Akısı (F10.7) indisi, Güneş tarafından 10.7 cm dalga boyunda (yaklaşık 2800 MHz frekans bandında) yayılan gürültü seviyesini ifade etmektedir. Güneş radyasyonu ve Güneş hareketlilikleri iyonküredeki elektron yoğunluğunu etkileyen başlıca faktörlerdir [88].

İkinci yaklaşımda model matris, seçilen yıl ile benzer Güneş aktivitesi seviyesine sahip yıllardan aynı ay ve saat için veriler kullanılarak oluşturulmuştur. GLS ve F10.7 indislerinin yıllık ortalamaları iyonküreyi sınıflandırmak için kullanılabilmektedir. [89] çalışmasında, 1999 ve 2022 arasındaki yılları GLS ve F10.7 indislerine göre gruplamıştır. Bu zaman dilimi 23. Güneş döngüsünün 9 yılını (1996-2008), 24. Güneş döngüsünün tamamını (2008-2019), 25. Güneş döngüsünün ilk dört yılını (2019-2030) kapsamaktadır. Bu yıllar, Az Etkin (AE), Aza Yakın Etkin (AYE), Orta Düzeyde Etkin (ODE) ve Çok Etkin (COE) olmak üzere dört gruba ayrılmıştır [89]. Şekil 6.3’de 1999 ile 2022 arasındaki yılların F10.7 ve GLS indislerine

göre sınıflandırması yer almaktadır.



Şekil 6.3: F10.7 Güneş akısının ve Güneş Lekesi Sayısı'nın yıllık ortalaması ('<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>'). Siyah eğri F10.7, kırmızı eğri GLS yıllık ortalamasını göstermektedir. F10.7 değeri yeşil doğrunun altında olan yıllar Az Etkin, yeşil ile mor doğru arasında kalan yıllar Aza Yakın Etkin, mor ile mavi doğru arasında kalan yıllar Orta Düzeyde Etkin, mavi doğrunun üstünde olan yıllar Çok Etkin olarak sınıflandırılmıştır [89].

Bu çalışmada, model matrisin oluşturulması için, iyonkürenin hem sakin hem de bozulmalı günlerini içeren ODE yılları seçilmiştir. Model matrisini oluşturmak için Nisan 2003, 2004 ve 2012'ye ait elektron yoğunluğu profilleri kullanılmıştır. Nisan ayı, ilkbahar ekinoksundan yaza geçiş ayı olması ve modellemede zorluklar sunması nedeniyle seçilmiştir. Bu yaklaşım ile oluşturulan model matrisi, $\underline{G}_2$, olarak ifade edilmektedir.

6.2 Ölçüm Vektörü ve Örneklem Matrisi Oluşturulması

Yeryüzü alıcı istasyonlarının yoğun olduğu bölgelerde, yeryüzü alıcı ve YKS uydu çiftleri arasındaki ışınların aynı hücrelerden geçmesini önlemek, aşırı uyum gösterme probleminin önüne geçmek ve hesaplama yükünü azaltma amacıyla bir çalışma yürütülmektedir. Yeryüzü alıcı istasyon sayısı seçici bir şekilde azaltılarak seyreltme sonrasında düzgün bir dağılım elde edilmektedir. Bu çalışmada, ilgilenilen bölgedeki yeryüzü alıcı istasyonları otomatik olarak belirlenmekte ve düzenli dağılan bir alt küme elde etmek amacıyla düzenli kare örneklem yöntemi uygulanmaktadır. İlgilenilen bölge kare alt bölgelere ayrılarak her alt böl-

geden en az bir istasyon seçilmektedir. Düzenli dağılmış örnek alıcı istasyonları belirlemek için öncelikle toplam ızgara nokta sayısı, N_I , N_θ ve N_ϕ kullanılarak Eşitlik 6.1 ile hesaplanmaktadır.

$$\theta_f = \theta_{N_\theta} - \theta_1$$

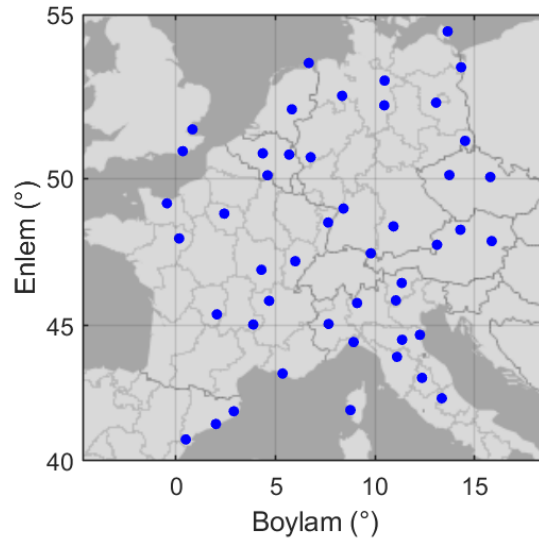
$$\phi_f = \phi_{N_\phi} - \phi_1 \quad (6.1)$$

$$N_I = \left(\frac{\theta_f}{\Delta} + 1 \right) \left(\frac{\phi_f}{\Delta} + 1 \right)$$

Δ , Eşitlik 6.2'de verilen ikinci dereceden denklemin çözülmesi ile hesaplanabilmektedir. Eşitlik iki farklı reel kökü bulunmaktadır, ancak bunlardan sadece biri pozitif değer almaktadır. Bu nedenle Δ , Eşitlik 6.2 ile hesaplanmaktadır.

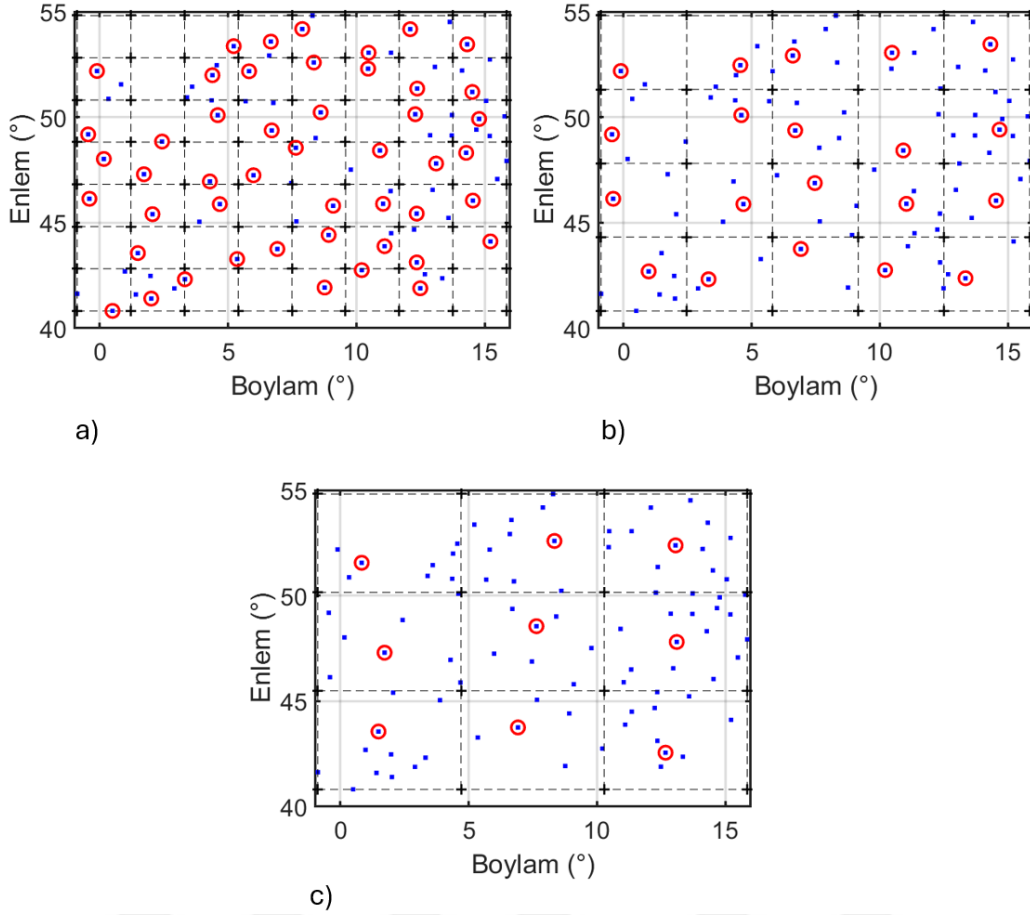
$$\Delta = \frac{(\theta_f + \phi_f) + \sqrt{(\theta_f + \phi_f)^2 + 4\theta_f\phi_f(N_I - 1)}}{2(N_I - 1)} \quad (6.2)$$

Bu çalışmada, 40°K ile 55°K ve -1°E ile 15°E arasındaki enlem ve boylamları arasında bulunan ilgilenen bölgede bulunan düzenli dağılmış 83 yeryüzü alıcı istasyonları Şekil 6.4'de verilmiştir.



Şekil 6.4: Bölgedeki yeryüzü alıcı istasyonları (•).

İstasyon sayısı, düzenli kare örnekleme yöntemiyle örneklenerek sırasıyla 48, 20 ve 10 istasyon için dağılımlar elde edilmiştir. Düzenli kare örnekleme yöntemiyle örneklenen yeryüzü alıcı istasyonları Şekil 6.5'de verilmiştir.



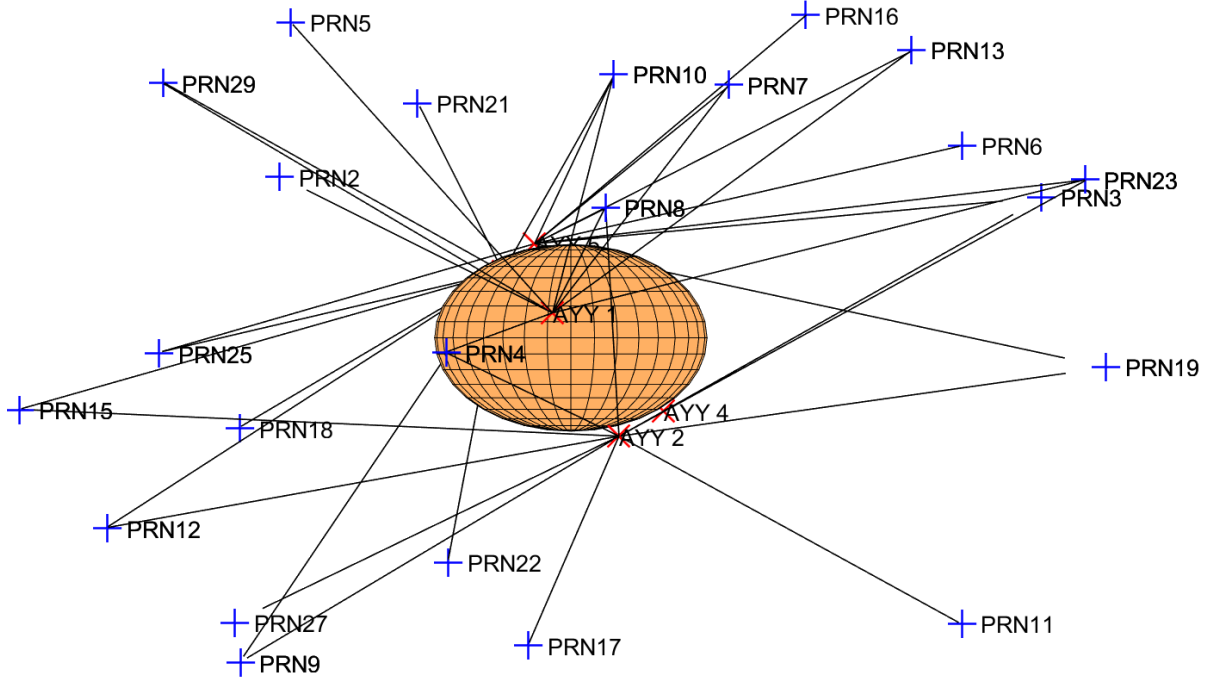
Şekil 6.5: Örnekleme noktaları ($\circ$), a) 48 istasyon, b) 20 istasyon, c) 9 istasyon.

Bu çalışmada, düzenli dağılan 83, 48, 20 ve 9 istasyona ait veriler kullanılarak gerçekleştirilen iyonküre geriçatma sonuçları değerlendirilerek bölge içerisindeki optimum yeryüzü alıcı istasyon sayısına karar verilmiştir.

IONOLAB-Fusion algoritması ile tomografinin gerçekleştirileceği tarih ve saat için YKS uydusu yolu verileri otomatik olarak indirilerek yeryüzü alıcı istasyonları tarafından 40° 'den büyük yükseliş açıları ile görülebilen YKS uyduları tespit edilmektedir. Bu çalışmada YKS uydusu sayısına bağlı olarak elektron yoğunluğu geriçatma sonuçlarının başarımı, tomografi anında görülen YKS uydusu sayısı, N_m , yinelemeli bir şekilde azaltılarak incelenmiştir.

IONOLAB-Fusion iyonküre elektron yoğunluğu tomografisi için YKS uyduları ile AYY uyduları üzerinde bulunan alıcılar arasındaki ETEİ verileri kullanabilmektedir. 15 Nisan 2006'da yörüngeye yerleştirilen COSMIC-1 görevi, ilk çoklu-uydu Radyo Örtülme (RO) görevi olma özelliğini taşımaktadır [90]. Her biri 72° ve 810 km yükseklikte konumlandırılmış altı özdeş uydudan oluşan COSMIC-1, gelişmiş YKS alıcıları ile donatılmıştır. Grup

gecikmeli ve faz ilerlemeli sinyaller Receiver Independent Exchange (RINEX) formatında 1 s çözünürlük ile kaydedilmektedir. Bu çalışmada COSMIC-1 görevinden elde edilen veriler kullanılmıştır. Kullanıcı AYY uyduları üzerindeki alıcılar ile YKS uyduları arasındaki ışınları kullanmayı tercih ederse, AYY uydu yolu verileri otomatik olarak indirilmekte ve AYY uydularının görüş hattındaki YKS uyduları tespit edilmektedir. Şekil 6.6'de 17 Nisan 2011 tarihi, saat 12:00 GS için birbirleri ile görüş hattı içindeki YKS-AYY uydu çiftleri verilmiştir.



Şekil 6.6: 17 Nisan 2011 tarihi, saat 12:00 GS için görüş hattı içindeki YKS-AYY uydu çiftleri.

Geniş Anlamda Durağanlık (GAD) süresi, deneysel dağılımın birinci ve ikinci momentlerinin belirli bir pencere içerisinde değişmeden kaldığı süre olarak tanımlanmaktadır. İyonküre GAD süresi, iyonkürenin saat içerisindeki değişkenliğini belirlemek için Kayan Pencere Analizi (KAPA) yöntemi ile hesaplanmaktadır [91]. [92–94] çalışmasında, iyonküre GAD süresini belirlemek için KAPA yöntemini 2010-2012 yılları için TUSAGA-Aktif GNSS Ağı istasyonları alıcı kayıtları ile kestirilen TEİ ve ETEİ verilerine uygulanmıştır. İyonkürenin durağanlık periyodu TEİ verileri için 7.5 dakika ve ETEİ verileri için 11 dakika olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada, tomografide dikey çözünürlüğün artırılması için AYY-YKS uyduları arasındaki ışınlar iyonküre GAD süresi boyunca izlenmektedir.

AYY-YKS uyduları arasındaki ışınlar, enlem ve boylamda, $\Delta\theta = 1^\circ$ ve $\Delta\phi = 1^\circ$ çözünür-

lük ile bölünmüş küresel hücrelerden geçerken, hücre çözünürlüğüne göreceli olarak yavaş hareket etmektedir. Bu nedenle 1 s periyoda sahip ardışık ışınlar iyonküre tomografisine yeni bir bilgi katmamaktadır. AYY-YKS uyduları arasındaki ışınların aynı hücrelerden geçmemesini sağlamak için iyonküre GAD süresi boyunca en uygun zaman çözünürlüğünün belirlenmesi amacıyla iki aşamalı bir yöntem geliştirilmiştir. Öncelikle YKS-AYY uyduları arasındaki ışınların izlediği yollar GAD süresi boyunca izlenmiş, geçtikleri hücrelerin IONOLAB-mRAY ile hesaplanan leksikografiksel indeksleri ve elektron yoğunluğu değerleri kaydedilmiştir. Küresel hücrelerin leksikografiksel indekslerinin en çok 20 s periyotla değiştiği belirlenmiştir. İkinci aşamada AYY uydusunun YKS uydusuna göre daha hızlı hareket etmesi nedeniyle AYY uydusunun bulunduğu hücrenin elektron yoğunluğu değerinin zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Zamana bağlı elektron yoğunluğu değerlerini içeren vektörün bant genişliği hesaplanmış ve 10, 20, 30, 40 ve 60 s çözünürlüklerde olacak şekilde sırasıyla örneklenmiştir. Örnek seyreltmeden kaynaklanan bilgi kaybı yüzdesi, azaltım öncesi ve sonrası bant genişlikleri karşılaştırılarak hesaplanmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, özellikle iyonküredeki hızlı değişimleri ve elektron yoğunluğundaki dalgalanmaları yakalamak için çok önemli olan yüksek frekanslı bileşenleri koruma ve veri çözünürlüğünü azaltma arasında sistematik bir değerlendirme yapılabilir.

IONOLAB-Fusion algoritması ile ayrıca kullanıcının tercihi üzerine Bölüm 4'te Şekil 4.3'de verilen akış şeması F3.a ve Algoritma 4.2'da anlatıldığı üzere iyonküreyi yatay yönde kat eden sanal eğik ışın yolları tanımlanabilmektedir.

Ölçüm vektörü oluşturulurken yeryüzü alıcı istasyonları ile YKS uyduları arasındaki ETEİ değerleri IONOLAB-STEÇ yöntemi kullanılarak hesaplanmaktadır [61–64]. IONOLAB-STEÇ yöntemi ile ETEİ kestirimi yapılırken diferansiyel uydu yanlılığı, IONosphere Map Exchange (IONEX) dosyalarından elde edilen uydu yanlılık değerleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Diferansiyel alıcı yanlılığı değeri, IONOLAB grubu tarafından geliştirilen IONOLAB-BIAS yöntemi ile kestirilen uydu yanlılığı değeri hesaplanmaktadır [48]. IONOLAB-TEÇ servisi ile TEİ kestirimleri, www.ionolab.org adresinden grafik veya 2,5 dakikalık çözünürlükte veri seti olarak kullanıcılara sunulmaktadır.

YKS uyduları ile sanal yeryüzü alıcı istasyonları, AYY uyduları ve sanal yatay yollar için ETEİ değerleri, Bölüm 5'de anlatılan ve Bölüm 4'de Şekil 4.4'de F3.a akış şemasında adımları turuncu ile belirtilen IRI-Plas-mSTEÇ algoritması ile hesaplanmaktadır. IONOLAB-

STEC ve IRI-Plas-mSTEC algoritmaları ile YKS uydu ve alıcı çiftleri arasındaki ETEİ değerleri kullanılarak ölçüm vektörü oluşturulmaktadır.

Bu çalışmada, yeryüzü alıcı istasyonları ve AYY uyduları üzerinde bulunan alıcılar ile YKS uyduları arasındaki ışın yolları iyonküreden geçerken izlenerek örnekleme matrisi oluşturulmaktadır. İyonküreden geçen ışınlar çalışma kapsamında geliştirilen dalga yayılma algoritması IONOLAB-mRAY kullanılarak takip edilmektedir. Yerküre jeomanyetik vektörü bileşenleri, IONOLAB-RAY algoritmasının bir parçası olarak International Geomagnetic Reference Field (IGRF) modülü tarafından otomatik olarak sağlanmaktadır. IONOLAB-RAY algoritması iyonkürenin fiziksel parametrelerini hesaplamak için IRI-Plas modelini kullanmaktadır. İyonküre yön bağımlılığı, Appleton-Hartree formülü ile hesaplanan kırılma indisinde ifade edilmektedir. IONOLAB-mRAY algoritması, Snell yasası kullanılarak seçilen bölgelerdeki iyonküreden geçen ışınların yayılım yollarını izlemektedir. YKS uydu ve alıcı çiftleri arasındaki her ışın için hücrelerdeki giriş ve çıkış noktaları kaydedilmektedir. Örnekleme matrisi, Bölüm 3'te yer alan akış şeması F3.b ve Algoritma 4.4'de verildiği gibi çiftler için hücrelerden geçerken kat edilen yol uzunlukları hesaplanarak oluşturulmaktadır. IONOLAB-mRAY algoritmasının bulunduğu adımlar akış şemasında sarı ile belirtilmiştir.

6.3 IONOLAB-Fusion Algoritmasının Uygulanması ve Test Edilmesi

Model matris oluşturulurken kullanılan ilk yaklaşımda, geriçatma başarımı yüksek ve hesaplama yükü az ideal N_d gün sayısının belirlenebilmesi için model matrisi $\underline{\underline{G}}_1$, $N_d = 3, 5, 7, 9$ ve 30 gün geriye gidilerek incelenmiştir. IONOLAB-mRAY ve IRI-Plas-mSTEC algoritmalarına girdi olarak verilecek veri setini eniyilemek için Çizelge 6.1'de verilen senaryolar analiz edilmiştir.

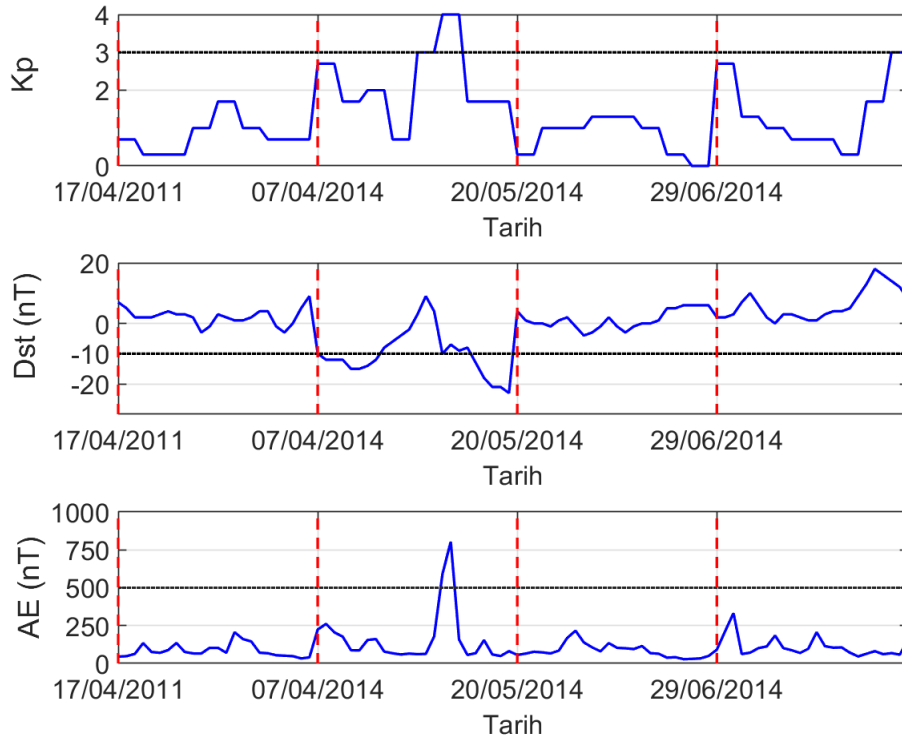
En iyi sonucu veren veri setinin ve N_d değerinin belirlenebilmesi için iyonkürenin sakin ve bozulmalı günleri için model matris değerleri oluşturulmuştur. İyonküre elektron yoğunluğu yeniden yapılandırma sonuçlarının Güneş ışınlarının geliş açısına bağlı değişimi gözlemlemek için günün farklı saatlerinde incelenmiştir.

Planetary K-Index (Kp), Disturbance Storm Time (Dst) ve Auroral Electrojet (AE) indeksleri sırasıyla ekvator, orta enlem ve kutup bölgelerindeki jeomanyetik aktiviteler hakkında bilgi sunmaktadır ve bu indeksler <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> adresinden elde

Çizelge 6.1: $\underline{\underline{G}}_1$ model matrisi oluşturulurken kullanılacak beş ayrı veri seti.

ETEİ Verisi			
Veri Seti	Arka Plan IRI-Plas Girdisi	IRI-Plas-mSTEC	IONOLAB-STEÇ
S1	Girdi yok	Girdi yok	-
S2	IONOLAB-MAP TEİ	IONOLAB-MAP TEİ	-
S3	IONOLAB-CK foF2	IONOLAB-CK foF2	-
S4	IONOLAB-MAP TEİ	-	IONOLAB-STEÇ
S5	IONOLAB-CK foF2	-	IONOLAB-STEÇ

edilebilmektedir. Kp'nin üçten büyük, Dst'nin -10 nT'den küçük ve AE'nin 500 nT'den büyük değerler alması durumunda bu günler bozulmalı gün olarak kabul edilmektedir [95–97]. Bu çalışmada farklı N_d değerleri için oluşturulan $\underline{\underline{G}}_1$ model matrisi ile iyonküre elektron yoğunluğu geriçatma sonuçları 17 Nisan 2011, 7 Nisan 2014, 20 Mayıs 2014 ve 29 Haziran 2014 tarihleri için elde edilmiştir. Bu günlere ait Kp, Dst ve AE indeksleri Şekil 6.7'de verilmiştir.

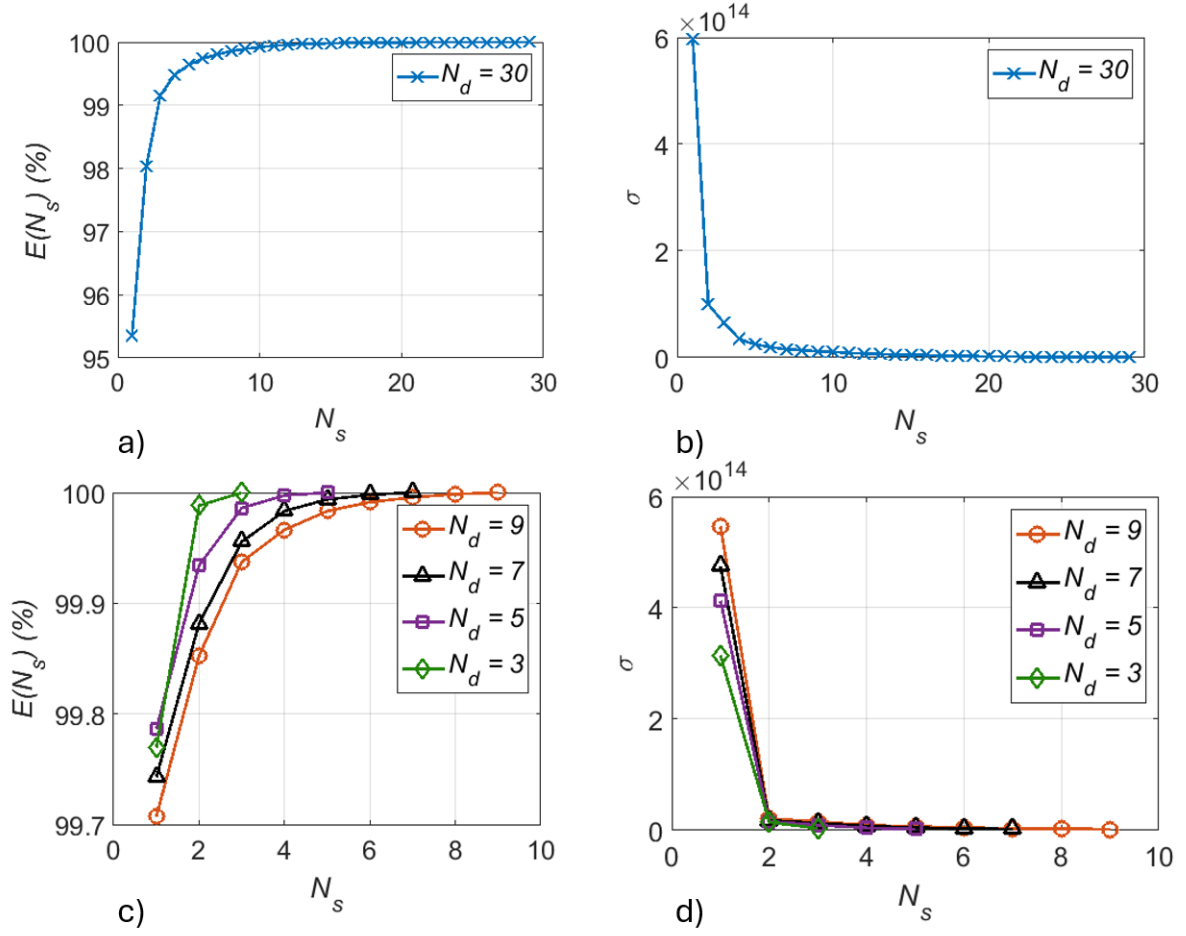


Şekil 6.7: Seçilen tarihler için a) Kp, b) Dst, c) AE indeksleri.

Şekil 6.7'deki bilgilere dayanarak, 17 Nisan 2011, 20 Mayıs 2014 ve 29 Haziran 2014 sakin gün olarak sınıflandırılırken, 7 Nisan 2014 bozulmalı gün olarak sınıflandırılmıştır. 17 Nisan 2011 tarihi için $N_d = 3, 5, 7, 9$ ve 30 seçilerek model matris oluşturulmuş; 7 Nisan 2014, 29 Haziran 2014 ve 20 Mayıs 2014 tarihleri için $N_d = 3, 5, 7$ ve 9 seçilerek model matris oluşturulmuştur. İyonküre elektron yoğunluğu yeniden yapılandırma sonuçları gün içerisinde sabaha karşı, gün doğuşu, gün ortası, gün batışı ve gece saatlerinde, 03:00, 08:00, 12:00, 18:00 ve 23:00 GS, incelenmiştir. Seçilen tarih ve saatler için $\underline{G}_1$ model matrisine Bölüm 4'de ve Şekil 4.3'de verilen F2 akışı ve Algoritma 4.2'de anlatıldığı gibi TDA yöntemi uygulanarak tekil değerler ve düzgelenmiş birikimli enerji değerleri hesaplanmıştır. 17 Nisan 2011, saat 12:00 GS'de ait $N_d = 30$ için birikimli enerji ve tekil değerler sırasıyla Şekil 6.8a ve Şekil 6.8b'de, $N_d = 3, 5, 7$ ve 9 için düzgelenmiş birikimli enerji ve tekil değerler sırasıyla Şekil 6.8c'de Şekil 6.8d'de örnek olarak verilmiştir.

$N_d = 30$ için Şekil 6.8a ile verilen düzgelenmiş birikimli enerji değerlerine bakıldığında ilk üç tekil değer için hesaplanan düzgelenmiş birikimli enerji değerinin %99'dan büyük değer aldığı belirlenmiştir. Şekil 6.8a ve Şekil 6.8b'de beşinci tekil değerden sonra bir kırınım gözlenmektedir. Şekil 6.8c'de $N_d = 3, 5, 7$ ve 9 için ilk tekil değerlere ait düzgelenmiş birikimli enerji değerleri %99'dan büyük değerler almıştır. Şekil 6.8c ve Şekil 6.8d'de $N_d = 5, 7$ ve 9 için üçüncü tekil değerden, $N_d = 3$ için ikinci tekil değerden sonra kırınım gerçekleşmektedir. Bu nedenle geriçatma yapılırken kullanılacak anlamlı taban vektör sayısı, $N_d = 30$ için $N_s = 5$, $N_d = 5, 7$ ve 9 için $N_s = 3$ ve $N_d = 3$ için $N_s = 2$ seçilmiştir. Bölüm 4'de Şekil 4.7'deki akış şeması F4 ile Algoritma 4.5'de verildiği gibi ölçüm matrisi, örnekleme matrisi ve sinyal alt uzayı taban vektörleri kullanılarak oluşturulmaktadır. Ölçüm vektörü ve ölçüm matrisi arasındaki ilişki taban katsayıları ile kurulmaktadır. Taban katsayı vektörü Enaz Kareler Kestirim yöntemi ile kestirilmektedir. İyonküre elektron yoğunluğu yeniden yapılandırması, her bir epok için $N_l = 55,800$ hücre için taban katsayı vektörü ve sinyal alt uzayı taban vektörleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

Çizelge 6.1'de verilen veri setleri için N_d değerlerine bağlı elektron yoğunluğu geriçatma sonuçları iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilleri ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan iyonosondalar ve konumları Çizelge 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.8: 17 Nisan 2011, saat 12:00 GS ve a) $N_d = 30$ için düzgelenmiş birikimli enerji, b) $N_d = 30$ için tekil değerler, c) $N_d = 3, 5, 7$ ve 9 için düzgelenmiş birikimli enerji, d) $N_d = 3, 5, 7$ ve 9 için tekil değerler.

Çizelge 6.2: Avrupa bölgesinden seçilen iyonosonda konumları.

İstasyon	Adı	Ülke	Coğrafik 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

Düzgelenmiş metrik uzaklık iki fonksiyon arasındaki metrik uzaklığın, referans fonksiyona oranının hesaplanması ile elde edilmektedir.

$$NL2(\%) = \frac{\|z_1 - z_2\|_2}{\|z_1\|_2} \times 100 \quad (6.3)$$

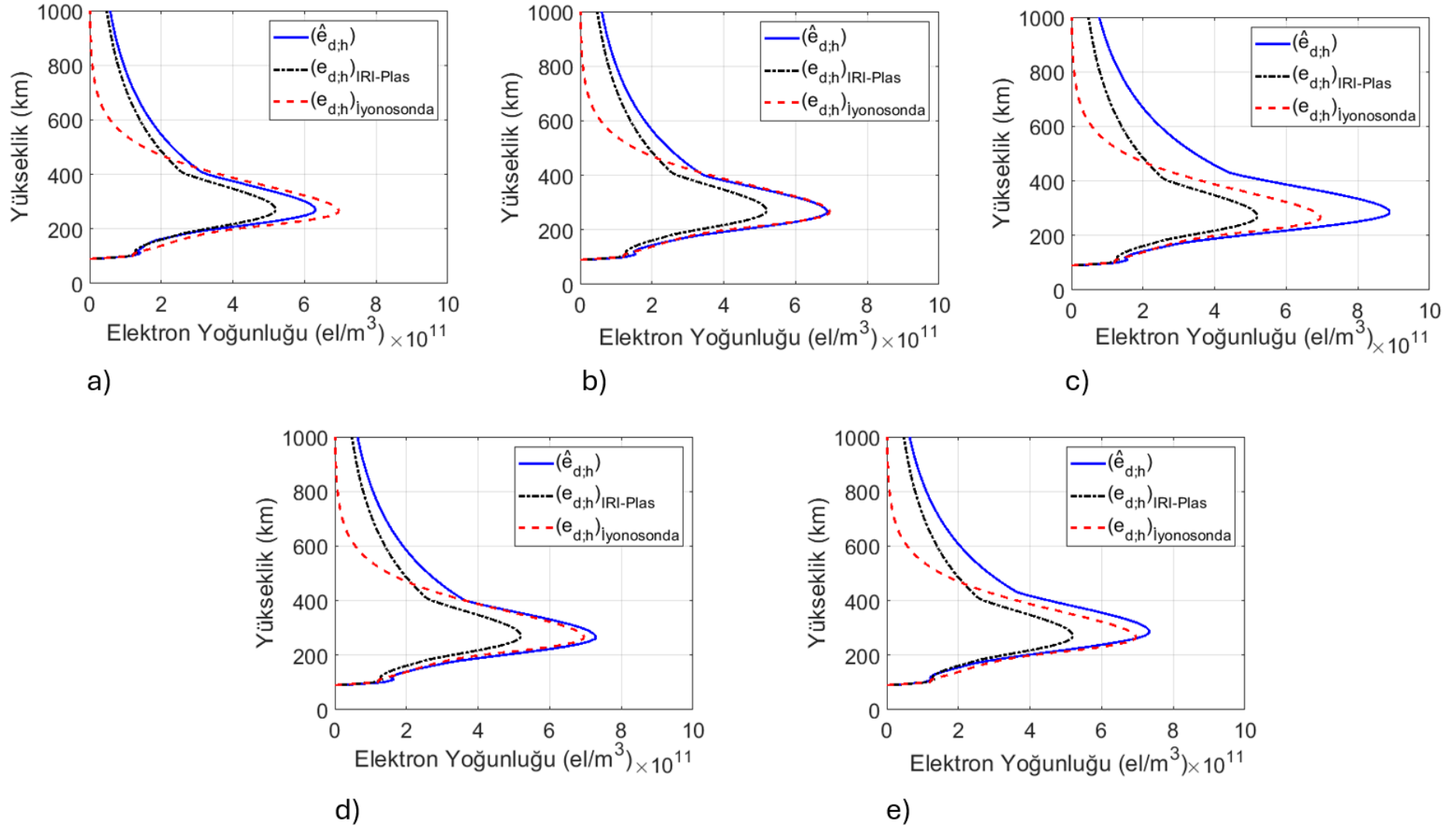
z_1 ve z_2 iki ayrı vektörü ifade etmektedir. Simetrik Kullback-Leibler Uzaklığı (SKLD), iki olasılık yoğunluk fonksiyonu arasındaki entropik uzaklığı hesaplamakta ve şekilsel benzerliği karşılaştırmaktadır [98].

$$SKLD = \sum_{n_l=1}^{N_l} z'_1[n_l] \ln \left(\frac{z'_1[n_l]}{z'_2[n_l]} \right) + \sum_{n_l=1}^{N_l} z'_2[n_l] \ln \left(\frac{z'_2[n_l]}{z'_1[n_l]} \right) \quad (6.4)$$

$$z' = \frac{1}{\sum_{n_l=1}^{N_l} z[n_l]} z$$

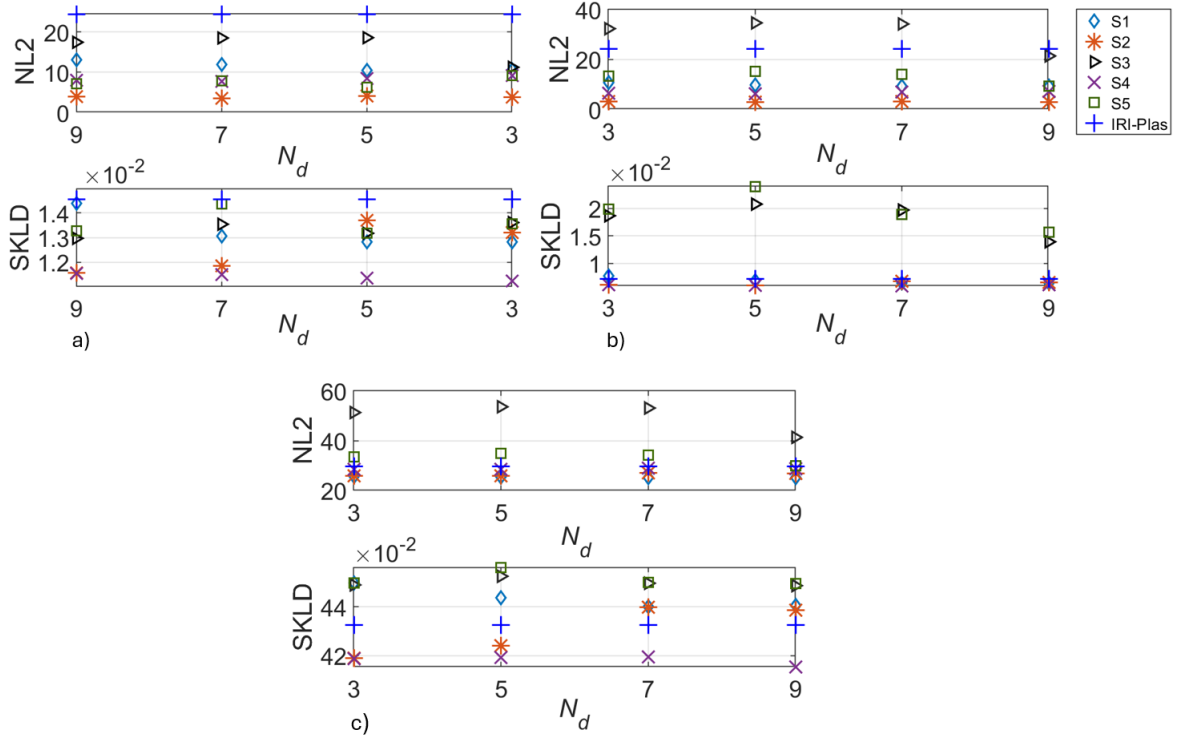
Dikey elektron yoğunluğu profilinin en yüksek değer aldığı yükseklik hmF2, değer ise NmF2 olarak tanımlanmaktadır. Tek Katmanlı İyonküre Modeli (TKİM), iyonküreyi sonsuz ince bir katman olarak varsaymakta ve bu ince tabaka 428.8 km olarak tanımlanan Chapman yüksekliğinde yer almaktadır [86]. İyonosondalar 1,000 km'ye kadar elektron yoğunluğu geriçatma sonuçlarına sahiptir. Bu nedenle iyonküre konumunda elektron yoğunluğu geriçatma sonuçları, iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilleri ile 1,000 km'ye kadar karşılaştırılmıştır.

17 Nisan 2011, saat 12:00 GS ve 7 Nisan 2014, 18:00 GS için geriçatma sonuçları sırasıyla PQ052 ve DB049 iyonosonda konumlarında, iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilleri ile Eşitlik 6.3 ve Eşitlik 6.4 kullanılarak hesaplanmıştır. Referans değer olarak kullanmak için iyonosonda konumlarında IRI-Plas iyonküre modeli kullanılarak hesaplanan dikey elektron yoğunluğu profilleri karşılaştırma metrikleri ile iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 6.9'da 17 Nisan 2011, saat 12:00 GS'de Çizelge 6.2'de verilen senaryolar için $N_d = 3$ gün geriye gidilerek gerçekleştirilen elektron yoğunluğu yeniden yapılandırma sonuçları, PQ052 iyonosonda konumunda, iyonosonda ve IRI-Plas dikey elektron yoğunluğu profilleri ile örnek olarak karşılaştırılmalı çizilmiştir. Şekil 6.10'da $N_d = 3, 5, 7, 9$ ve 30 gün seçilerek Çizelge 6.2'deki senaryolar için karşılaştırma metrikleri verilmiştir.



Şekil 6.9: 17 Nisan 2011, iyonkürenin sakin günü, saat 12:00 GS, PQ052 iyonosonda konumunda, $N_d = 3$ için, a) S1, b) S2, c) S3, d) S4 ve e) S5 için geriçatma sonuçları, IRI-Plas ile hesaplanan dikey elektron yoğunluğu profili, iyonosonda ile hesaplanan dikey elektron yoğunluğu profili.

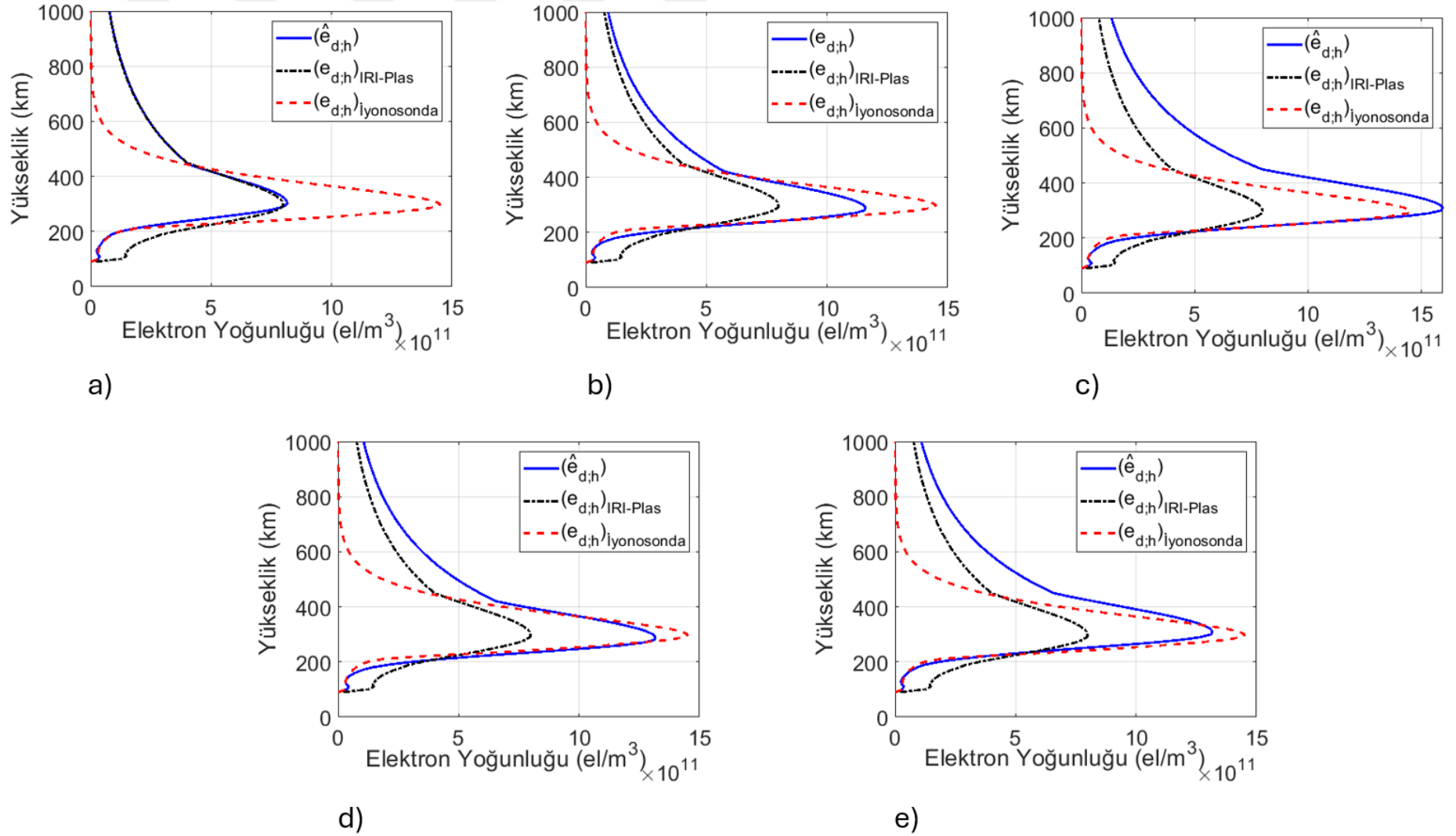
S1 veri setinde IONOLAB-mRAY ile arka plan iyonküre modeli oluşturulurken ve IRI-Plas-mSTEC ile ETEİ hesaplanırken kullanılan IRI-Plas modeline girdi verilmemiştir. IRI-Plas tarafından hesaplanan elektron yoğunluğu profili, iyonosonda dikey elektron profilinin altında kalmıştır ve IRI-Plas-STEC ile hesaplanan ETEİ değeri kullanılarak TDA tabanlı elektron yeniden yapılandırması sonucu oluşan elektron yoğunluğu profili ikisinin arasında yer almaktadır. S2 veri setinde IONOLAB-mRAY ile arka plan iyonküre modeli oluşturulurken ve IRI-Plas-mSTEC ile ETEİ hesaplanırken kullanılan IRI-Plas modeline girdi olarak IONOLAB-MAP ile hesaplanan TEİ haritası kullanılmıştır. TEİ haritası girdi olarak kullanılarak IRI-Plas-STEC tarafından hesaplanan ETEİ değerleri ile TDA tabanlı elektron yoğunluğu yeniden yapılandırması sonucunda iyonosonda konumunda elde edilen elektron yoğunluğu dikey profili, iyonosonda verisi ile değer ve şekilsel olarak uyum içindedir. S3 veri setinde IONOLAB-mRAY ile arka plan iyonküre modelini oluştururken ve IRI-Plas-mSTEC ile ETEİ hesaplarırken kullanılan IRI-Plas girdisi olarak IONOLAB-CK ile elde edilen foF2 verisi kullanılmıştır. IRI-Plas tarafından ve TDA tabanlı yeniden yapılandırma yöntemiyle kestirilen elektron yoğunluğu profilleri iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profillerinden daha büyük değer almıştır. S4 veri setinde IONOLAB-mRAY ile arka plan iyonküre modeli oluşturulurken girdi olarak IONOLAB-MAP ile elde edilen TEİ haritası, ETEİ hesaplanırken IONOLAB-STEC yöntemi kullanılmıştır. TDA yöntemi ile kestirilen elektron yoğunluğu profilinin, iyonosonda dikey profilini takip edebildiği gözlemlenmiştir. S5 veri setinde arka plan iyonküre modeli oluşturulurken girdi olarak IONOLAB-CK ile elde edilen foF2 haritası, TDA tabanlı yeniden yapılandırma yöntemi kullanılırken IONOLAB-STEC ETEİ verisi kullanılmıştır. TDA tabanlı yeniden yapılandırma yönteminde kullanılması sonucu elde edilen elektron yoğunluğu profilinin hmF2 yüksekliğine kadar iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilini daha iyi takip ettiği sonrasında ayrıklaştığı belirlenmiştir.



Şekil 6.10: 17 Nisan 2011, iyonkürenin sakin günü, saat 12:00 GS, a) hmF2 yüksekliğine, b) Chapman yüksekliğine, c) 1000 km'ye kadar geriçatma sonuçları ve IRI-Plas dikey elektron yoğunluğu profilinin PQ052 iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profili ile karşılaştırma sonuçları.

17 Nisan 2011, sakin gün, 12:00 GS için hmF2 yüksekliğine kadar hesaplanan karşılaştırma metriklerinde en küçük değerlere S2 senaryosu sahiptir. Bu değeri, S4 ve S5 senaryoları takip etmektedir. Bu senaryolar için karşılaştırma metrik değerleri $N_d = 3, 5, 7, 9$ ve 30 için benzer değerler almaktadır. Chapman yüksekliği için hesaplanan karşılaştırma metriklerinde iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profillerinde en küçük değerlere sırasıyla S2 ve S4 senaryoları sahiptir. Bu senaryolar karşılaştırma metrik değerleri $N_d = 3, 5, 7, 9$ ve 30 için benzer değerler almaktadır. 1000 km için hesaplanan karşılaştırma metriklerinde iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profillerinde en küçük değerlere NL2 ve SKLD için sırasıyla S2 ve S1 senaryoları sahiptir. Bu değerleri, S4 ve S5 senaryoları takip etmektedir. Bu senaryolar karşılaştırma metrik değerleri $N_d = 3, 5, 7, 9$ ve 30 için benzer değerler almıştır.

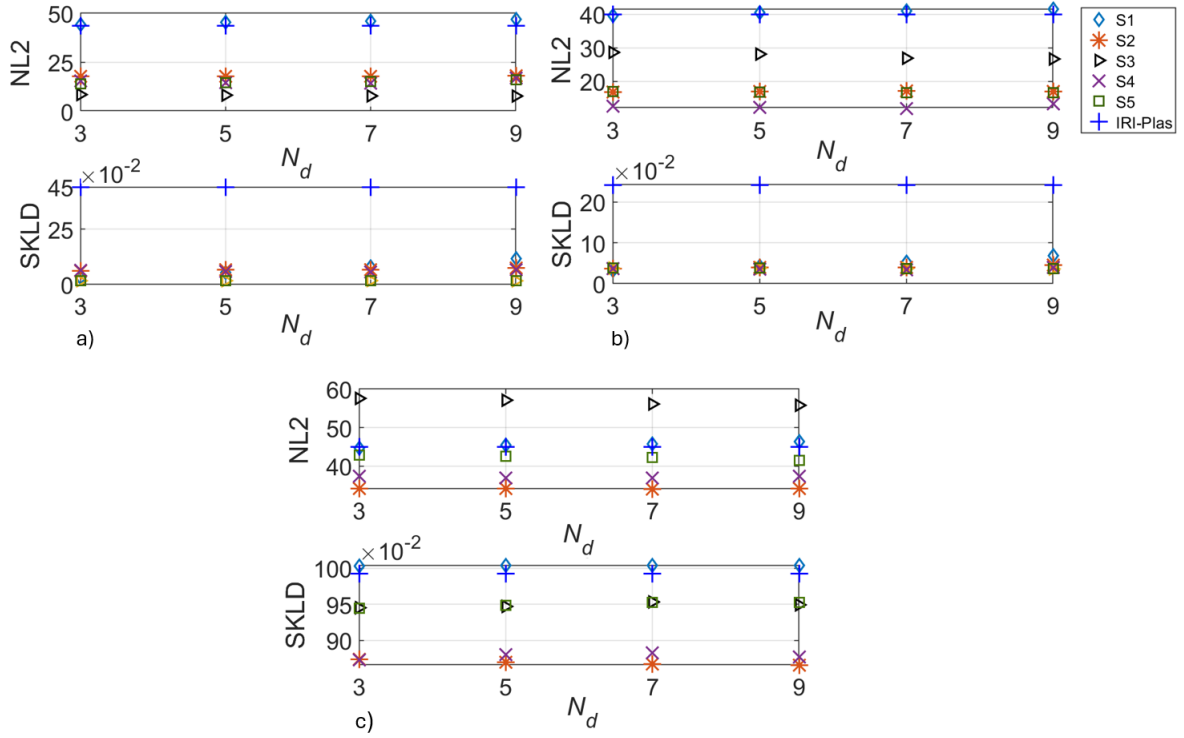
Şekil 6.11'de 7 Nisan 2013, saat 18:00 GS'de $N_d = 3$ gün geriye gidilerek gerçekleştirilen elektron yoğunluğu yeniden yapılandırma sonuçları, DB049 iyonosonda konumunda iyonosonda IRI-Plas dikey iyonosonda profilleri ile örnek olarak karşılaştırılmalı çizilmiştir.



Şekil 6.11: 7 Nisan 2013, iyonkürenin bozulmalı günü, saat 18:00 GS, DB049 iyonosonda konumunda a) S1, b) S2, c) S3, d) S4 ve e) S5 için geriçatma sonuçları, IRI-Plas ile hesaplanan dikey elektron yoğunluğu profili, iyonosonda ile hesaplanan dikey elektron yoğunluğu profili.

S1 veri setinde IONOLAB-mRAY ile arka plan iyonküre modeli oluşturulurken ve IRI-Plas-mSTEC ile ETEİ hesaplanırken kullanılan IRI-Plas modeline girdi verilmemiştir. S1 senaryosu için yeniden yapılandırılan elektron yoğunluğu profili, iyonosonda dikey elektron profilinin altında kalmıştır ve IRI-Plas modeli ile hesaplanan dikey elektron yoğunluğu profilini takip etmektedir. S2 veri setinde IONOLAB-mRAY ile arka plan iyonküre modeli oluşturulurken ve IRI-Plas-mSTEC ile ETEİ hesaplanırken kullanılan IRI-Plas modeline girdi olarak IONOLAB-MAP ile hesaplanan TEİ haritası kullanılmıştır. TEİ haritası girdi olarak kullanılarak IRI-Plas-mSTEC tarafından hesaplanan ETEİ değerleri ile TDA tabanlı elektron yoğunluğu yeniden yapılandırması sonucunda IRI-Plas ile hesaplanan elektron yoğunluğu profili ve iyonosonda dikey elektron profilinin arasında yer almaktadır. S3 veri setinde arka plan iyonküre modelini oluştururken ve IRI-Plas-mSTEC ile ETEİ hesaplarırken kullanılan IRI-Plas girdisi olarak IONOLAB-CK ile elde edilen foF2 verisi kullanılmıştır. IRI-Plas tarafından ve TDA tabanlı yeniden yapılandırma yöntemiyle kestirilen elektron yoğunluğu profilleri iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profillerini hmF2'ya kadar başarılı bir şekilde takip etmiş sonrasında daha büyük değerler almıştır. S4 veri setinde arka plan iyonküre modeli oluşturulurken girdi olarak IONOLAB-MAP ile elde edilen TEİ haritası, TDA tabanlı yeniden yapılandırma yöntemi kullanılırken IONOLAB-STEC verisi kullanılmıştır. TDA yöntemi ile kestirilen elektron yoğunluğu profilinin, iyonosonda dikey profilini S2 senaryosundan daha iyi takip ettiği gözlemlenmiştir. S5 veri setinde arka plan iyonküre modeli oluşturulurken girdi olarak IONOLAB-CK ile elde edilen foF2 haritası, TDA tabanlı yeniden yapılandırma yöntemi kullanılırken IONOLAB-STEC ETEİ verisi kullanılmıştır. TDA tabanlı yeniden yapılandırma yönteminde kullanılması sonucu elde edilen elektron yoğunluğu profilinin Chapman yüksekliğine kadar, iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilini S3 senaryosuna göre daha iyi takip ettiği belirlenmiştir.

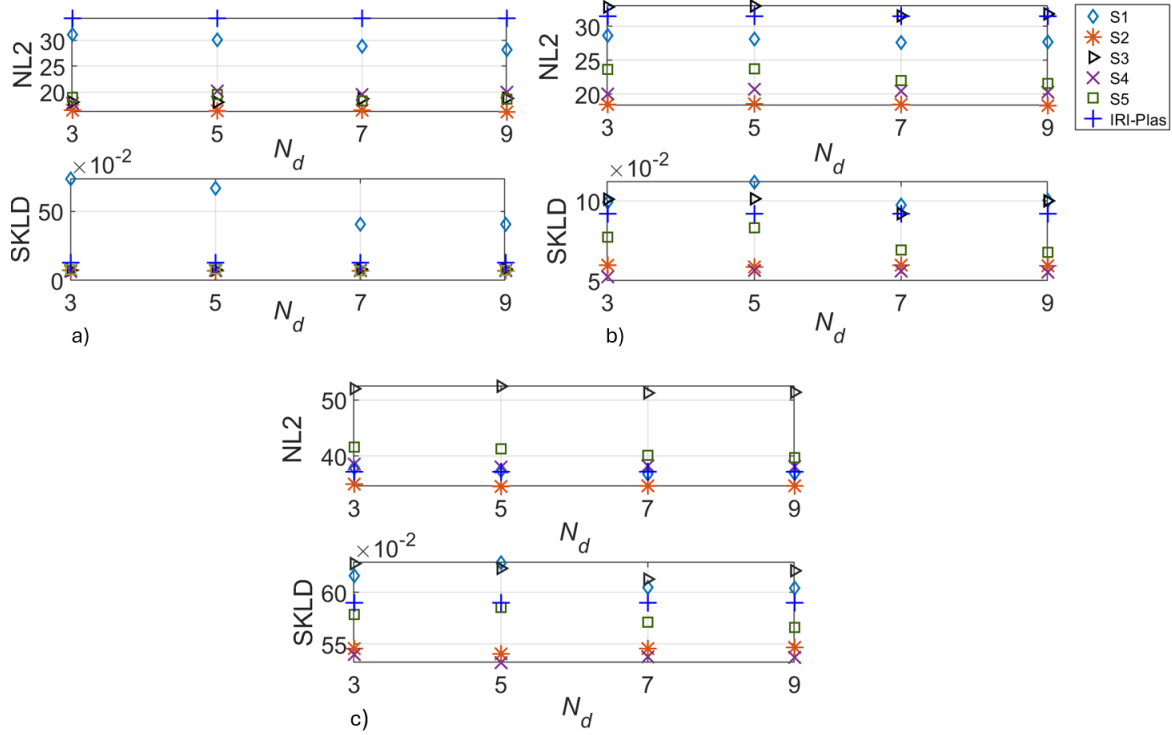
Şekil 6.12'de $N_d = 3, 5, 7$ ve 9 gün seçilerek Çizelge 6.2'deki senaryolar için karşılaştırma metrikleri verilmiştir.



Şekil 6.12: 7 Nisan 2013, iyonkürenin bozulmalı günü, saat 18:00 GS, a) hmF2 yüksekliğine, b) Chapman yüksekliğine, c) 1000 km'ye kadar geriçatma sonuçları ve IRI-Plas dikey elektron yoğunluğu profilinin DB049 iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profili ile karşılaştırma sonuçları.

hmF2 yüksekliği için hesaplanan karşılaştırma metriklerinde en küçük değerlere S3 senaryosu sahiptir. Bu yüksekliğe kadar metrik uzaklık ve şekilsel olarak iyonosonda dikey elektron yoğunluğunu en iyi takip eden senaryo S3'tür. Bu değeri, S4 ve S5 senaryoları takip etmektedir. Bu senaryolar için karşılaştırma metrik değerleri $N_d = 3, 5, 7$ ve 9'da benzer değerler almıştır. Chapman yüksekliği için hesaplanan karşılaştırma metriklerinde iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profillerinde en küçük değerlere sırasıyla S2 ve S4 senaryoları sahiptir. Bu senaryolar için karşılaştırma metrik değerleri $N_d = 3, 5, 7$ ve 9'da benzer değerler almıştır. 1000 km için hesaplanan karşılaştırma metriklerinde iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profillerinde en küçük değerlere NL2 ve SKLD için sırasıyla S2 ve S1 senaryoları sahiptir. S3 senaryosu IRI-Plas ile hesaplanan dikey elektron yoğunluğu değerlerinden metrik uzaklık ve şekilsel olarak iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profiline daha az benzemektedir. Bu senaryolar karşılaştırma metrik değerleri $N_d = 3, 5, 7$ ve 9 için benzer değerler almıştır.

Şekil 6.13’de verilen senaryolar için tüm günler, saatler ve iyonosondalar üzerinden hesaplanan karşılaştırma metrikleri 6.13’de verilmiştir.



Şekil 6.13: Tüm günler ve saatler için, a) hmF2 yüksekliğine, b) Chapman yüksekliğine, c) 1000 km’ye kadar geriçatma sonuçları ve IRI-Plas dikey elektron yoğunluğu profilinin tüm iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilleri ile karşılaştırma sonuçları.

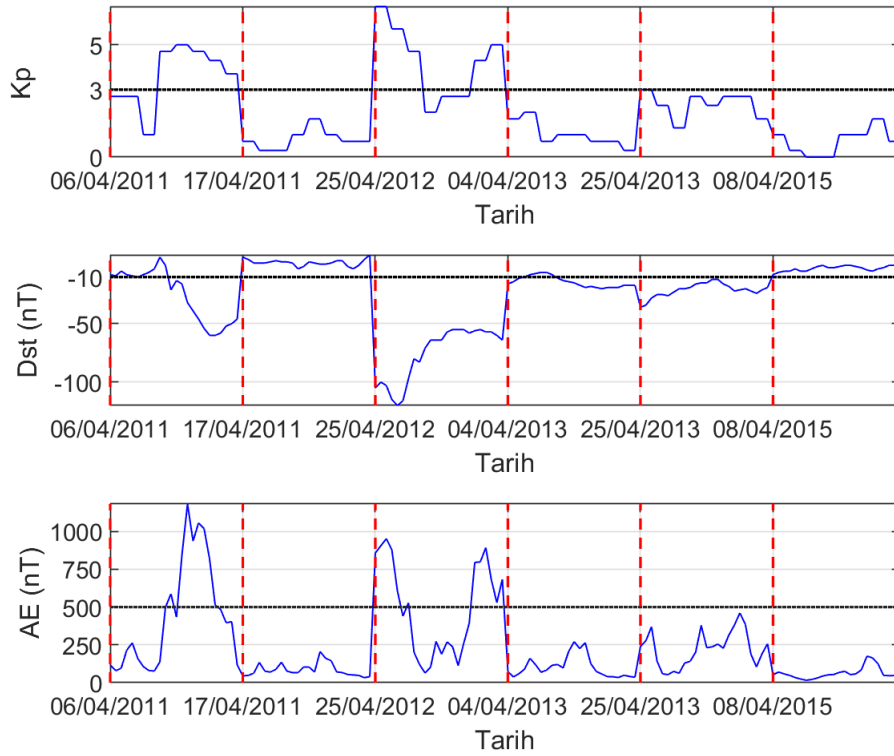
hmF2 yüksekliği için hesaplanan karşılaştırma metriklerinde iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profillerine metrik uzaklık ve şekilsel olarak en benzer senaryo, S2 senaryosudur. Bu değeri, S4 ve S5 senaryoları takip etmektedir. Bu senaryolar için karşılaştırma metrik değerleri $N_d = 3, 5, 7$ ve 9 için benzer değerler almıştır. Chapman yüksekliği için iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilleri ile hesaplanan karşılaştırma metriklerinde en küçük değerlere S2 ve S4 senaryoları sahiptir. S5 senaryosu hmF2 yüksekliğinden sonra iyonosonda dikey elektron yoğunluğunu S2 ve S4 kadar iyi takip edememektedir. Bu senaryolar karşılaştırma metrik değerleri $N_d = 3, 5, 7$ ve 9 için benzer değerler almıştır. 1000 km için hesaplanan karşılaştırma metriklerinde en küçük değerlere NL2 için sırasıyla S2, S1 ve S4 ve SKLD için sırasıyla S2 ve S4 senaryoları sahiptir. Bu senaryolar karşılaştırma metrik değerleri $N_d = 3, 5, 7$ ve 9 için benzer değerler almıştır.

Sonuçlar incelendiğinde, iyonküre elektron yoğunluğu tomografisi için $N_d = 3$ gün geriye

gidilerek ve $N_s = 2$ seçilerek yeniden yapılandırma yapmanın yeterli olduğu tespit edilmiştir. IONOLAB-mRAY ile IRI-Plas kullanılarak arka plan iyonküre oluşturulurken Çizelge 6.2’de verilen veri setlerinden iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilleri ile en benzer sonuçlara , karşılaştırma metriklerinde küçük değerler alması nedeniyle S2 ve S4 senaryolarının sahip olduğu belirlenmiştir. S4 senaryosu, alıcı kayırlarından kestirilen ETEİ değerlerini kullanması ve S2’de IRI-Plas-mSTEC ile hesaplanan ETEİ verilerine göre hesaplama kolaylığı nedeniyle seçilmiştir. S4’te IRI-Plas iyonküre modeline yüksek çözünürlüklü ETEİ veri seti beslenerek ve IONOLAB-STEC ile hesaplanan ETEİ verisi kullanılarak iyonkürenin yakın gerçek zamandaki durumunu yüksek başarımla temsil edildiği belirlenmiştir.

İki yaklaşımla hesaplanan model matrislerin başarımlarının karşılaştırılması için aynı günlerde elektron yoğunluğu yeniden yapılandırması gerçekleştirilmiştir. Model matrisi $\underline{G}_1$, N_d gün geriye gidilerek IONOLAB-mRAY ile IRI-Plas modeli kullanılarak hesaplanan elektron yoğunluğu profilleri kullanılarak oluşturulmuştur. Model matrisi $\underline{G}_2$, ODE grubundan seçilen 2003, 2004 ve 2012 yıllarına ait $N_d = 90$ gün için seçilen bölge içerisindeki elektron yoğunluğunun IONOLAB-mRAY ile IRI-Plas modeli kullanılarak hesaplanması ile oluşturulmuştur. İyonkürenin anlık durumunun gerçeğe yakın güncellenmesi için elektron yoğunluğu hesaplanırken IRI-Plas modeline TEİ haritası olarak kolay erişebilirliği ve hesaplama kolaylığı nedeniyle GIM-TEİ verisi beslenmiştir. Bu işlem, farklı koşullardaki elektron yoğunluğu yeniden yapılandırması sonuçlarının incelenmesi için ODE yıllarından farklı tarihler ve saatler için tekrarlanmıştır.

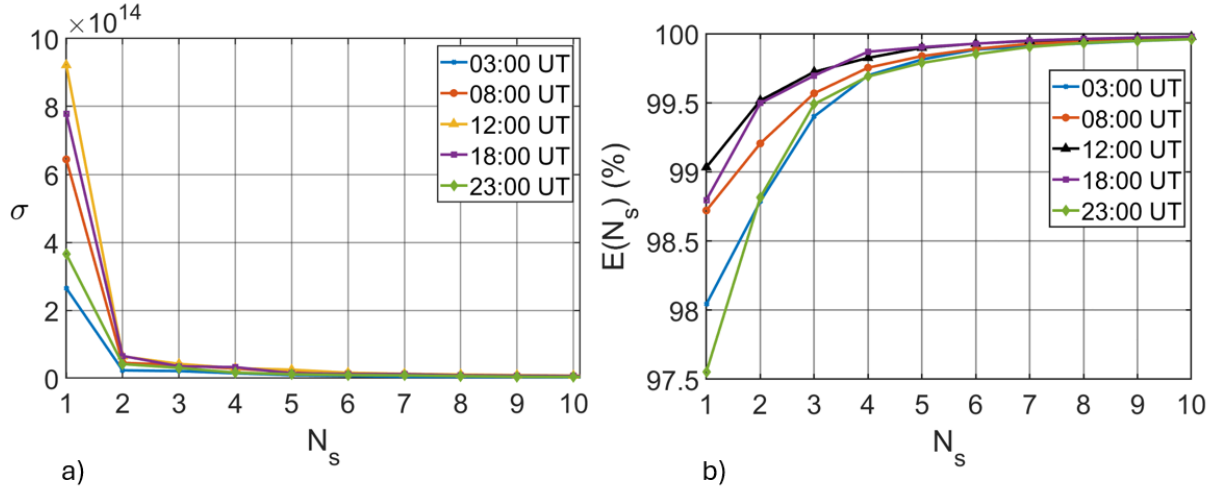
Bu çalışmada 6 Nisan 2011, 17 Nisan 2011, 24 Nisan 2012, 4 Nisan 2013, 25 Nisan 2013 ve 8 Nisan 2015 tarihleri için iyonküre elektron yoğunluğu yeniden yapılandırılmıştır. Bu günlere ait Dst, Kp ve AE jeomanyetik indeksleri Şekil 6.14’de verilmiştir.



Şekil 6.14: ODE yıllarından seçilen tarihler için a) Kp, b) Dst, c) AE indeksleri.

Şekil 6.14'deki bilgilere dayanarak, 17 Nisan 2011, 4 Nisan 2013 ve 8 Nisan 2015 sakin gün olarak sınıflandırılırken, 6 Nisan 2011, 24 Nisan 2012 ve 25 Nisan 2013 bozulmalı gün olarak sınıflandırılmıştır. İyonküre elektron yoğunluğu yeniden yapılandırma sonuçlarının gün içerisinde sabaha karşı, gün doğuşu, gün ortası, gün batışı ve gece saatlerinde Güneş ışınlarının gelişi açısına bağlı değişimi gözlemlemek için 03:00, 08:00, 12:00, 18:00 ve 23:00 GS için geriçatma gerçekleştirilmiştir. Seçilen tarih ve saatler için $\underline{G}_1$ ve $\underline{G}_2$ model matrisine Bölüm 4'de verilen F2 akışı ve Algoritma 4.2'de verildiği gibi TDA yöntemi uygulanarak tekil değerler ve düzgelenmiş birikimli enerji değerleri hesaplanmıştır. Şekil 6.15a'da $\underline{G}_2$ model matrisi için $N_s = 10$ 'a kadar tekil değerler verilmiştir. Tekil değerlerden Eşitlik 4.18 ile hesaplanan düzgelenmiş birikimli enerji değerleri $N_s = 10$ 'a kadar Şekil 6.15b'de verilmiştir.

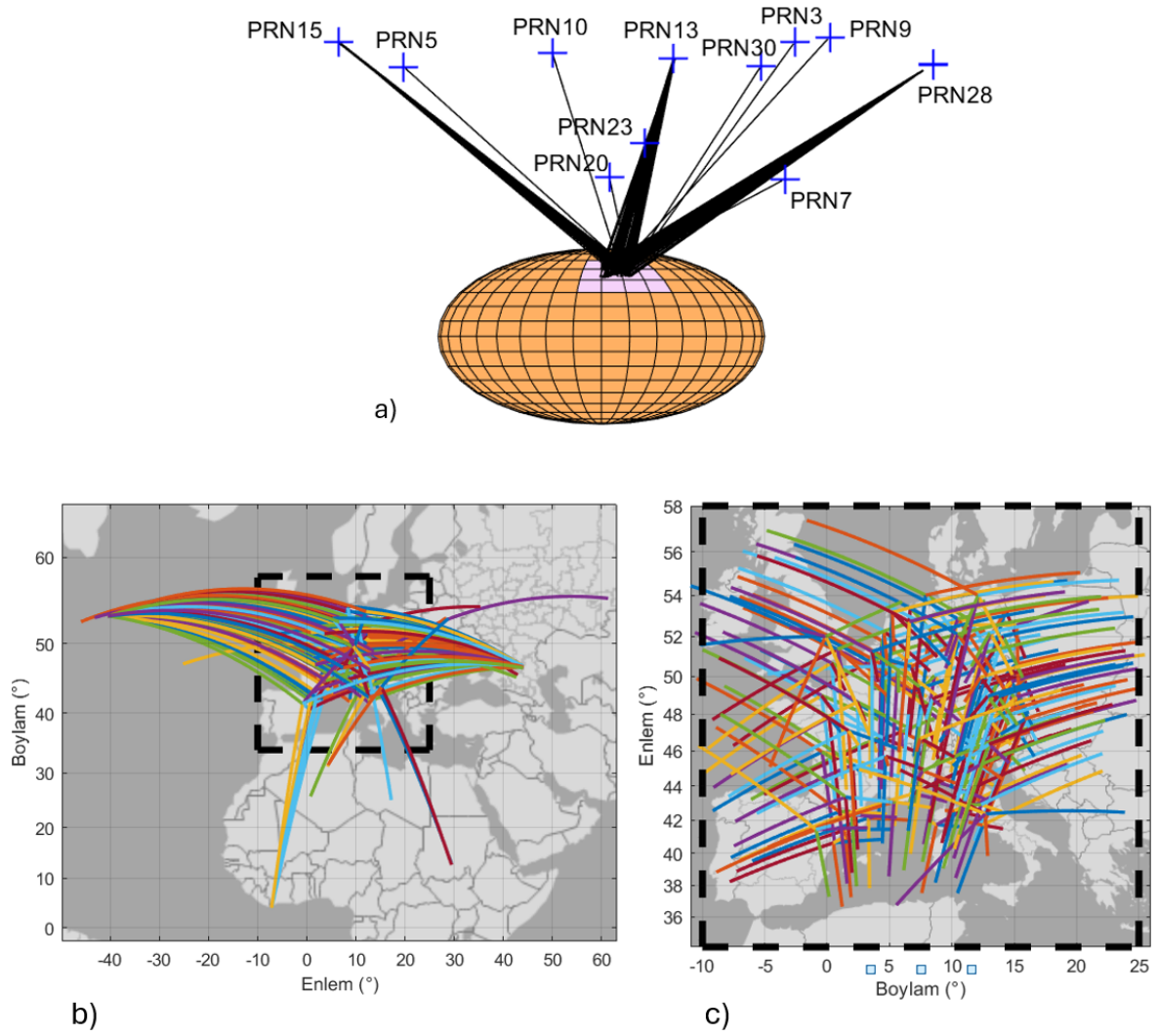
Şekil 6.15a'da, en büyük katkının sinyal alt uzayını temsil eden birinci tekil değerden geldiği belirlenmiştir. Tüm saatler için birinci tekil değer 2×10^{14} 'ten büyük değerler alırken ikinci tekil değerler 7×10^{13} 'ten daha küçük değerler almaktadır. Şekil 6.15b'de görülebileceği üzere birinci tekil değer enerjisi tüm saatlerde %97.5 ile %99 arasında değişmektedir. Birinci ve ikinci tekil değerlerin enerjisi arasındaki fark minimum seviyededir ve bu da ikinci



Şekil 6.15: G_2 model matrisi için $N_s = 10$ 'a kadar a) düzgelenmiş birikimli enerji, b) tekil değerler.

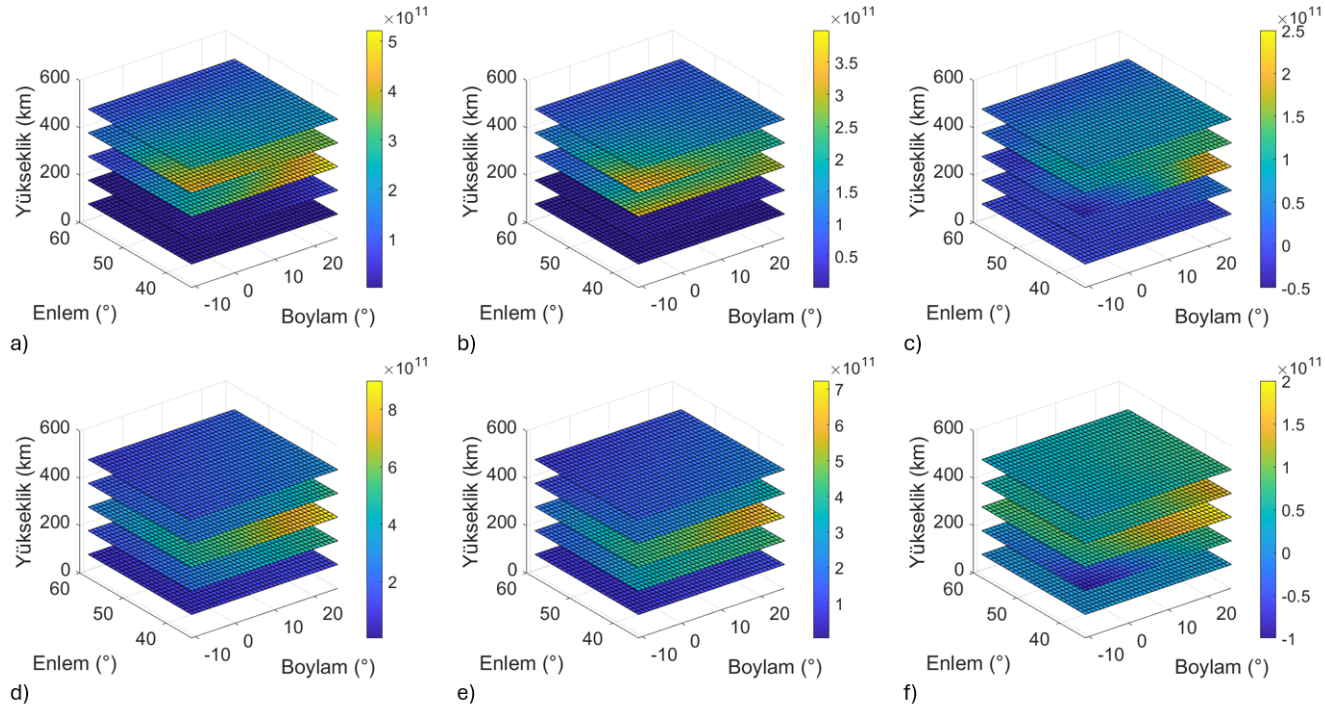
tekil değerlerden gelen katkının ihmal edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir. Özellikle gün doğumu ve gün batımı saatlerinde ve yüksek gürültü bileşenlerine sahip bozulmalı günlerde hem birinci hem de ikinci tekil değerler kullanılabilir, ancak genel olarak birinci tekil değer kullanımı yeterlidir.

Şekil 6.16'de 8 Nisan 2015, saat 12:00 GS için düzenli dağılan ve ilgilenilen bölgenin yaklaşık %20'sini kapsayan 48 yeryüzü alıcı istasyonu ve YKS uydu çiftleri arasındaki ışınlar verilmiştir. Şekil 6.16a'da çiftler arasındaki ışınların 3-B gösterimleri verilmiştir. Seçilen bölge pembe yama ile ifade edilmiştir ve YKS uyduları PRN numaraları ile tanımlanmıştır. Şekil 6.16b, 3-B gösteriminin 2-B enlem ve boylam düzlemine izdüşümüdür. Şekil 6.16c bölge sınırlarına yakınlştırılmış detaylı yolları göstermektedir. YKS uyduları ile yeryüzü alıcı istasyonları arasındaki ışınlar IONOLAB-mRAY algoritması ile takip edilerek örnekleme matrisi, IONOLAB-STEAC algoritması ile yeryüzü alıcı kayıtlarından ETEİ kestirilerek ölçüm vektörü oluşturulmaktadır.

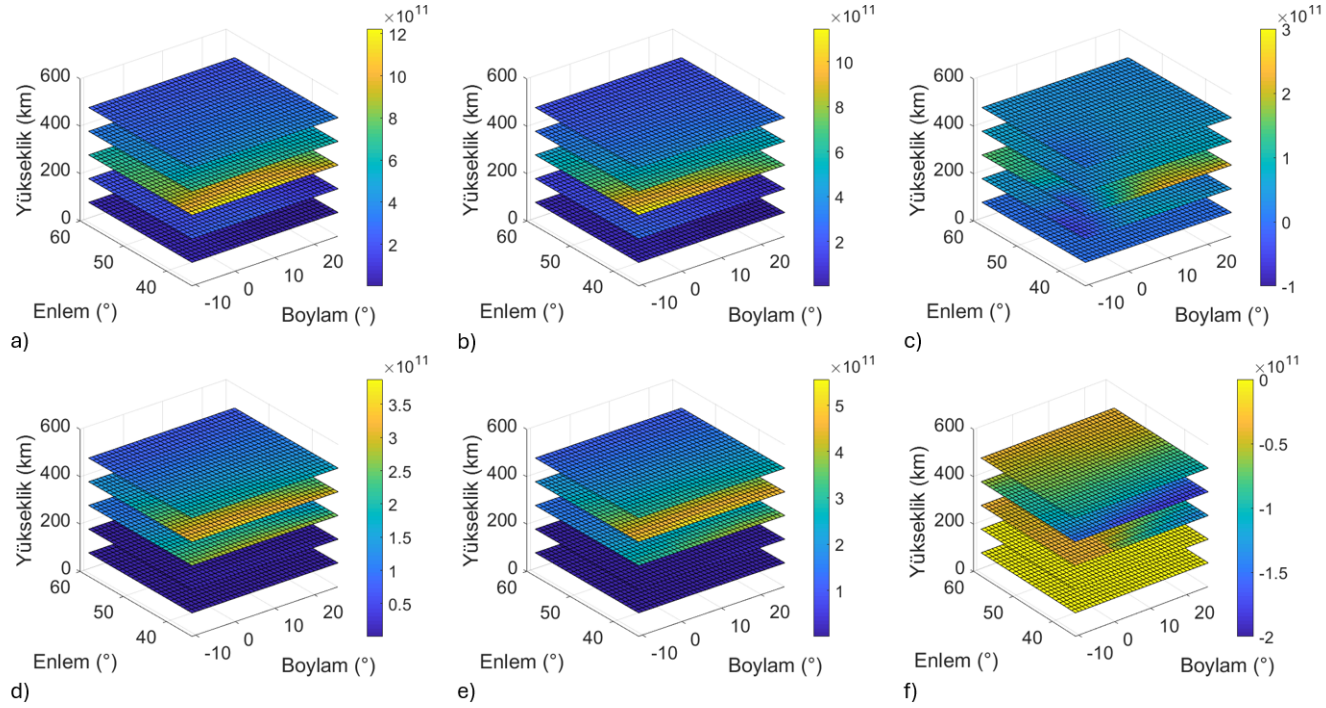


Şekil 6.16: 8 Nisan 2015, saat 12:00 GS, a) Yeryüzü alıcı istasyonları (48) ve YKS uyduları arasındaki 3-B ışınların gösterimi, b) Işınların yeryüzüne izdüşümü, c) İlgilenilen bölge üzerinde yer alan ışınlar.

Şekil 6.17 ve 6.18’de, farklı tarih ve saatler ile iyonkürenin sakin ve bozulmalı günleri için yeryüzü alıcı istasyonları kullanılarak seçilen bölge içerisindeki elektron yoğunluğu yeniden yapılandırması örnek olarak verilmiştir. Yeniden yapılandırma sonuçlarında IONOLAB-Fusion algoritmasında sadece yeryüzü alıcı istasyonları kullanılmıştır. Şekil 6.17a ve 6.17d’de $\underline{G}_2$ model matrisi kullanılarak sırasıyla 25 Nisan 2013 iyonküre bozulmalı günü, saat 03:00 GS ve 17 Nisan 2011, 08:00 GS iyonküre sakin günü için elektron yoğunluğu yeniden yapılandırması yapılmıştır. Şekil 6.18a’da $\underline{G}_1$ ve $N_d=1$ için 8 Nisan 2015, 18:00 GS iyonküre sakin günü ve Şekil 6.18d’de $\underline{G}_1$ ve $N_d=3$ için 24 Nisan 2012, 23:00 GS iyonküre bozulmalı günü için elektron yoğunluğu geriçatması gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.17: 100 km çözünürlüklü elektron yoğunluğu dilimleri: (a) 25 Nisan 2013, saat 03:00 GS’de (bozulmalı gün) IONOLAB-Fusion kullanılarak yeniden yapılandırılan, (b) 25 Nisan 2013, saat 03:00 GS’de IRI-Plas tarafından hesaplanan, (c) 25 Nisan 2013, saat 03:00 GS için IONOLAB-Fusion ve IRI-Plas arasındaki fark, (d) 17 Nisan 2011, saat 08:00 GS (sakin gün) için IONOLAB-Fusion kullanılarak yeniden yapılandırılan, (e) 17 Nisan 2011, saat 08:00 GS için IRI-Plas tarafından hesaplanan, (f) 17 Nisan 2011, saat 08:00 GS için IONOLAB-Fusion ve IRI-Plas arasındaki fark.



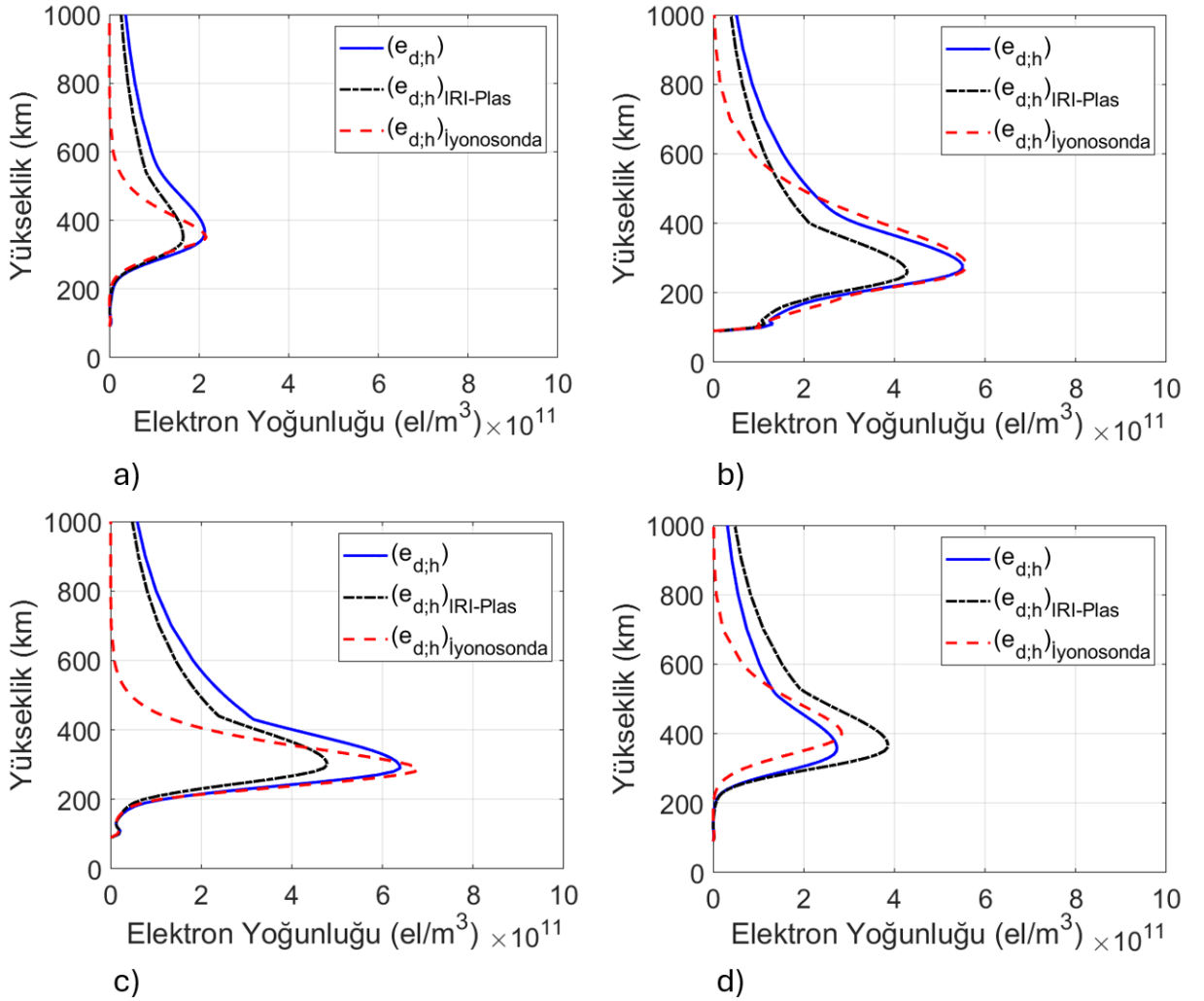
Şekil 6.18: 100 km çözünürlüklü elektron yoğunluğu dilimleri, (a) 8 Nisan 2015, saat 18:00 GS’de (sakin gün) IONOLAB-Fusion kullanılarak yeniden yapılandırılan, (b) 8 Nisan 2015, saat 18:00 GS’de IRI-Plas tarafından hesaplanan, (c) 8 Nisan 2015, saat 18:00 GS için IONOLAB-Fusion ve IRI-Plas arasındaki fark, (d) 24 Nisan 2012, saat 23:00 GS’de (bozulmalı gün) IONOLAB-Fusion kullanılarak yeniden yapılandırılan, (e) 24 Nisan 2012, saat 23:00 GS’de IRI-Plas tarafından hesaplanan, (f) 24 Nisan 2012, saat 23:00 GS için IONOLAB-Fusion ve IRI-Plas arasındaki fark.

Şekil 6.17a'da elektron yoğunluğu 25 Nisan 2013, saat 03:00 GS için verilmiştir. İyonkürede gece saatlerinde iyonlaşma seviyeleri düşüktür. En yüksek elektron yoğunluğu bölgenin güneydoğu kesiminde 300 km'de gözlenirken, bunu bölgenin güneybatı kesiminde 400 km takip etmektedir. Şekil 6.17d'de 17 Nisan 2011 saat 08:00 GS için elektron yoğunluğu verilmiştir. Gün doğumu ile iyonkürede iyonlaşmaya başlamakta ve bu nedenle elektron yoğunluğu neden olmaktadır. Bölgenin doğu bölgesi, gün doğumuna bağlı olarak daha yüksek elektron yoğunluğu değerlerine sahiptir ve en yüksek elektron yoğunluğu 300 km'de görülürken, daha alçak yüksekliklerde de iyonlaşmaya başlamaktadır. Şekil 6.18a'da 8 Nisan 2015, saat 18:00 GS için elektron yoğunluğu verilmiştir. Saat 08:00 GS ile karşılaştırıldığında, 18:00 GS'deki elektron yoğunluğu gün boyunca Güneş radyasyonunun birikimli etkisi nedeniyle daha yüksek değerler almaktadır. En yüksek elektron yoğunluğu 300 km'de olup tüm bölgeye yayılmaktadır. 6.18d'de elektron yoğunluğu 24 Nisan 2012, 23:00 GS için verilmiştir. İyonizasyon Güneş radyasyonuna bağlı olduğu için gün batımından sonra elektron yoğunluğu tüm yüksekliklerde azalmaktadır. Güneş batıda batarken, bölgenin batı kısmında elektron yoğunluğu değerleri daha yüksektir. Şekil 6.17a'da gösterilen elektron yoğunluğunun Şekil 6.18d'ye kıyasla daha yüksek olmasının nedeni günün erken saatlerinde bir jeomanyetik fırtınanın gerçekleşmesidir.

Şekil 6.17a'da yeniden yapılandırılan elektron yoğunluğu, Şekil 6.17c'deki farkta verildiği üzere, 25 Nisan 2013'ün erken saatlerinde bir jeomanyetik fırtınanın gerçekleşmesi nedeniyle gerçekleşen artışı Şekil 6.17b'de gösterilen IRI-Plas modeli kullanılarak hesaplanan elektron yoğunluğundan daha doğru bir şekilde yakalamaktadır. Şekil 6.17d ve Şekil 6.18c arasındaki sakin günlerde, IONOLAB-Fusion ve IRI-Plas'tan elde edilen elektron yoğunlukları arasındaki en büyük farklılıklar, Şekil 6.17f ve Şekil 6.17c'de verildiği gibi, en yüksek elektron yoğunluğun meydana geldiği 300 ve 400 km'deki dilimlerde gerçekleşmektedir. IONOLAB-Fusion tarafından tespit edilen ve Şekil 6.18f'de görülebilen negatif farkın nedeni 24 Nisan 2012'de, 23:00 GS'de negatif jeomanyetik fırtına gerçekleşmesidir.

Şekil 6.17'de verilen elektron yoğunluğu geriçatma sonuçları kullanılarak iyonosonda konumlarında dikey elektron yoğunluğu profilleri hesaplanmış ve iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilleri ve IRI-Plas modeli ile hesaplanan dikey elektron yoğunluğu profilleri ile birlikte çizilmiştir. Şekil 6.19'de elektron yoğunluğu profilleri sırasıyla a) DB049 konumunda 25 Nisan 2013 (bozulmalı gün), 03:00 GS; b) PQ052 konumunda 17 Nisan 2011

(sakin gün), 08:00 GS; c) JR055 konumunda 8 Nisan 2015 (sakin gün), 18:00 GS ve d) EB040 konumunda 24 Nisan 2013 (bozulmalı gün), 23:00 GS için verilmiştir.



Şekil 6.19: İyonosonda konumunda IONOLAB-Fusion algoritması kullanılarak yeniden yapılandırılan elektron yoğunluğu ve IRI-Plas modeli kullanılarak hesaplanan elektron yoğunluğu ile iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilleri, a) DB049, 25 Nisan 2013, saat 03:00 GS (bozulmalı gün), b) PQ052, 17 Nisan 2011, saat 08:00 GS (sakin gün), c) JR055, 8 Nisan 2015, saat 18:00 GS (sakin gün), d) EB040, 24 Nisan 2012, saat 23:00 GS (bozulmalı gün).

Şekil 6.19’da, IONOLAB-Fusion ile yeniden yapılandırılan elektron yoğunluğu, hmF2’ye kadar iyonosonda dikey profilleriyle daha iyi uyum göstermektedir. IONOLAB-Fusion yöntemi model matris oluşumu için IRI-Plas modelini kullanırken, iyonosondalar geriçatma algoritmaları için IRI modeline dayanmaktadır. Bu modeller iyonkürenin alçak mertebelerinde benzer değerler vermektedir. Bununla birlikte, daha yüksek irtifalarda, IRI ve IRI-Plas tarafından farklı elektron yoğunluğu modelleri kullanılmaktadır. Bu durum, yeniden yapılandırıl-

lan elektron yoğunluğu değerleri ile iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilleri arasında farklılıklara yol açmaktadır. Özellikle Chapman yüksekliğinin üstünde, iyonosonda dikey elektron profilleri ile IRI-Plas modeli ile hesaplanan elektron yoğunluğu profilleri arasında önemli farklılıklar ortaya çıkmaktadır [49,50].

IONOLAB-Fusion tarafından yeniden yapılandırılan elektron yoğunluğunun doğruluğu farklı yüksekliklere kadar karşılaştırma yöntemleri kullanılarak, iyonosonda konumlarında iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilleri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Karşılaştırma yöntemleri hmF2, Chapman ve 1,000 km'ye kadar ayrı ayrı uygulanmıştır. Ayrıca, tomografi sonuçlarının iyonküre modeline göre gelişimini değerlendirmek için iyonosonda konumlarında IRI-Plas modeli ile hesaplanan elektron yoğunluğu değerleri, referans olarak kullanılmak üzere iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 6.19'da verilen profillerin karşılaştırma sonuçları Çizelge 6.3'te verilmiştir.

Çizelge 6.3: Şekil 6.19'da verilen gün, saat ve iyonosondalar için karşılaştırma sonuçları.

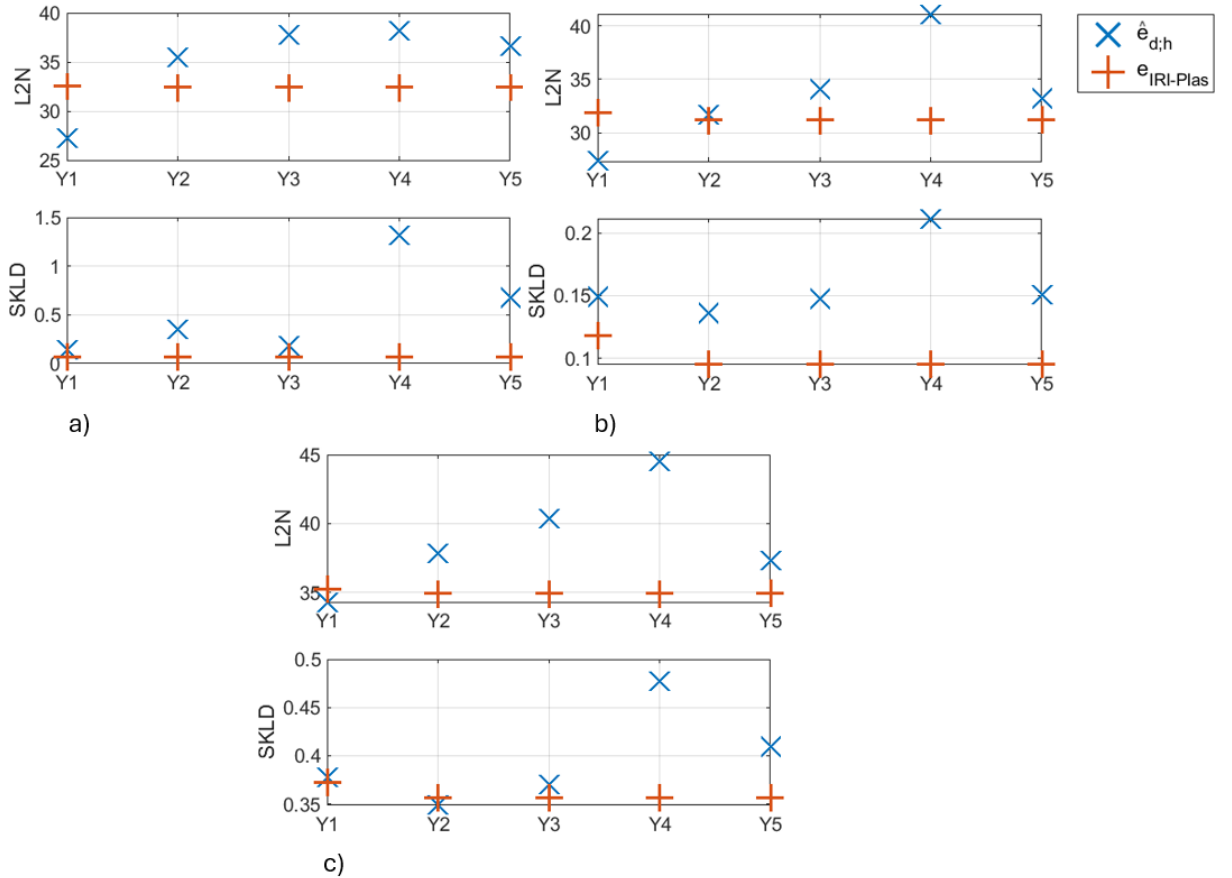
Tarih	İyonosonda	Yükseklik	$NL2$	$SKLD$	$NL2_{(IRI-Plas)}$	$SKLD_{(IRI-Plas)}$
17 April 2011 08:00 GS	PQ052	hmf2	6.61	1.48×10^{-2}	21.64	1.47×10^{-2}
		Chapman	8.18	2.74×10^{-2}	29.63	2.39×10^{-2}
		1000 km	11.83	30.01×10^{-2}	29.61	29.63×10^{-2}
08 April 2015 18:00 GS	JR055	hmf2	7.22	1.58×10^{-2}	35.12	1.69×10^{-2}
		Chapman	25.01	0.75×10^{-2}	30.26	0.78×10^{-2}
		1000 km	45.71	13.58×10^{-2}	41.38	14.34×10^{-2}
25 April 2013 03:00 GS	DB049	hmf2	32.51	21.11×10^{-2}	33.95	20.23×10^{-2}
		Chapman	47.85	28.72×10^{-2}	73.23	31.17×10^{-2}
		1000 km	56.61	48.87×10^{-2}	83.60	49.87×10^{-2}
24 April 2012 23:00 GS	EB040	hmf2	46.85	19.17×10^{-2}	82.91	13.16×10^{-2}
		Chapman	39.20	19.81×10^{-2}	69.64	13.54×10^{-2}
		1000 km	33.42	22.10×10^{-2}	62.09	18.08×10^{-2}

İyonkürenin sakin günü olan 17 Nisan 2011, saat 08:00 GS'de, $\underline{G}_2$ model matrisi kullanılarak IONOLAB-Fusion algoritması ile elektron yoğunluğu yeniden yapılandırılmıştır. PQ052 iyonosonda konumunda yeniden yapılandırılan elektron yoğunluğu ve IRI-Plas modeli ile hesaplanan elektron yoğunluğu profilleri, iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profili ile

karşılaştırılmıştır. Yeniden yapılandırılan elektron yoğunluğunun, IRI-Plas modeline kıyasla, tüm yüksekliklerde PQ052 iyonosondasının dikey elektron yoğunluğuna daha çok benzediği gözlemlenmiştir. IONOLAB-Fusion tarafından yeniden yapılandırılan elektron yoğunluğu ile IRI-Plas modeli tarafından hesaplanan elektron yoğunluğu arasındaki SKLD değerlerindeki benzerlik, her ikisinin de Chapman yüksekliğine kadar PQ052'nin dikey elektron yoğunluğuna benzer bir şekil sergilediğini göstermektedir. Ancak, her iki profil de Chapman yüksekliğinden sonra iyonosondanın dikey elektron yoğunluğu profillerinden farklıdır. Buna rağmen 1,000 km'de yeniden yapılandırılan elektron yoğunluğu IRI-Plas modeli tarafından hesaplan elektron yoğunluğu profiline göre daha iyi başarımlar göstermektedir. İyonkürenin sakin günü 8 Nisan 2015, saat 18:00 GS'de, $\underline{G}_1$ model matrisi $N_d = 1$ kullanılarak oluşturulmuştur. Benzer şekilde, hmF2 ve Chapman yüksekliklerinde yeniden yapılandırılan elektron yoğunluğu, IRI-Plas modeli tarafından hesaplanan elektron yoğunluğuna kıyasla JR055'in dikey elektron yoğunluğu profiliyle daha yakından eşleşmektedir. Model matrisinin sadece bir önceki güne ait ön bilgi içermesi nedeniyle, yeniden yapılandırılan elektron yoğunluğu hmF2'den sonra iyonosonde dikey profilini doğru bir şekilde takip edememektedir. İyonkürenin bozulmalı günü olan 25 Nisan 2013'te, saat 03:00 GS'de, DB049'da $\underline{G}_2$ model matrisi kullanılmıştır. Yeniden yapılandırılan elektron yoğunluğu profilleri, hem metrik uzaklık hem de SKLD yöntemlerinde IRI-Plas sonuçlarına göre daha küçük sonuçlar elde edilmiştir. Geriçatma sonuçları tüm yüksekliklerde IRI-Plas modeli ile hesaplanan elektron yoğunluğuna kıyasla hem değer hem de şekilsel olarak DB049 dikey elektron profiline daha yakın bir benzerlik sergilemektedir. 25 Nisan 2013 günü, saat 03:00 GS'de, EB040 iyonosonda konumunda, düzgeleştirme için kullanılan iyonosonda dikey elektron yoğunluğu değerleri Şekil 6.19a ve Şekil 6.19b'de gösterilenlere kıyasla daha küçük değerler almaktadır. Bu nedenle küçük değişiklikler daha düzgelenmiş büyük metrik uzaklık değerlerine yol açarak daha belirgin bir etkiye sahiptir. Ayrıca, iyonküre modelleri bozulmalı günlerde iyonküreyi tam olarak temsil edememekte, hem IONOLAB-Fusion yönteminden hem de IRI-Plas modelinden elde edilen elektron yoğunluğu profilleri için karşılaştırma yöntemi sonuçlarında daha büyük farklılıklara neden olmaktadır. İyonkürenin bozulmalı günü olan 24 Nisan 2012, 23:00 GS'de, $\underline{G}_1$ model matrisi $N_d = 3$ kullanılarak oluşturulmuştur. Yeniden oluşturulan elektron yoğunluğu profili, IRI-Plas modeline kıyasla tepe elektron yoğunluğu değeri olan NmF2'yi daha iyi yansıtmaktadır. Bununla birlikte, bozulma nedeniyle, model matrisindeki ön bilgiler mevcut iyonküreyi doğru bir şekilde temsil edememektedir. Bu nedenle, düzgelenmiş metrik

uzaklık ve SKLD sonuçları daha yüksek değerler almaktadır. Yeniden yapılandırılan elektron yoğunluğu metrik uzaklık açısından daha iyi sonuçlar verirken, hmF2 yüksekliğindeki kayma nedeniyle SKLD değerleri daha büyük değerler almaktadır.

Belirtilen tüm sakin günler ve saatler için $\underline{G}_1$ model matrisleri kullanılarak IONOLAB-Fusion algoritması (Y1), Küresel Başlık Harmonikleri (Y2), Haar Dalgacıkları (Y3), B-Spline Fonksiyonları (Y4) ve Slepian Fonksiyonları (Y5) ile elektron yoğunluğu yeniden yapılandırması gerçekleştirilmiştir. Geriçatma sonuçları tüm yöntemler için karşılaştırma metrikleri ile iyonosonda konumlarında iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma yöntem sonuçları Şekil 6.20a'da hmF2 yüksekliğine kadar, Şekil 6.20b'de Chapman yüksekliğine kadar ve Şekil 6.20c'de 1,000 km'ye kadar karşılaştırma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.20: a) hmF2, b) Chapman, c) 1,000 km yüksekliklerine kadar tomografi yöntem karşılaştırması.

IONOLAB-Fusion yöntemi, Y1, ile yeniden yapılandırılan elektron yoğunluğu profilleri, hmF2, Chapman ve 1000 km yüksekliklerine kadar metrik uzaklık ve şekilsel olarak iyo-

sonda dikey elektron yoğunluğuna en benzer sonuçların elde edildiği yöntemdir. Y1 yöntemi ile IRI-Plas modeli SKLD değerleri hmF2 ve 1000 km'de benzer değerler almıştır. SKLD değerleri incelendiğinde şekilsel olarak iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profiline en çok IRI-Plas modeli ile hesaplanan dikey elektron yoğunluğu profilleri benzemektedir. Bunun nedeni, IRI-Plas modelinin yakın günlerde orta enlem bölgesindeki tutarlı ve başarılı başarımından kaynaklanmaktadır. Diğer yöntemler ile hesaplanan geriçatma sonuçları için iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilleri ile karşılaştırılarak hesaplanan NL2 ve SKLD değerleri incelendiğinde, bu yöntem sonuçlarının iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profillerine, IRI-Plas modeline GIM-TEİ beslenerek hesaplanan elektron yoğunluğu profillerinden metrik uzaklık ve şekilsel olarak daha az benzediği belirlenmiştir.

Sınırları 34°K ve 58°K enlemleri ile -10°E ve 25°E boylamları arasında yer alan Avrupa bölgesi için $\underline{G}_1$ model matrisi ile gerçekleştirilen tomografi sırasında farklı yöntemlerin işlem yükleri incelenmiştir. Tomografi sırasında Y1 yönteminde iki, Y2 yönteminde 12, Y3 yönteminde 32, Y4 yönteminde 24 ve Y5 yönteminde 36 taban vektör kullanılarak iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilleri ile en benzer geriçatma sonuçları elde edilmektedir. Hesaplama yükü en az yöntemin, iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilleri ile en benzer sonuçlara sahip Y1, IONOLAB-Fusion, yöntemi olduğu belirlenmiştir.

IONOLAB-Fusion algoritması ile elektron yoğunluğu yeniden yapılandırması, belirtilen tüm yakın günler ve saatler için hem $\underline{G}_1$ hem de $\underline{G}_2$ model matrisleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İstasyon sayısına bağlı tomografi sonuçlarının incelenmesi için 9, 20, 48 ve 83 istasyon kullanılarak elektron yoğunluğu geriçatması yapılmıştır. Karşılaştırma yöntemi sonuçları Çizelge 6.4'de verilmiştir. Ayrıca, IRI-Plas modelinden hesaplanan elektron yoğunluğu değerleri de referans olarak aynı veri setiyle karşılaştırılmıştır.

$\underline{G}_1$ matrisi için istasyon sayısına bağlı sonuçlar incelendiğinde hmF2, Chapman ve 1000 km yükseklikleri için en küçük NL2 ve SKLD değerlerinin 48 istasyon ile elde edildiği belirlenmiştir. $\underline{G}_2$ matrisi için istasyon sayısına bağlı sonuçlar incelendiğinde hmF2, Chapman ve 1000 km yükseklikleri için en küçük NL2 sonuçlarına 48 istasyon ile elde edildiği belirlenmiştir. SKLD değerleri tüm istasyonlar için küçük ve benzer değerler almıştır. Bu durum iki model matrisi ve tüm istasyon sayıları için geriçatma sonuçlarının şekilsel olarak iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilleri ile benzer olduğunu ifade etmektedir. $\underline{G}_1$ ve $\underline{G}_2$ model matrisi ile yapılan geriçatmalar için hesaplanan karşılaştırma yöntemi sonuçlarında bölgenin

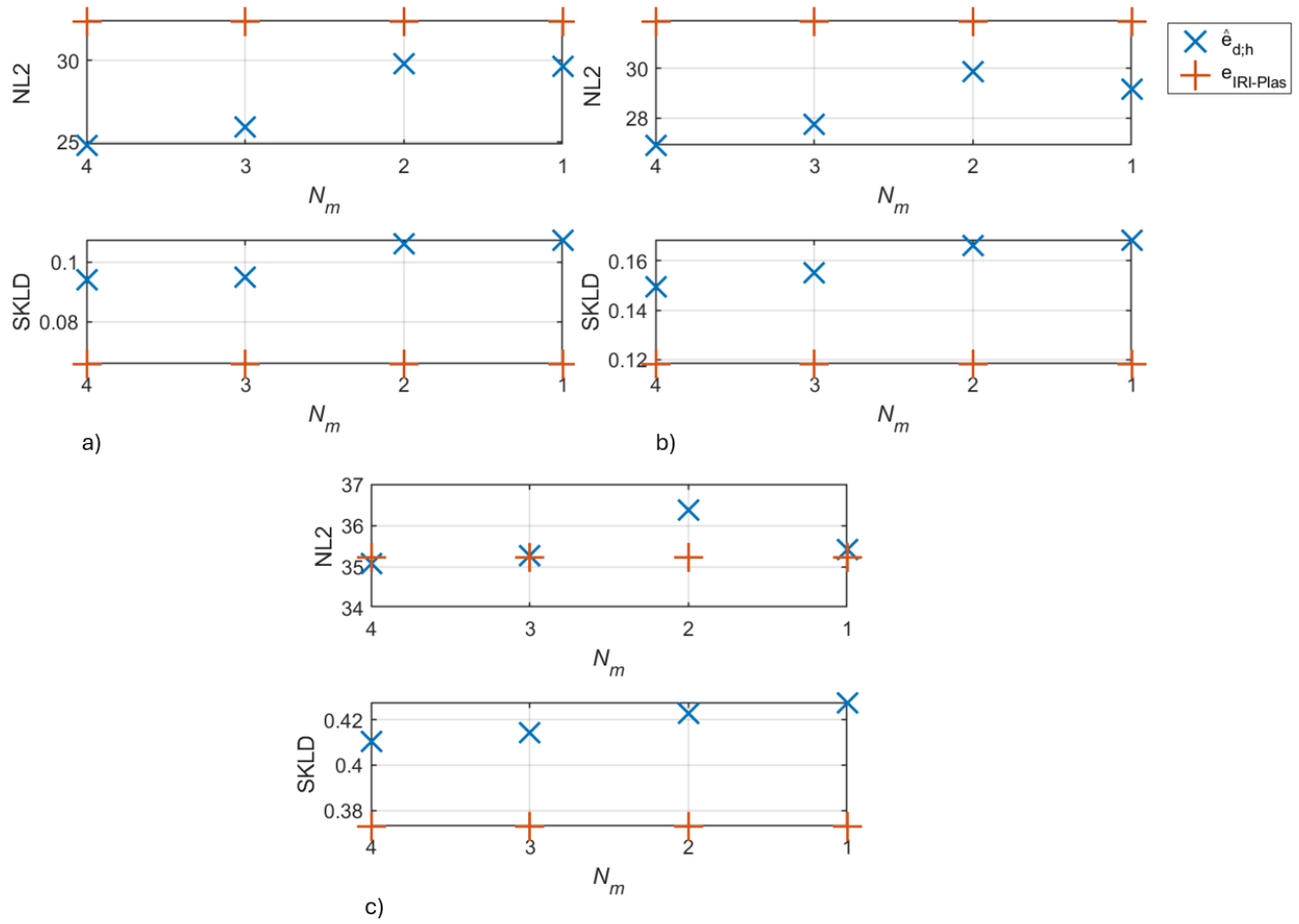
Çizelge 6.4: $\underline{G}_1$ ve $\underline{G}_2$ model matrisleri için istasyon sayısına bağlı geriçatma sonuçlarının sakin günler ve tüm saatler için iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilleri ile karşılaştırma metrik sonuçları.

Yükseklik	İstasyon Sayısı	$NL2_{G_1}$	$SKLD_{G_1}$	$NL2_{G_2}$	$SKLD_{G_2}$	$NL2_{IRI-Plas}$	$SKLD_{IRI-Plas}$
hmF2	83	25.84	12.41×10^{-2}	25.20	8.91×10^{-2}	32.51	6.92×10^{-2}
	48	25.10	11.77×10^{-2}	24.79	9.41×10^{-2}	32.51	6.92×10^{-2}
	20	27.26	13.67×10^{-2}	24.97	9.04×10^{-2}	32.51	6.92×10^{-2}
	9	29.02	13.99×10^{-2}	26.29	8.90×10^{-2}	32.51	6.92×10^{-2}
Chapman	83	26.38	14.21×10^{-2}	27.23	14.87×10^{-2}	31.91	11.81×10^{-2}
	48	25.86	13.83×10^{-2}	26.91	14.95×10^{-2}	31.91	11.81×10^{-2}
	20	27.32	14.91×10^{-2}	27.12	14.89×10^{-2}	31.91	11.81×10^{-2}
	9	28.05	15.18×10^{-2}	27.42	14.78×10^{-2}	31.91	11.81×10^{-2}
1000 km	83	33.56	37.08×10^{-2}	35.09	41.14×10^{-2}	35.22	37.25×10^{-2}
	48	33.43	36.80×10^{-2}	35.07	41.03×10^{-2}	35.22	37.25×10^{-2}
	20	34.32	37.76×10^{-2}	35.15	41.12×10^{-2}	35.22	37.25×10^{-2}
	9	34.38	38.61×10^{-2}	34.60	40.87×10^{-2}	35.22	37.25×10^{-2}

yaklaşık %20'sini kapsayacak şekilde 48 istasyonun kullanılmasına karar verilmiştir.

Yeryüzü alıcı istasyonları, seçilen tarihler için anlık olarak 40°'den büyük yükseliş açısı ile beş YKS uydusuna kadar görmektedir. YKS uydu sayısının tomografiye etkisinin incelenmesi için tomografi anında 40°'den büyük yükseliş açıları ile görülen uydu sayısı, N_m , yinelemeli bir şekilde azaltılarak geriçatma sonuçlarındaki etkisi karşılaştırma yöntemleri ile incelenmiştir. Karşılaştırma yöntem sonuçları 6.21'de verilmiştir.

Kestirilen ionküre elektron yoğunluğunun doğruluğu büyük ölçüde YKS uydu ve alıcı çiftleri arasındaki ETEİ verisinin sayısına ve ölçüm doğruluğuna bağlıdır. Yeniden yapılandırılan elektron yoğunluğunun doğruluğunun, YKS uydu sayısı ile ilişkisinin incelenmesi için yeryüzü alıcı istasyonları ile aralarında en çok ışıyan olan uydudan başlanarak sırasıyla uydu sayısı azaltılmıştır. Tüm yüksekliklerde iyonosonda dikey elektron yoğunluğu ile en benzer sonuçlara dört YKS uydusunun kullanıldığı durumda ulaşılmıştır. YKS uydu sayısı azaldıkça geriçatma başarımları kötüleşmektedir. $N_m = 2$ 'den sonra karşılaştırma metrikleri birbirleri ile benzer değerler almıştır.



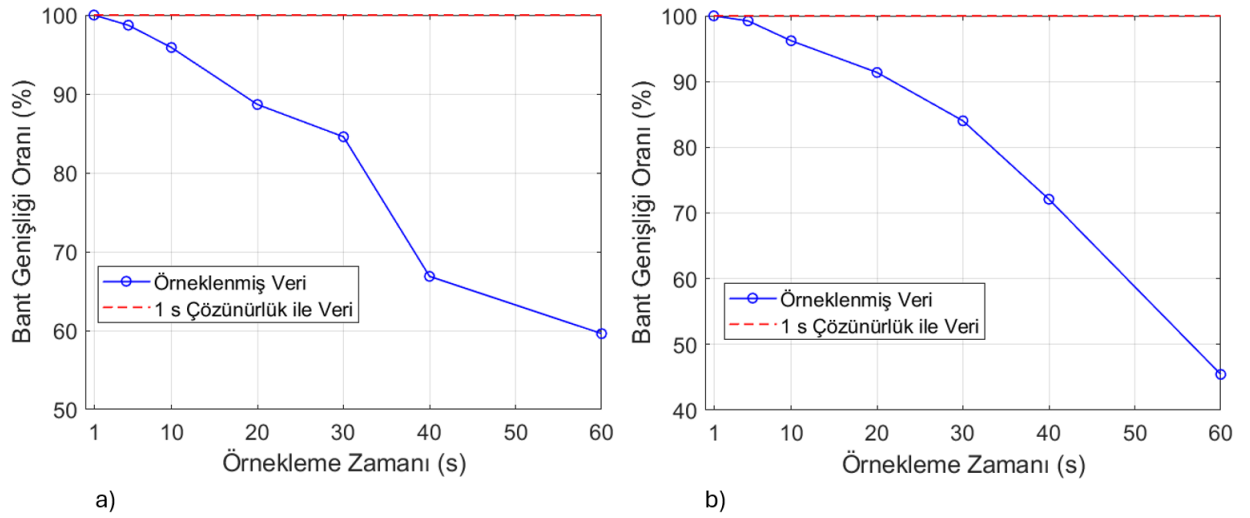
Şekil 6.21: Sakin günler ve tüm saatlerde farklı uydu sayıları (N_m) için elektron yoğunluğu yeniden yapılandırma sonuçlarının a) hmF2, b) Chapman ve c) 1000 km için tüm iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilleri ile karşılaştırma sonuçları.

YKS uyduları seyrüsefer sistemleri için vazgeçilmez araçlardır. En az dört YYS uydusundan gönderilen sinyallerin alıcıya ulaşma süresi ölçülerek üçgenleme yöntemi ile alıcının konum ve yükseklik değerleri belirlenebilmektedir [99]. Kestirilen değerlerin doğruluğunun sağlanması için YYS uydularının yörüngeleri dikkatlice ayarlanarak düzgün dağılan ve eşzamanlı çalışan bir takımyıldızı oluşturulmuştur. Yörünge koordinasyonu ile sürekli ve güvenilir kapsama alanı oluşturularak, herhangi bir anda yeryüzü alıcıları tarafından çoklu YYS uydusunun görüş hattı içerisinde olması sağlanmıştır. Böylece hassas konum ve yükseklik kestirimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmektedir. İyonküre elektron yoğunluğu geriçatımı sırasında dikey yollara ait veriler YYS uydu ile yeryüzü alıcı istasyon çiftleri ve yatay yollara ait veriler YYS-AYY uydu çiftleri kullanılarak elde edilmektedir. Yeryüzü üzerindeki alıcıların görüş hattı içerisinde gördüğü YYS uydularının sayısı, uydu yörüngelerinin eşzamanlı çalış-

şacak şekilde ayarlanması nedeniyle çoklu sayıda olmakta böylece dikey yollara ait yeterli sayıda veri elde edilebilmektedir. Ancak bazı bölgelerden tomografi anlarında AYY uyduları geçmemektedir. Yatay verilerin yeterli olmadığı durumda sanal AYY uyduları eklenmekte ve sanal yatay yollar için ETEİ değerleri hesaplanarak tomografide kullanılmaktadır.

IONOLAB-Fusion algoritması ile YKS-AYY uydu çiftlerine ait ETEİ verileri kullanılırken çiftler arasındaki ışınların izlediği yatay yollar 11 dk'lık GAD süresi boyunca izlenmektedir. AYY uyduları üzerindeki alıcı kayıtları 1 s periyot ile veri sağlamaktadır. YKS-AYY uyduları arasındaki ışınlar, tomografi için seçilen $\Delta\theta$ ve $\Delta\phi$ değerlerine bağlı olarak ardışık saniyelerde aynı hücrelerden geçebilmekte, bu da tomografi sırasında fazladan işlem yüküne neden olmaktadır. Bu çalışmada AYY-YKS uydu çiftleri arasındaki veriler için yüksek frekanslı bilgi kaybını en aza indirirken iyonküre GAD süresi içerisinde uygun bir veri çözünürlüğünün belirlenmesi için bir gözlem yapılmış ve iki aşamalı bir yöntem geliştirilmiştir. GAD süresi boyunca YKS-AYY uyduları arasındaki ışınların geçtiği küresel hücrelerin leksikografiksel indeksleri ve elektron yoğunluğu değerleri IONOLAB-mRAY ile hesaplanarak kaydedilmiş ve bu değerlerin en çok 20 s içerisinde değiştiği belirlenmiştir. AYY uydularının YKS uydularına göre daha hızlı olması nedeniyle GAD süresi boyunca AYY uyduların bulunduğu hücreye ait elektron yoğunluğu değerleri kaydedilmiştir. Bu verilerin bant genişliği hesaplanmış ve sırasıyla 5, 10, 20, 30, 40 ve 60 s ile örneklenmiştir. Örnek seyretilmeden kaynaklanan bilgi kaybının incelenmesi için seyretilen ölçüme ait bant genişliği değeri ile orijinal verinin bant genişliği değeri oranlanmıştır. AYY uyduları ile YKS uyduları arasındaki ışın sayısı tarih ve saate göre EK B'de verilmiştir. Şekil 6.22'de 4 Nisan 2013, saat 03:00 GS'de AYY-1 ve PRN 13 uydusu, ve 17 Nisan 2011, saat 12:00 GS AYY-6 ve PRN 17 uydusu arasındaki ışınlar için bant genişliği oranları örnek olarak verilmiştir.

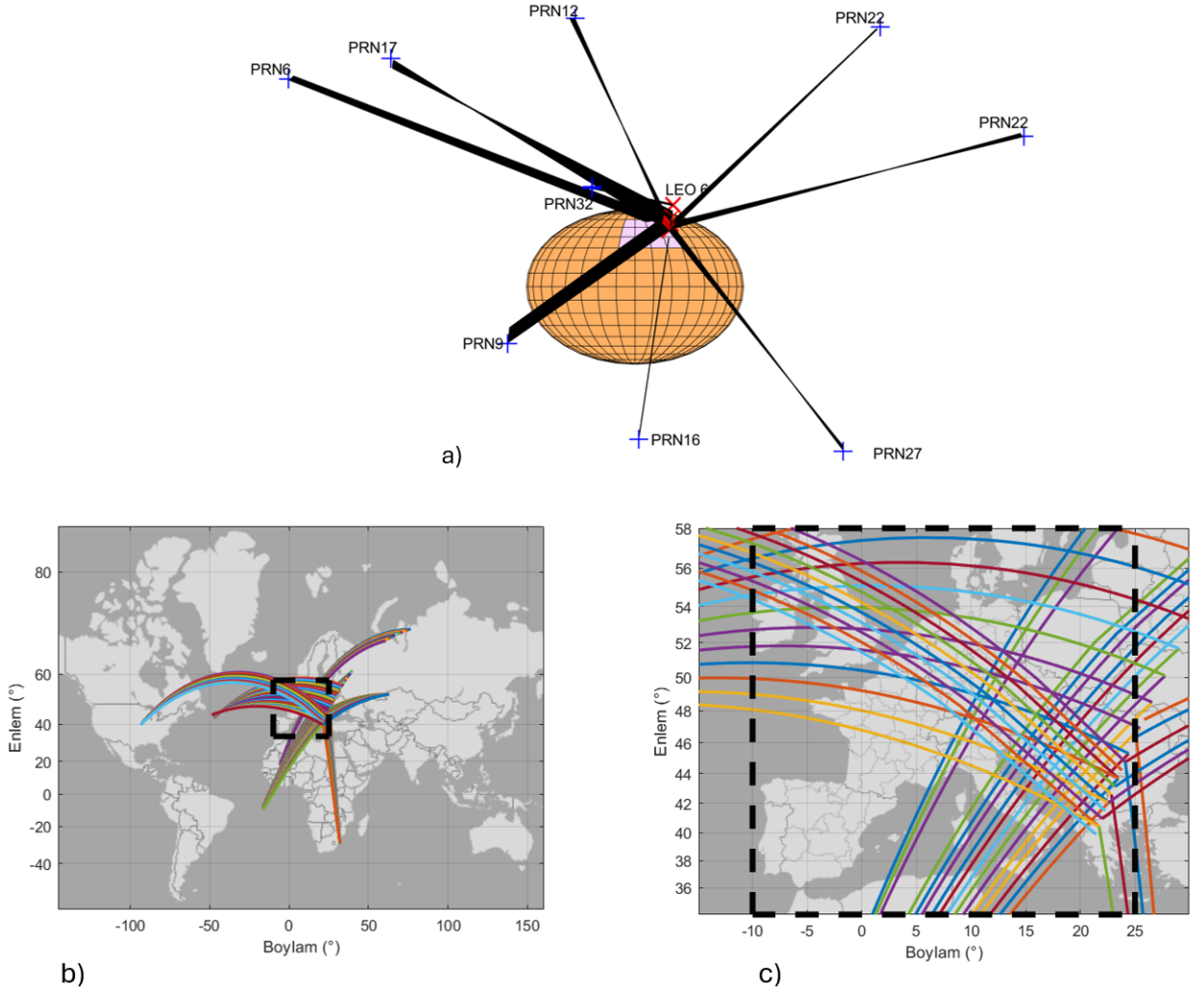
20 s'den daha küçük örnekleme zamanlarında leksikografiksel indeks değişmemekte, bant genişliği oranındaki fark zamana bağlı değişimden dolayı meydana gelmektedir. 20 s ve 30 s için bant genişliği oranları %85 üzerinde değerler almaktadır. 30 saniyeden sonra bant genişliği oranı çok hızlı azalmaktadır. Bu nedenle hücre çakışmasını önleyerek ışınların iyonküreden geçerken farklı hücrelerden geçmesini sağlamak amacıyla zaman çözünürlüğü 30 s olarak belirlenmiştir. AYY uydusu için 8 Nisan 2015, saat 12:00 GS için 30 s çözünürlükte 11 dakikalık GAD periyodu için AYY-YKS uyduları arasındaki ışınların 3-B gösterimleri Şekil 6.24'de verilmiştir. Şekil 6.24b, 3-B gösterimin 2-B enlem ve boylam düzlemine iz-



Şekil 6.22: a) 4 Nisan 2013, saat 03:00 GS, b) 17 Nisan 2011, 12:00 GS için 11 dk GAD süresi boyunca izlenen elektron yoğunluğunun bant genişliğinin zamanda örneklenmesi ile hesaplanan bant genişliğine oranı.

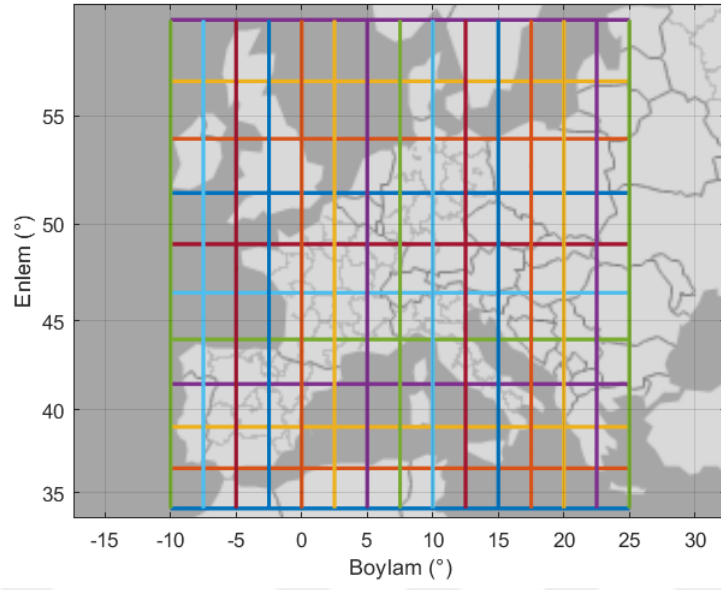
düşümünü göstermektedir. Şekil 6.24c, bölgenin sınırına odaklanmış yakınlştırılmış ışınlar verilmiştir.

Bu çalışmada ayrıca kullanıcının tercihi üzerine sanal yatay yollar da iyonküre elektron yoğunluğu tomografisine dahil edilebilmektedir. GIM-TEİ haritaları ile çözünürlüğünün uyumlu olması için $5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ enlem ve boylamda yatay yollar tomografiye eklenmiştir. Bu yatay yollar yüksekliği elektron yoğunluğunun tepe değerler aldığı 400 km'ye ve AYY uydu yüksekliği 800 km'den iyonküre yüksekliği 2800 km'ye uzanacak şekilde seçilmiştir.



Şekil 6.23: 8 Nisan 2015, saat 12:00 GS, a) AYY ile YKS uyduları arasındaki 3-B ışınların gösterimi, b) Işınların yeryüzüne izdüşümü, c) Genişletilmiş bölge üzerinde yer alan ışınlar.

Genel sonuçları hesaplamak için, $\underline{G}_2$ model matrisi Nisan ayı için MSA yıllarından $N_d = 90$ kullanılarak oluşturulurken, $\underline{G}_1$ model matrisi belirtilen tarih ve saatler için IRI-Plas modelin $N_d = 3$ gün geriye gidilerek hesaplanan elektron yoğunluğu verisi kullanılarak oluşturulmuştur. IONOLAB-Fusion algoritması ile elektron yoğunluğu yeniden yapılandırması, belirtilen tüm tarih ve saatler için hem $\underline{G}_1$ hem de $\underline{G}_2$ model matrisleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yeniden yapılandırma, yeryüzü alıcı istasyonu ve YKS uydu çiftlerini, AYY-YKS uydu çiftlerini ve sanal AYY yollarını içermektedir. Çizelge 6.5, tomografi sonuçları ile tüm iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilleri arasında, tüm saatler boyunca hem sakin hem de bozulmalı günleri kapsayan kapsamlı bir karşılaştırma sunmaktadır. Ayrıca, IRI-Plas modelinden hesaplanan elektron yoğunluğu değerleri de referans olarak aynı veri setiyle karşılaştırılmıştır. Çizelge 6.5'deki senaryo sütunu, elektron yoğunluğu yeniden yapılandırması



Şekil 6.24: Sanal yatay ışınlar.

için IONOLAB-Fusion yönteminde kullanılan veri setlerini göstermektedir. Senaryo 6'da (S6) yeniden yapılandırma sadece yeryüzü alıcı istasyonları ve YKS uydu çiftleri arasındaki yollar kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Senaryo 7'de (S7), tomografi anındaki AYY-YKS uydu çiftleri arasındaki yatay ışın yolları S6'deki verilere eklenmektedir. Senaryo 8'de (S8), GAD süresi boyunca AYY-YKS uydu çiftleri arasındaki yollar izlenerek S6'daki verilere eklenmektedir. Son olarak, Senaryo 9'da (S9), hem yatay hem de eğimli sanal AYY ışınları S8'deki verilere eklenmektedir.

Çizelge 6.5: $\underline{G}_1$ ve $\underline{G}_2$ model matrisleri için senaryolar için tüm veri setleri üzerinden genel karşılaştırma sonuçları.

İyonküre Durumu	Senaryo	Yükseklik	$NL2_{G1}$	$SKLD_{G1}$	$NL2_{G2}$	$SKLD_{G2}$	$NL2_{IRI-Plas}$	$SKLD_{IRI-Plas}$
Sakin	S6	hmf2	27.26	13.67×10^{-2}	24.97	9.04×10^{-2}	32.51	6.92×10^{-2}
		Chapman	27.32	14.91×10^{-2}	27.12	14.89×10^{-2}	31.91	11.81×10^{-2}
		1000 km	34.32	37.76×10^{-2}	35.15	41.12×10^{-2}	35.22	37.25×10^{-2}
	S7	hmf2	27.12	13.31×10^{-2}	24.95	9.03×10^{-2}	32.51	6.92×10^{-2}
		Chapman	27.23	14.78×10^{-2}	27.10	14.89×10^{-2}	31.91	11.81×10^{-2}
		1000 km	34.27	37.71×10^{-2}	35.14	41.12×10^{-2}	35.22	37.25×10^{-2}
	S8	hmf2	24.34	10.75×10^{-2}	24.68	8.97×10^{-2}	32.51	6.92×10^{-2}
		Chapman	26.17	13.66×10^{-2}	27.29	14.96×10^{-2}	31.91	11.81×10^{-2}
		1000 km	33.72	37.33×10^{-2}	35.42	41.33×10^{-2}	35.22	37.25×10^{-2}
	S9	hmf2	23.80	10.28×10^{-2}	23.89	8.85×10^{-2}	32.51	6.92×10^{-2}
		Chapman	25.78	13.52×10^{-2}	27.14	14.85×10^{-2}	31.91	11.81×10^{-2}
		1000 km	34.13	38.08×10^{-2}	35.73	41.28×10^{-2}	35.22	37.25×10^{-2}
Bozulmalı	S6	hmf2	41.55	44.54×10^{-2}	35.01	21.02×10^{-2}	51.74	99.56×10^{-2}
		Chapman	51.87	30.85×10^{-2}	47.85	28.72×10^{-2}	55.60	63.85×10^{-2}
		1000 km	59.50	48.61×10^{-2}	56.61	48.87×10^{-2}	65.55	77.45×10^{-2}

S6’da, sakın günler için hmF2’ye kadar olan karşılaştırma sonuçları incelendiğinde, $\underline{G}_2$ modeli matrisi kullanılarak gerçekleştirilen yeniden yapılandırma sonuçlarının, IRI-Plas modelinden hesaplanan elektron yoğunluğu değerlerine göre iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profillerine daha fazla benzerlik gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, model matrisi olarak $\underline{G}_2$ kullanılarak gerçekleştirilen yeniden yapılandırma sonuçları, düzgelenmiş metrik uzaklık sonuçlarında $\underline{G}_1$ kullanılarak elde edilen sonuçlara göre daha iyi başarımlar göstermektedir. SKLD sonuçları, IRI-Plas model sonuçlarının, $\underline{G}_1$ kullanılarak yeniden yapılandırma sonuçlarına göre iyonosonda dikey elektron yoğunluğu değerlerine daha benzer bir şekil sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu benzerlik, IRI-Plas modelinin sakın günlerde orta enlem bölgesindeki tutarlı ve başarılı başarımlarından kaynaklanmaktadır. $\underline{G}_2$ model matrisi kullanılarak gerçekleştirilen yeniden yapılandırma sonuçlarında, IRI-Plas modeli ile daha benzer SKLD sonuçları elde edilmektedir. Bu durum, $\underline{G}_2$ model matrisine, $\underline{G}_1$ ’e göre daha fazla ön bilginin dahil edilmesi neden olabilmektedir. $NL2_{IRI-Plas}$ ve $SKLD_{IRI-Plas}$ karşılaştırma sonuçları tüm senaryolarda sakın günler için aynıdır. S7’de, anlık RO verilerinin eklenmesiyle $NL2_{G1}$, $SKLD_{G1}$, $NL2_{G2}$ ve $SKLD_{G2}$ sonuçlarında hmF2’ye kadar hafif bir iyileşme vardır, ancak

bu iyileşmenin etkisi büyük değildir. Ancak, 11 dakikalık GAD süresi içerisindeki RO verilerinin tomografiye dahil edilmesi, $NL2_{G_1}$ ve $SKLD_{G_1}$ karşılaştırma yöntemi sonuçlarında gözlenebilir bir iyileşmeye yol açmaktadır. Aynı zamanda $NL2_{G_2}$, $SKLD_{G_2}$, sonuçlarında da iyileşme vardır. Sanal AYY ışınlarının kullanıldığı S8 senaryosunda, hmF2 yüksekliğine kadar $NL2_{G_1}$, $SKLD_{G_1}$, $NL2_{G_2}$ ve $SKLD_{G_2}$ değerlerinde iyileşmeler gözlenmektedir. Sakin günler için Chapman yüksekliğine ve 1000 km'ye kadar karşılaştırma sonuçları incelendiğinde, $\underline{G}_1$ ve $\underline{G}_2$ kullanılarak yeniden yapılandırılan elektron yoğunluğunun tüm senaryolar için Chapman yüksekliğine kadar düzgelenmiş metrik uzaklık sonuçlarında daha iyi değerler elde edildiği belirlenmiştir. 1,000 km yüksekliğine kadar yapılan karşılaştırma sonuçlarının hem geriçatma sonuçları hem de IRI-Plas için diğer yüksekliklere göre daha yüksek değerler aldığı belirlenmiştir. Bu durum, IONOLAB-Fusion tarafından yeniden yapılandırma için kullanılan iyonküre modeli ile iyonosondalar tarafından geriçatma algoritmasında kullanılan iyonküre modelinin arasındaki yüksekliğe bağlı artan farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Bu sonuçlar ile sakin günlerde, $\underline{G}_2$ model matrisinin kullanılmasının, RO verileri kullanılmadan bile elektron yoğunluğu profilleri oluşturduğu belirlenmiştir. RO verileri kullanılmadan, daha fazla ön bilgiyi entegre eden $\underline{G}_2$ model matrisi, $\underline{G}_1$ 'den elde edilen sonuçlardan daha iyi başarımlar göstermektedir. Ek olarak, RO verilerinin GAD periyoduna ve sanal AYY ışınlarına dahil edilmesi, hem $\underline{G}_1$ hem de $\underline{G}_2$ kullanılarak tomografi için Chapman yüksekliğine kadar metrik mesafe sonuçlarını geliştirmektedir ve $\underline{G}_1$ kullanıldığında daha belirgin bir iyileşme gözlemlenmektedir. hmF2, Chapman yüksekliği ve 1,000 km'ye kadar olan bozulmalı günler için sonuçlar analiz edildiğinde, hem $\underline{G}_1$ hem de $\underline{G}_2$ kullanılarak elektron yoğunluğunun yeniden yapılandırılmasının IRI-Plas modeli tarafından hesaplanan elektron yoğunluğundan daha iyi başarımlar gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle, daha fazla ön bilgiyi entegre eden $\underline{G}_2$ model matrisinden elde edilen sonuçlar, $\underline{G}_1$ 'e göre daha üstün başarımlar sergilemektedir. Bozulmalı günlerde bölgeden AYY ışını geçişi olmadığı için S7 ve S8 senaryoları sonuçları paylaşılmamıştır.

MSA yıllarından $N_d = 90$ gün kullanılarak oluşturulan $\underline{G}_2$ model matrisi ile elde edilen geriçatma sonuçları iyonosonda konumlarına IRI-Plas modeli ile hesaplanan dikey elektron yoğunluğu profilleri ile karşılaştırma metrikleri kullanılarak karşılaştırılmış sonuçlar Çizelge 6.6'da verilmiştir.

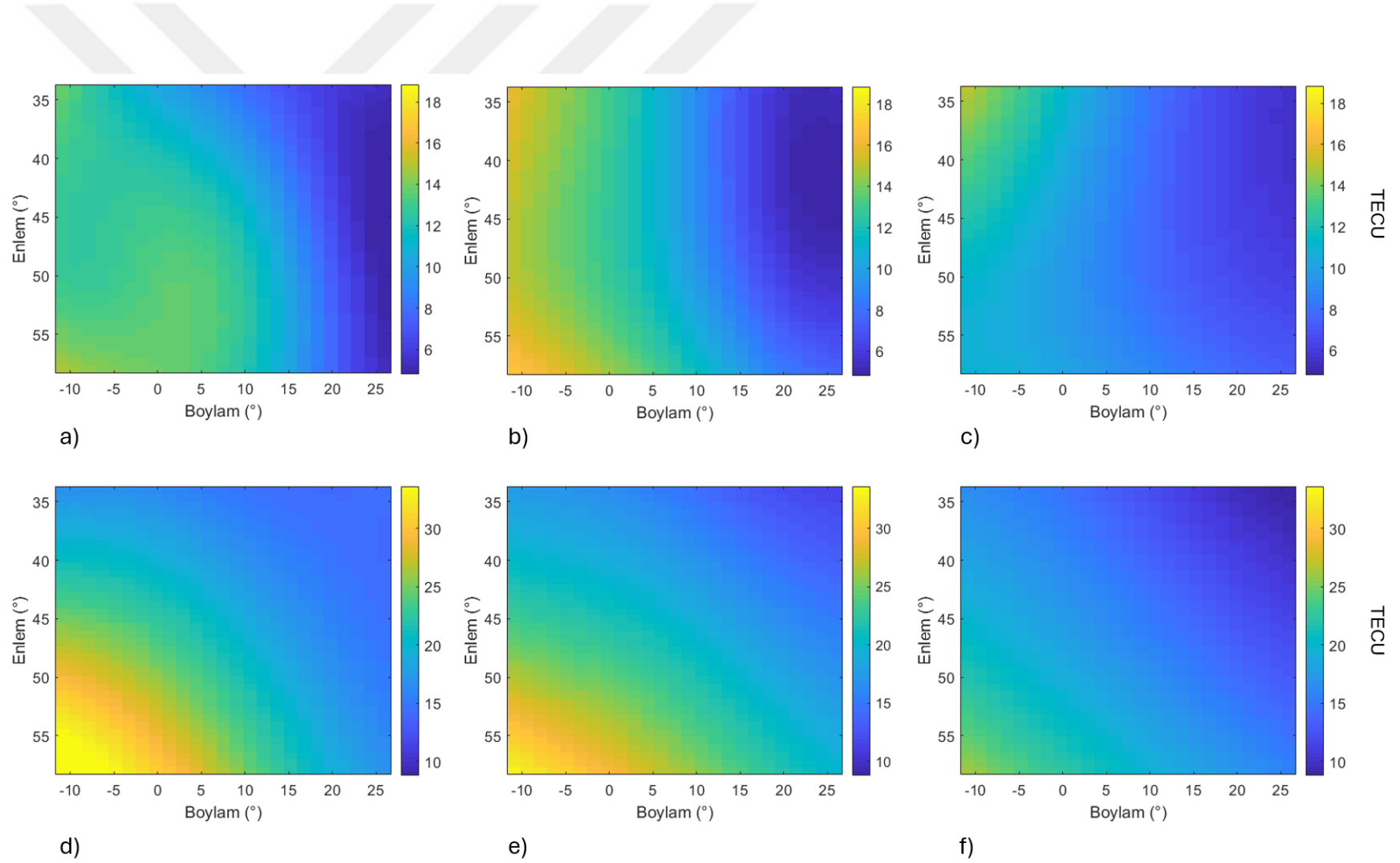
Çizelge 6.6: $\underline{G}_2$ model matrisi için senaryolar üzerinden tüm veri setlerinin geri çatma sonuçlarının IRI-Plas modeli ile hesaplanan elektron yoğunluğu profilleri ile genel karşılaştırma sonuçları.

İyonküre Durumu	Senaryo	Yükseklik	NL2	SKLD
Sakin	S6	hmf2	22.21	2.86×10^{-2}
		Chapman	27.24	2.65×10^{-2}
		1000 km	28.49	2.71×10^{-2}
	S7	hmf2	22.23	2.87×10^{-2}
		Chapman	27.26	2.64×10^{-2}
		1000 km	28.51	2.71×10^{-2}
	S8	hmf2	24.02	2.92×10^{-2}
		Chapman	29.47	2.66×10^{-2}
		1000 km	30.71	2.69×10^{-2}
	S9	hmf2	25.64	2.49×10^{-2}
		Chapman	31.69	2.27×10^{-2}
		1000 km	33.07	2.32×10^{-2}
Bozulmalı	S6	hmf2	27.19	4.17×10^{-2}
		Chapman	26.96	3.50×10^{-2}
		1000 km	27.21	4.11×10^{-2}

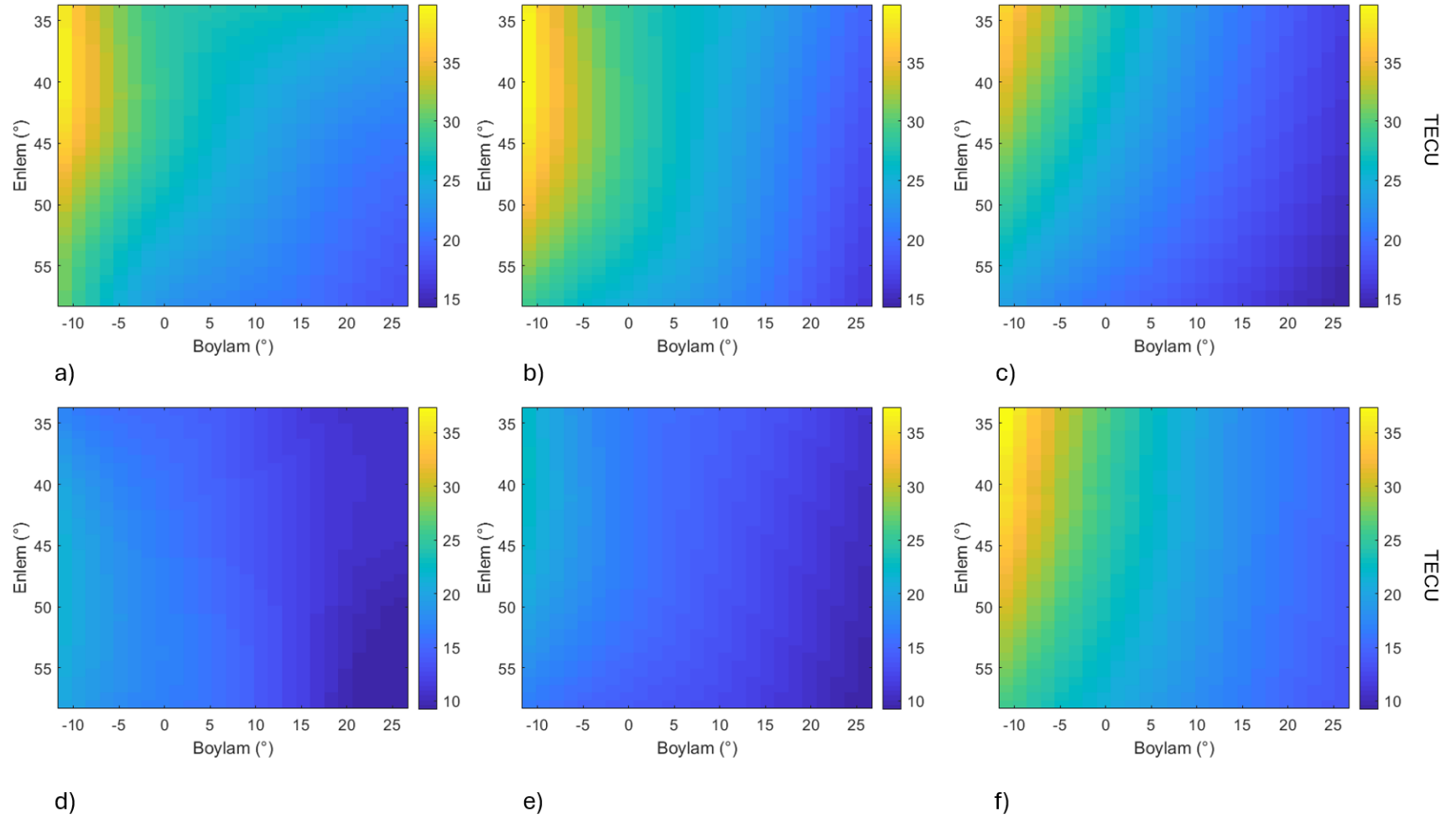
Çizelge 6.6’da sakın ve bozulmalı günler için geriçatma sonuçları ve IRI-Plas modeli elektron yoğunluğu profilleri arasında hesaplanan SKLD değerleri, Çizelge 6.5’deki SKLD değerlerinden daha küçük değerler almıştır. Bunun nedeni tomografi sırasında iyonküreye ait ön bilgi olarak IRI-Plas modelinden hesaplanan elektron yoğunluğu değerlerinin kullanılmasıdır. Özellikle sakın günlerde geriçatma sonuçları ve IRI-Plas modeli elektron yoğunluğu profilleri şekilsel olarak birbirleri ile uyum göstermekte, bozulmalı günlerdeki fark sakın günlere göre artmaktadır. Tomografi sonucunda kestirilen elektron yoğunluğu profilleri, genellikle IRI-Plas modeli ile hesaplanan dikey elektron yoğunluğu profilleri ve iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profilleri arasında değerler almaktadır. Sakın günler için tüm senaryolarda geriçatma sonuçları hmF2 yüksekliğine kadar en küçük NL2 değerlerini almış, Chapman ve 1000 km’ye kadar bu değerler artmıştır. Anlık RO verilerinin eklenmesi ile NL2 değerleri S7 senaryosunda, S6’ya göre daha büyük değerler almıştır. Ancak bu fark anlık RO değerlerinin tomografiye katkısının az olması nedeniyle çok küçüktür. 11 dakika GAD süresi içerisindeki RO verilerinin tomografiye katılması ile geriçatma sonuçları IRI-Plas modelinden hesaplanan elektron yoğunluğu değerlerinden uzaklaşarak, iyonosonda dikey elektron yoğunluğu profil değerlerine yakınlaşmıştır. Bu nedenle S8 senaryosu geriçatma sonuçları ile IRI-Plas modeli sonuçları arasında NL2 sonuçlarında, S6 ve S7 senaryolarına göre büyük

fark gözlemlenmiştir. Sakin günler için en büyük metrik uzaklık farkı, Çizelge 6.5’de elde edilen bilgi ile uyumlu olarak S9’da olduğu belirlenmiştir. S6 senaryosunda bozulmalı günler için hesaplanan NL2 sonuçları, sakin günlere göre daha büyük değerler almıştır. Chapman ve 1000 km için geriçatma ve IRI-Plas modeli elektron yoğunluğu profilleri arasındaki düzgelenmiş metrik uzaklık farkı sakin günlerden daha küçük değerler almıştır. Çizelge 6.5’te iyonosonda dikey elektron yoğunluğu ve Çizelge 6.6’da IRI-Plas modeli dikey elektron yoğunluğu profilleri referans alınarak hesaplanan düzgelenmiş elektron yoğunluğu profillerinin benzer ölçeklerde değer aldığı gözlemlenmiştir.

Bölge içerisindeki tüm enlem ve boylam noktalarında TEİ değerleri, her bir hücre içindeki elektron yoğunluğunun ilgili hücrenin yüksekliğiyle çarpılması ve ardından tüm yükseklik aralığı boyunca toplanmasıyla hesaplanabilmektedir. IGS’ten rutin olarak sağlanan GIM-TEİ haritaları yaygın olarak güvenilir bir iyonküre haritası olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada, Center for Orbit Determination in Europe (CODE)’den elde edilen GIM-TEİ, IONOLAB-Fusion tarafından IONOLAB-mRAY kullanılarak hesaplanan iyonküre TEİ’nin doğruluğunu değerlendirmek için kullanılmıştır. IRI-Plas modelinden hesaplanan TEİ haritaları, referans değer olarak kullanılmak için GIM-TEİ ile karşılaştırılmıştır. Şekil 6.25 ve 6.26’de, CODE-GIM, IONOLAB-Fusion TEİ ve IRI-Plas TEİ haritalarından örnekler sırasıyla Şekil 6.17 ve 6.18’deki örnekler için sunulmuştur. CODE-GIM haritaları sırasıyla $2.5^{\circ} \times 5^{\circ}$, enlem ve boylamda çözünürlüğe sahiptir. Karşılaştırma yapılırken CODE-GIM haritalarına, tomografi için seçilen enlem ve boylam çözünürlüklerine uyum sağlayacak şekilde aradeğerleme yapılmaktadır.



Şekil 6.25: 25 Nisan 2013, saat 03:00 GS (bozulmalı gün) için a) CODE-TEİ, b) IONOLAB-Fusion TEİ, c) IRI-Plas TEİ, 17 Nisan 2011, saat 08:00 GS (sakin gün) için d) CODE-TEİ, e) IONOLAB-Fusion TEİ, f) IRI-Plas TEİ.



Şekil 6.26: 8 Nisan 2015, saat 18:00 GS (sakin gün) için g) CODE-TEİ, h) IONOLAB-Fusion TEİ, i) IRI-Plas TEİ, 24 Nisan 2012, saat 23:00 GS (bozulmalı gün), j) CODE-TEİ, k) IONOLAB-Fusion TEİ, l) IRI-Plas TEİ.

Şekil 6.25 ve 6.26’de IONOLAB-Fusion’dan elde edilen TEİ haritaları, IRI-Plas modelinden hesaplanan TEİ haritalarına göre sakin ve bozulmalı günlerde, günün farklı saatlerinde değer ve dağılım olarak GİM-TEİ haritalarına daha benzerdir. Haritalar arasındaki fark, Kök Ortalama Kare hatası (RMS) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N_{\theta}N_{\phi}} \sum_{n_{\theta}=1}^{N_{\theta}} \sum_{n_{\phi}=1}^{N_{\phi}} (x(n_{\theta}, n_{\phi}) - \hat{x}(n_{\theta}, n_{\phi}))^2} \quad (6.5)$$

x , GİM-TEİ, $\hat{x}$ IONOLAB-Fusion ve IRI-Plas modeli ile hesaplanan TEİ haritalarını ifade etmektedir. Şekil 6.1’deki genişletilmiş bölge için Eşitlik 4.5 ve 4.6 değerleri sırasıyla 25 ve 36 olup toplamda 900 ızgara noktası oluşmaktadır. CODE-TEİ ile IONOLAB-Fusion ve IRI-Plas modelinden hesaplanan haritalar arasındaki RMS değerleri, tüm ızgara noktaları, tüm günler ve saatler boyunca hesaplanmıştır. Karşılaştırma sonuçları Çizelge 6.7’de verilmiştir.

Çizelge 6.7: Sakin ve bozulmalı günlerde, günün farklı saatlerinde CODE-TEİ haritaları ile IONOLAB-Fusion TEİ haritaları ve IRI-Plas TEİ haritalarının RMS karşılaştırma sonuçları.

İyonküre Durumu	$\text{RMS}_{\text{IONOLAB-Fusion}}$	$\text{RMS}_{\text{IRI-Plas}}$
Sakin Günler	1.69 TECU	4.46 TECU
Bozulmalı Günler	1.80 TECU	5.70 TECU

GİM-TEİ haritası referans değer olarak kullanıldığında, IONOLAB-Fusion ile hesaplanan TEİ haritalarının IRI-Plas modeline göre sakin günlerde %37.39 ve bozulmalı günler için %31.58’lik bir iyileşme olduğu gözlemlenmiştir.

IONOLAB-Fusion algoritması, uygulama kolaylığı, iyonosonda ve GİM-TEİ ile metrik uzaklık ve şekilsel olarak uyumu, yerküre üzerindeki herhangi bir bölgeye ve herhangi bir iyonküre duruma uygulanabilirliği, güvenilirliği ve gürbüzlüğü ile elektron yoğunluğu profillerinin kestirilmesi ve güncellenmesi için çok yönlü bir yöntemdir.

7. SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında, yeryüzü alıcı istasyonları ve AYY uyduları üzerindeki alıcılar ile, en iyilenmiş sayıda ve dağılımda eğik ve yatay sanal yolların kullanılabildiği 4-B iyonküre elektron yoğunluğu geriçatma algoritması, IONOLAB-Fusion, geliştirilmiştir. Kullanıcı dostu algorithmaya sadece ilgilenilen bölgenin sınır koordinatları, tomografinin yapılacağı tarih ve saat ile model matrise dahil edilecek gün sayısının girdi olarak verilmesi gerekmektedir. İyonküre, değişken yapısının modellenebilmesi için enlem, boylam ve yükseklikte 3-B küresel hücrelere ayrılmaktadır. Uzak-zamana bağı 4-B iyonküre, leksikografiksel olarak sıralanarak 1-B vektör ile ifade edilebilmektedir. Model matris oluşumu iki farklı yaklaşım ile incelenerek eniyilenmiştir. İlk yaklaşımda model matris, tomografi tarihinden seçilen gün kadar geriye gidilerek hesaplanan elektron yoğunluğu değerleri ile oluşturulmaktadır. İkinci yaklaşımda tomografi tarihinin yılı ile benzer güneş aktivite günlerini içeren yıllara ait veri setleri kullanılarak model matris oluşturulabilmektedir.

Model matris oluşumu sırasında IONOLAB-mRAY ile arka plan iyonküresi IRI-Plas modeli kullanılarak oluşturulacak en uygun veri setinin belirlenmesi için IONOLAB-MAP ve IONOLAB-CK yöntemleri ile hesaplanan yüksek çözünürlüklü TEİ ve foF2 haritaları girdi olarak kullanılmıştır. Tercih edilen yöntem ile model matris oluşturulduktan sonra azalan sırada en yüksek enerjiyi içeren tekil değerleri elde etmek ve sinyal alt uzayını ifade eden taban vektörleri hesaplayabilmek için model matrise, Tekil Değer Ayrışım (TDA) yöntemi uygulanmıştır. IONOLAB-Fusion, sinyal alt uzayının belirlenmesinde en yüksek enerjili tekil değerleri otomatik olarak tespit edilmekte ve ilgili taban vektörlerin katsayıları Enaz Kareler Kestirimi ile kestirilmektedir. ETEİ değerlerinden oluşan ölçüm vektörü, mümkün olduğunca düzenli kare örnekleme sağlamak ve hem yatay hem de dikey yönde aynı veya çok yakın hücrelerden geçen farklı ışın yollarından kaçınmak için ilgilenilen bölgedeki en uygun sayıda YKS alıcısı kullanılarak oluşturulmaktadır. Ölçüm vektörü IONOLAB-STEÇ ve geliştirilen IRI-Plas-mSTEÇ algoritmaları ile hesaplanmaktadır. IRI-Plas-mSTEÇ ile ETEİ hesaplanırken en uygun veri setinin belirlenmesi için IONOLAB-MAP ve IONOLAB-CK yöntemleri ile hesaplanan yüksek çözünürlüklü TEİ ve foF2 haritaları girdi olarak kullanılmaktadır. Işının bir hücre içerisinde kat ettiği gerçek yol mesafeleri hesaplanarak örnekleme matrisi oluşturulmaktadır. Yatay yollar için, iyonküre Geniş Anlamda Durağanlık (GAD) periyodu içerisinde YKS ve AYY uyduları arasındaki ışınlar izlenerek uzak-zamanda dikey

çözünürlüğü yüksek ölçüm verileri elde edilmektedir. IONOLAB-Fusion, hem dikey hem de yatay yollarda en uygun sayıda örnekleme kullanarak yerküre üzerindeki herhangi bir bölge için kapalı formda, kolay uygulanabilir, işlem karmaşıklığı az, yüksek doğrulukta ve gürbüz iyonküre elektron yoğunluğu tomografisi sağlamaktadır.

IONOLAB-Fusion, en uygun sayıda yeryüzü alıcı istasyonu ile Avrupa Bölgesi'ne uygulanmıştır. Algoritmada YKS yeryüzü alıcı ile YKS uydu çiftleri ve AYY uyduları üzerinde bulunan alıcılar ile YKS uydu çiftleri arasındaki ışın yolları otomatik olarak belirlenmektedir. Başarım değerlendirmesi, seçilen gün ve saatler için iyonosonda profillerinin hem şekilsel benzerliğin hem de düzgelenmiş metrik uzaklık değerlerinin farklı yüksekliklere kadar karşılaştırılmasına dayanmaktadır. İyonküre arka plan modelleri IRI ve IRI-Plas'ın orta enlem iyonkürenin saatlik-aylık ortalama yapısını en iyi şekilde temsil ettiği göz önüne alınarak, IONOLAB-Fusion, orta enlem iyonküresinin elektron yoğunluğu profillerinin hem sakin hem de bozulmalı günler için tüm saatler, iyonküre durumları ve iyonosonda konumları için, kapalı formda yalnızca en önemli bir veya iki tekil değer kullanarak yeniden yapılandırılmasında olağanüstü bir başarımlı göstermektedir. İyonosonda dikey elektron profilleri ve yeniden yapılandırılan elektron yoğunluğunun iyonosonda konumundaki değerleri birbirleri ile karşılaştırılmış, en iyi uyumun sakin günlerde ve yaklaşık %20 düzgün karesel örneklemeyle karşılık gelen en uygun sayıda yeryüzü alıcı istasyon kullanılarak hmF2 ve Chapman yüksekliğine kadar elde edildiği gözlemlenmiştir. Tek bir tarih, saat ve iyonosonda için karşılaştırma değerleri, 17 Nisan 2011 saat 08:00 GS'deki sakin günde sadece yeryüzü alıcı istasyonları kullanılarak PQ052 iyonosonda konumunda, NL2'de 6.62'ye ve SKLD'de 1.48×10^{-2} değerlerine kadar ulaşabilmektedir. EB040 iyonosonda konumunda, 24 Nisan 2012 saat 23:00 GS, bozulmalı gününde bile yeniden yapılandırılan elektron yoğunluğunun iyonosonda ile uyumu, hmF2 yüksekliğine kadar, IRI-Plas modelinin iyonosonda ile düzgelenmiş metrik uzaklık karşılaştırmasından %43.5 daha iyidir.

Algoritmanın genel başarımlı hem sakin hem de bozulmalı günlerde, tüm saatler ve iyonosondalar üzerinden ve üç ayrı yükseklik sınırına kadar incelenmiştir. En iyi sonuçlar yeryüzü alıcı istasyonları yaklaşık %20 örnekleme oranıyla düzenli kare örneklemeyle eniyilendiğinde, görüş hattı içerisindeki tüm uydular kullanıldığında ve iyonküre GAD süresi içinde artırılmış sanal ve gerçek yatay ışın yollarını dahil ettiğimizde elde edildiği belirlenmiştir. IONOLAB-Fusion dikey elektron yoğunluğu profillerinin, iyonosonda elektron yoğunluğu

profilleriyle uyumu, sakin günler için hmF2 yüksekliğine kadar %26.51 ve bozulmalı günler için %32.33 oranında IRI-Plas modelinin referans değerlerine göre daha iyi başarımlar sergilediği belirlenmiştir.

IONOLAB-Fusion ve IRI-Plas modeli tarafından hesaplanan TEİ haritaları, günün farklı saatlerinde iyonkürenin sakin ve bozulmalı günleri için GIM-TEİ ile karşılaştırılmıştır. IONOLAB-Fusion ve GIM-TEİ tarafından hesaplanan haritalar arasındaki RMS farkının sakin günler için 1.69 TECU ve bozulmalı günler için 1.80 TECU olduğu belirlenmiştir. Bu değerler IRI-Plas modeli kullanılarak hesaplanan haritalara göre sırasıyla %37.89 ve %31.58 oranında daha iyi başarımlar sergilediği belirlenmiştir.

Algoritma literatürde yer alan Küresel Başlık Harmonikleri (KBH), Haar Dalgacıkları, B-Spline fonksiyonları ve Slepian fonksiyonları yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen elektron yoğunluğu geriçatım sonuçları ile karşılaştırılmıştır. IONOLAB-Fusion diğer yöntemlere hmF2 yüksekliğine kadar, %23.25 ile %28.24 kadar daha iyi başarımlar sergilediği belirlenmiştir.

IONOLAB-Fusion'da kullanıcı, tomografi yapmak istediği saatler için önceki günlerden model matrisi oluşturmayı seçebilmektedir. Bu seçenek, sakin günler için benzer sonuçlar sağlamakta ve yakın-gerçek zamanlı veya gerçek zamanlı uygulamalarda güncellenmiş bir iyonküre elde etmek için kayan bir pencerede uygulanabilmektedir. Bununla birlikte, bir jeomanyetik fırtınanın etkileri son üç günün model matrisine dahil edilmemiş olabileceğinden, 90 gün gibi uzun süreli bir ön bilgi ile tüm olası bozulmaları içeren model matris kullanılarak yapılan yeniden yapılandırmalar, genel iyonosonda profilleri ile daha iyi bir uyum içindedir. IONOLAB-Fusion, hem gerçek hem de sanal artırılmış ışın yollarını kullanarak iyonküre elektron yoğunluğu geriçatması için son teknoloji ürünü kullanıcı dostu bir Bilgisayarlı İyonküre Tomografi (BİT) algoritmasıdır. Algoritma güncelleme, gerçek zamanlı inceleme ve kestirim uygulamalarında kolaylıkla ve çok yönlü olarak kullanılabilir. Algoritmanın sonuçlarının iyonosonda profilleri ve GIM-TEİ haritaları ile mükemmel bir uyum içinde olduğu gösterilmiştir. Algoritma aynı zamanda güvenilir ve gürbüzdür, bu özellikleri sayesinde herhangi bir bölge ve iyonküre durumu için uygulanabilmektedir.

IONOLAB-Fusion algoritması kullanılarak gelecekte yapılabilecek birçok çalışma bulunmaktadır. Arka plan iyonküre modellerinin modellemekte zorlandığı kutup ve ekvator bölge-

leri ile YKS alıcı istasyonlarının bulunmadığı çöl, okyanus ve yağmur ormanlarında elektron yoğunluğu yeniden yapılandırması gerçekleştirilebilir. Tüm bölgeler için geriçatım sonuçları model matrise girdi olarak verilerek iyonküreye ait güncellenmiş ön bilginin yeniden yapılandırma sonuçlarına etkisi incelenebilir. Tomografi sırasında taban vektörlere ait kestirilen katsayı değeri Kalman süzgeç yöntemleri kullanılarak zamanda takip edilebilir. AYY uyduları üzerindeki alıcıların alıcı yanlılık değeri kestirilerek IONOLAB-STEÇ ile ölçüm vektörü güncellenebilir.



KAYNAKLAR

- [1] Tascione, T.F., *Introduction to the Space Environment*, Krieger Publishing Company, **1988**.
- [2] Kelley, M., *The Earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics*, 96, Academic press, **2009**.
- [3] Davies, J.A., *Ionospheric Radio*, Peter Pregrinus, **1990**.
- [4] Hunsucker, R.D., *Radio Techniques For Probing The Terrestrial Ionosphere*, 22, Springer Science & Business Media, **2013**.
- [5] Bugoslavskaja, N., Bugoslavskaja, N.A., *Solar activity and the ionosphere: for radio communications specialists*, Pergamon Press, **1962**.
- [6] Budden, K.G., *The propagation of radio waves: the theory of radio waves of low power in the ionosphere and magnetosphere*, Cambridge University Press, **1988**.
- [7] Zolesi, B., Cander, L.R., *Ionospheric prediction and forecasting*, Springer, **2014**.
- [8] Limberger, Marco, *Ionosphere modeling from GPS radio occultations and complementary data based on B-splines*, Technische Universität München, **2015**.
- [9] Kursinski, E.R., Hajj, G.A., Bertiger, W.I., Leroy, S.S., Meehan, T.K., Romans, L.J., Schofield, J.T., McCleese, D.J., Melbourne, W.G., Thornton, C.L., diğerleri, Initial results of radio occultation observations of earth's atmosphere using the global positioning system, *Science*, 271, 5252, 1107–1110, **1996**.
- [10] Reigber, C., Champ mission status and perspectives, *Suppl. to EOS, Transactions, AGU*, 81, 48, F307, **2000**.
- [11] Beyerle, G., Schmidt, T., Michalak, G., Heise, S., Wickert, J., Reigber, C., Gps radio occultation with grace: Atmospheric profiling utilizing the zero difference technique, *Geophysical Research Letters*, 32, 13, **2005**.
- [12] Hajj, G.A., Lee, L.C., Pi, X., Romans, L.J., Schreiner, W.S., Straus, P.R., Wang, C., Cosmic gps ionospheric sensing and space weather, *Terrestrial atmospheric and oceanic sciences*, 11, 1, 235–272, **2000**.
- [13] Austen, J.R., Franke, S.J., Liu, C.H., Ionospheric imaging using computerized tomography, *Radio Science*, 23, 3, 299–307, **1988**.
- [14] Pryse, S.E., Kersley, L., A preliminary experimental test of ionospheric tomography, *Journal of atmospheric and terrestrial physics*, 54, 7-8, 1007–1012, **1992**.
- [15] Raymund, T.D., Austen, J.R., Franke, S.J., Liu, C.H., Klobuchar, J.A., Stalker, J., Application of computerized tomography to the investigation of ionospheric structures, *Radio Science*, 25, 5, 771–789, **1990**.
- [16] Jin, S., Li, D., 3-d ionospheric tomography from dense gnss observations based on an improved two-step iterative algorithm, *Advances in Space Research*, 62, 4, 809–820, **2018**.

- [17] Arikan, O., Arikan, F., Erol, C.B., Computerized ionospheric tomography with the iri model, *Advances in Space Research*, 39, 5, 859–866, **2007**.
- [18] Bust, G.S., Mitchell, C.N., History, current state, and future directions of ionospheric imaging, *Reviews of Geophysics*, 46, 1, **2008**.
- [19] Zhai, C., Lu, G., Yao, Y., Wang, W., Zhang, S., Liu, J., Peng, W., Kong, J., Chen, J., 3-d tomographic reconstruction of sed plume during 17 march 2013 storm, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125, 11, e2020JA028257, **2020**.
- [20] Hernández-Pajares, J.M., Sanz, J., Colombo, O.L., Application of ionospheric tomography to real-time gps carrier-phase ambiguities resolution, at scales of 400–1000 km and with high geomagnetic activity, *Geophysical Research Letters*, 27, 13, 2009–2012, **2000**.
- [21] Arikan, O., Arikan, F., Erol, C.B., 3-d computerized ionospheric tomography with random field priors,” in *Mathematical Methods in Engineering*, 325–334. Springer, **2007**.
- [22] Lu, W., Ma, G., Wan, Q., A review of voxel-based computerized ionospheric tomography with gnss ground receivers, *Remote Sensing*, 13, 17, 3432, **2021**.
- [23] Garcia, R., Crespon, F., Radio tomography of the ionosphere: Analysis of an underdetermined, ill-posed inverse problem, and regional application, *Radio Science*, 43, 02, 1–13, **2008**.
- [24] Hong, J. K., H., Yong, Chung, J.K., Ssessanga, N., Kwak, Y.S., diğerleri, Tomography reconstruction of ionospheric electron density with empirical orthonormal functions using korea gnss network, *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 34, 1, 7–17, **2017**.
- [25] Giday, N.M., Katamzi, Z.T., McKinnell, L.A., Ionospheric tomography over south africa: Comparison of midas and ionosondes measurements, *Advances in Space Research*, 57, 1, 245–256, **2016**.
- [26] Yao, Y., Chen, P., Zhang, S., Chen, J., A new ionospheric tomography model combining pixel-based and function-based models, *Advances in Space Research*, 52, 4, 614–621, **2013**.
- [27] Howe, B.M., Runciman, K., Secan, J.A., Tomography of the ionosphere: Four-dimensional simulations, *Radio Science*, 33, 1, 109–128, **1998**.
- [28] Mitchell, C.N., Spencer, P.S.J., A three-dimensional time-dependent algorithm for ionospheric imaging using gps, *Annals of Geophysics*, 46, 4, 687–696, **2003**.
- [29] Al-Franek, O.J.S., *Ionospheric imaging for Canadian polar regions*, University of Calgary, Department of Geomatics Engineering, **2013**.
- [30] Amerian, Y., Voosoghi, B., Ghaffari, A., Tomographic reconstruction of the ionospheric electron density in term of wavelets, *Journal of Aerospace Science and Technology*, 7, 1, 19–29, **2010**.

- [31] Zeilhofer, C., Schmidt, M., Bilitza, D., Shum, C.K., Regional 4-d modeling of the ionospheric electron density from satellite data and iri, *Advances in space research*, 43, 11, 1669–1675, **2009**.
- [32] Farzaneh, S., Forootan, E., Reconstructing regional ionospheric electron density: a combined spherical slepian function and empirical orthogonal function approach, *Surveys in geophysics*, 39, 289–309, **2018**.
- [33] Tuna, H., Arikan, O., Arikan, F., Regional model-based computerized ionospheric tomography using gps measurements: Ionolab-cit, *Radio Science*, 50, 10, 1062–1075, **2015**.
- [34] Tuna, H., Arikan, O., Arikan, F., Model based computerized ionospheric tomography in space and time, *Advances in Space Research*, 61, 8, 2057–2073, **2018**.
- [35] Yildiz, S. K., Investigation of the planar midlatitude ionospheric trend under different levels of solar activity, *Advances in Space Research*, 71, 5, 2252–2268, **2023**.
- [36] Brunton, S.L., Kutz, J.N., *Data-driven science and engineering: Machine learning, dynamical systems, and control*, Cambridge University Press, **2022**.
- [37] Erturk, O., Arikan, O., Arikan, F., Tomographic reconstruction of the ionospheric electron density as a function of space and time, *Advances in Space Research*, 43, 11, 1702–1710, **2009**.
- [38] Turel, N., Arikan, F., Probability density function estimation for characterizing hourly variability of ionospheric total electron content, *Radio Science*, 45, 6, **2010**.
- [39] Koroglu, O., Arikan, F., Türel, N., Aysezen, M. Ş, Lenk, Müh O., Aktuğ, . B., Estimation of probability density function for TUSAGA TEC, in *2010 IEEE 18th Signal Processing and Communications Applications Conference*. IEEE, 860–862, **2010**.
- [40] Arikan, F., Erol, C. B., Arikan, O., Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 108, A12, **2003**.
- [41] Arikan, F., Erol, C.B., Arikan, O., Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 108, A12, **2003**.
- [42] Arikan, F., Erol, C.B., Arikan, O., Regularized estimation of vertical total electron content from GPS data for a desired time period, *Radio Science*, 39, 6, **2004**.
- [43] Nayir, H., *Yer Küresel Konumlama Sistemi Kullanılarak Toplam Elektron İçeriği Kestirimi*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, **2007**.
- [44] Nayir, H., Arikan, F., Arikan, O., Erol, C.B., Total electron content estimation with Reg-Est, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 112, A11, **2007**.
- [45] Arikan, F., Erol, C.B., Statistical characterization of time variability in midlatitude single-tone hf channel response, *Radio Science*, 33, 5, 1429–1443, **1998**.

- [46] Sezen, U., Arikan, F., Arikan, O., Ugurlu, O., Sadeghimorad, A., Online, automatic, near-real time estimation of GPS-TEC: IONOLAB-TEC, *Space Weather*, 11, 5, 297–305, **2013**.
- [47] Crustal Dynamics Data Information System, CDDIS IONEX, <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex>, Erisim tarihi: 24 Temmuz 2014.
- [48] Arikan, F., Nayir, H., Sezen, U., Arikan, O., Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC, *Radio Science*, 43, 4, **2008**.
- [49] Gok, G., *Novel Signal Processing Techniques for Remote Sensing Applications*, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Bilkent Üniversitesi (Turkey), **2021**.
- [50] Gok, G., Alp, Y.K., Arikan, O., Arikan, F., A method for automatic scaling of ionograms and electron density reconstruction, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1–11, **2021**.
- [51] Bilitza, D., International reference ionosphere 2000, *Radio Science*, 36, 2, 261–275, **2001**.
- [52] Bilitza, D., McKinnell, L., Reinisch, B., Fuller-Rowell, T., The international reference ionosphere today and in the future, *Journal of Geodesy*, 85, 12, 909–920, **2011**.
- [53] Arikan, F., Sezen, U., Gulyaeva, T.L., Comparison of iri-2016 f2 layer model parameters with ionosonde measurements, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124, 10, 8092–8109, **2019**.
- [54] Gulyaeva, T.L., 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*, 47, 6, 913–920, **2011**.
- [55] Gulyaeva, T.L., Empirical model of ionospheric storm effects on the f2 layer peak height associated with changes of peak electron density, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 117, A2, **2012**.
- [56] Gulyaeva, T.L., Arikan, F., Stanislawski, I., Inter-hemispheric imaging of the ionosphere with the upgraded iri-plas model during the space weather storms, *Earth, planets and space*, 63, 929–939, **2011**.
- [57] Gulyaeva, T., Arikan, F., Bilitza, D., Mitigation of challenge of recalibration of sunspot numbers using proxies of solar activity for the ionospheric models, in *VarSITI-Variability of the Sun and Its Terrestrial Impact*, 122–122, **2017**.
- [58] Gulyaeva, T.L., Arikan, F., Sezen, U., diğerleri, Tec proxy index of solar activity for the international reference ionosphere and its extension to plasmasphere iri-plas model, *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (IJSEAS)*, 3, **2017**.
- [59] Sezen, U., Gulyaeva, T.L., Arikan, F., Performance of solar proxy options of iri-plas model for equinox seasons, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123, 2, 1441–1456, **2018**.

- [60] Gulyaeva, T.L., Arikan, F., Sezen, U., Poustovalova, L.V., Eight proxy indices of solar activity for the international reference ionosphere and plasmasphere model, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 172, 122–128, **2018**.
- [61] Erdem, E., Arikan, F., Ionolab-ray: A wave propagation algorithm for anisotropic and inhomogeneous ionosphere, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 25, 3, 1712–1723, **2017**.
- [62] Erdem, E., Arikan, F., diğerleri, Communication parameters derived from ionolab-ray algorithm, *42nd COSPAR Scientific Assembly*, 42, C0–2, **2018**.
- [63] Erdem, E., Arikan, F., Deviren, M.N., Cor, I., A model based ray tracing algorithm for anisotropic and inhomogeneous ionosphere with gim-tec assimilation, in *2015 7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*. IEEE, 477–481, **2015**.
- [64] Erdem, E., *İyonkürede Elektromanyetik Dalga Yayılım Modeli ve Benzetimi*, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, **2017**.
- [65] Cilibas, O., Sezen, U., Arikan, F., Gulyaeva, T., Iri-plas optimization based ionospheric tomography, in *Proceedings of the 16th International Conference on Information Fusion*. IEEE, 1645–1649, **2013**.
- [66] Arikan, F., Sezen, U., Gulyaeva, T.L., Cilibas, O., Online, automatic, ionospheric maps: Iri-plas-map, *Advances in Space Research*, 55, 8, 2106–2113, **2015**.
- [67] Gordiyenko, G.I., Maltseva, O.A., Arikan, F., Yakovets, A.F., 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*, 64, 10, 2046–2063, **2019**.
- [68] Sezen, U., Gulyaeva, T.L., Arikan, F., Online computation of international reference ionosphere extended to plasmasphere (iri-plas) model for space weather, *Geodesy and geodynamics*, 9, 5, 347–357, **2018**.
- [69] Bilitza, D., Iri the international standard for the ionosphere, *Advances in radio science*, 16, 1–11, **2018**.
- [70] Kunitsyn, V.E., Tereshchenko, E.D., *Ionospheric tomography*, Springer Science, **2003**.
- [71] Bro, R., Smilde, A.K., Principal component analysis, *Analytical methods*, 6, 9, 2812–2831, **2014**.
- [72] Schmidt, M., Wavelet modelling in support of iri, *Advances in Space Research*, 39, 5, 932–940, **2007**.
- [73] Schmidt, M., Bilitza, D., Shum, C.K., Zeilhofer, C., Regional 4-d modeling of the ionospheric electron density, *Advances in Space Research*, 42, 4, 782–790, **2008**.
- [74] Yenen, S.D., Arikan, F., Ionolab-fusion: Fusion of radio occultation into computerized ionospheric tomography, *Atmosphere*, 15, 6, 675, **2024**.
- [75] Feltens, J., The international gps service (igs) ionosphere working group, *Advances in Space Research*, 31, 3, 635–644, **2003**.

- [76] Sayin, I., Arikan, F., Arikan, O., Regional TEC mapping with random field priors and kriging, *Radio Science*, 43, 5, **2008**.
- [77] Sayin, I., *Kriging ve Rassal Alan Öncülü ile Toplam Elektron İçeriği Haritalaması*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, **2008**.
- [78] Sayin, I., Arikan, F., Arikan, O., Regional TEC mapping with random field priors and kriging, *Radio Science*, 43, 5, **2008**.
- [79] Alken, P., Thebault, E., Beggan, C.D., Amit, H., Aubert, J., Baerenzung, J., Bondar, T.N., Brown, W.J., Califf, S., Chambodut, A., diğerleri, International geomagnetic reference field: the thirteenth generation, *Earth, Planets and Space*, 73, 1–25, **2021**.
- [80] Stanislawska, I., Juchnikowski, G., Cander, L. R., Ciruolo, L., Bradley, P.A., Zbyszynski, Z., Swiatek, A., The kriging method of TEC instantaneous mapping, *Advances in Space Research*, 29, 6, 945–948, **2002**.
- [81] Deviren, M.N., Arikan, F., IONOLAB-MAP: An automatic spatial interpolation algorithm for total electron content, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 26, 4, 1933–1945, **2018**.
- [82] Koroglu, O., *Orta Enlem İyonküresi için Rassal Alan Modeli Geliştirilmesi*, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, **2021**.
- [83] Tuna, H., Arikan, O., Arikan, F., Gulyaeva, T.L., Sezen, U., Online user-friendly slant total electron content computation from iri-plas: Iri-plas-stec, *Space weather*, 12, 1, 64–75, **2014**.
- [84] Arikan, F., Shukurov, S., Tuna, H., Arikan, O., Gulyaeva, T.L., Performance of GPS slant total electron content and IRI-Plas-STEAC for days with ionospheric disturbance, *Geodesy and Geodynamics*, 7, 1, 1–10, **2016**.
- [85] Yenen, S.D., Arikan, F., Gulyaeva, T., Comparison of iri-plas stec and ionolab-stec over a midlatitude gps network, in *2019 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*. IEEE, 649–653, **2019**.
- [86] Schaer, S., *Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System*, 59, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidg. Technische Hochschule, **1999**.
- [87] Hunsucker, R.D., *Radio techniques for probing the terrestrial ionosphere*, 22, Springer Science & Business Media, **2013**.
- [88] Bilitza, D., Altadill, D., Truhlik, V., Shubin, V., Galkin, I., Reinisch, B., Huang, X., International reference ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions, *Space weather*, 15, 2, 418–429, **2017**.
- [89] Ardic, F., *Tekil Değer Ayırışımı ile 2-B Toplam Elektron İçeriği Yeniden Yapılandırması*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, **2017**.
- [90] Lei, J., Syndergaard, S., Burns, A.G., Solomon, S.C., diğerleri, Comparison of cosmic ionospheric measurements with ground-based observations and model predictions: Preliminary results, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 112, A7, **2007**.

- [91] Sayin, I., Arikan, F., Akdogan, K., Optimum temporal update periods for regional ionosphere monitoring, *Radio Science*, 45, 1–9, **2010**.
- [92] Yenen, S.D., *YKS Ağı Tabanlı Toplam Elektron İçeriği ve Alıcı Yanlılığı Kestirimi*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, **2017**.
- [93] Koroglu, O., *TUSAGA VE TUSAGA-Aktif Verileri ile Toplam Elektron İçeriğinin İstatistiksel Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, **2012**.
- [94] Arikan, F. and Koroglu O., Yenen, S.D., Wide sense stationarity period of slant and vertical total electron content in determination of temporal correlation of midlatitude ionosphere, *42nd COSPAR Scientific Assembly*, 42, C1–4, **2018**.
- [95] Gulyaeva, T.L., Stanislawska, I., Derivation of a planetary ionospheric storm index, in *Annales Geophysicae*. Copernicus Publications Göttingen, Germany, 26, 2645–2648, **2008**.
- [96] Gulyaeva, T.L., Arikan, F., Hernandez-Pajares, M., Stanislawska, I., Gim-tec adaptive ionospheric weather assessment and forecast system, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 102, 329–340, **2013**.
- [97] Yenen, S.D., Gulyaeva, T.L., Arikan, F., Arikan, O., Association of ionospheric storms and substorms of global electron content with proxy ae index, *Advances in Space Research*, 56, 7, 1343–1353, **2015**.
- [98] Nielsen, F., Nock, R., Sided and symmetrized bregman centroids, *IEEE transactions on Information Theory*, 55, 6, 2882–2904, **2009**.
- [99] Hofmann Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E., *GNSS-global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*, Springer Science, **2007**.

EK-A. YERKÜRESEL KONUMLAMA SİSTEMİ (YKS) ALICI İSTASYON KOORDİNATLARI

Bu çalışmada kullanılan YKS alıcı istasyonlarının koordinatları sırasıyla Çizelge EK-A.1, Çizelge EK-A.2 ve Çizelge EK-A.3’de gösterilmiştir. YKS alıcı istasyon koordinatları ise EUREF Sabit GPS Ağı (<https://www.epncb.oma.be>) kullanılarak elde edilmiştir.

Çizelge EK-A.1: EUREF Sabit YKS Ağı’ndan seçilen YKS Alıcı İstasyon 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

Çizelge EK-A.2: EUREF Sabit YKS Ağı'ndan seçilen YKS Alıcı İstasyon Koordinatları (Devam).

İstasyon	Adı	Ülke	Coğrafi Koordinatlar		Jeomanyetik koordinatlar	
			Enlem (°K)	Boylam (°D)	Enlem (°K)	Boylam (°D)
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
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

Çizelge EK-A.3: EUREF Sabit YKS Ağı'ndan seçilen YKS Alıcı İstasyon Koordinatları (Devam).

İstasyon	Adı	Ülke	Coğrafi Koordinatlar		Jeomanyetik koordinatlar	
			Enlem (°K)	Boylam (°D)	Enlem (°K)	Boylam (°D)
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
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
wsrt	Westerbork	Hollanda	52.91	6.60	53.48	92.14
wtzr	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

EK-B. KAYNAK VE ALICI ÇİFTLERİ

Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS) alıcı istasyonları ve YYS uyduları arasındaki ışın sayısı tarih ve saate göre EK-B.1’de verilmiştir.

Çizelge EK-B.1: YYS alıcı istasyonları ile YYS uyduları arasındaki zamana bağlı ışın sayısı.

Tarih	Saat				
	03:00 GS	08:00 GS	12:00 GS	18:00 GS	23:00 GS
6 April 2011	282	311	247	234	220
17 April 2011	287	271	211	227	230
24 April 2012	118	200	163	193	221
4 April 2013	242	214	260	163	237
25 April 2013	273	235	313	147	275
8 April 2015	366	260	172	162	230

YKS uyduları ve AYY uyduları üzerinde bulunan alıcılar arasındaki ışın sayısı tarih ve saate göre EK-B.2’de verilmiştir.

Çizelge EK-B.2: YYS alıcı istasyonları ile AYY uyduları üzerinde bulunan alıcılar arasındaki zamana bağlı ışın sayısı.

Tarih	Saat				
	03:00 GS	08:00 GS	12:00 GS	18:00 GS	23:00 GS
6 April 2011	-	-	-	4	-
17 April 2011	10	42	-	-	42
24 April 2012	-	-	-	-	-
4 April 2013	96	-	-	11	-
25 April 2013	-	-	-	-	-
8 April 2015	10	5	41	76	-

EK-C. IONOLAB-FUSION KULLANIM KILAVUZU

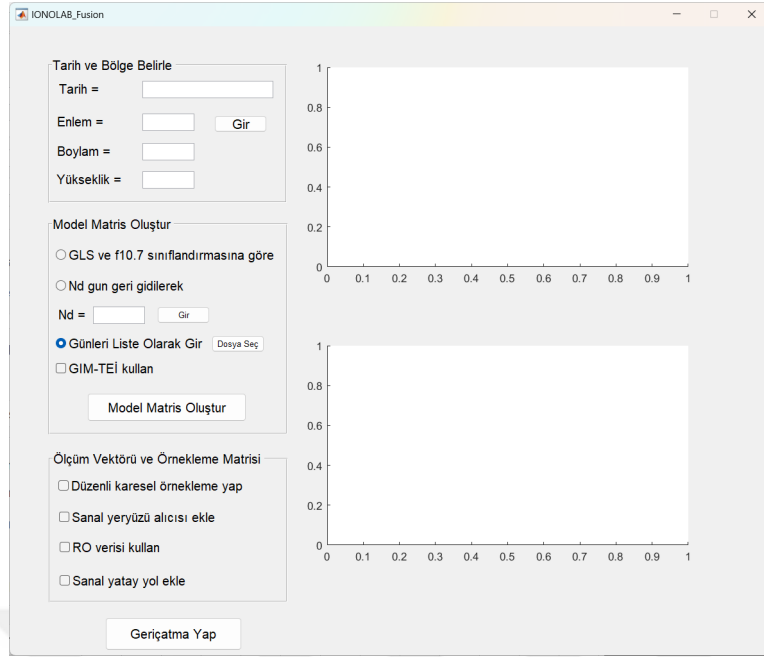
Bu tez kapsamında geliştirilen Bilgisayarlı İyonküre Tomografisi (BİT) algoritması MATLAB ortamında kodlanmıştır. IONOLAB-Fusion akademik araştırma amacı doğrultusunda geliştirilmiş olup gelecek çalışmalarda yazılım aracı olacak şekilde düzenlenmeye uygundur.

IONOLAB-Fusion algoritması modüler yapıya sahiptir. Model matris oluşturma, ölçüm vektörü ve örnekleme matrisi oluşturulması ile Tekil Değer Ayrışımı (TDA) tabanlı geriçatma algoritmasının uygulanması farklı modüller aracılığı ile gerçekleştirilmektedir. Böylece ihtiyaç halinde algoritma bütününe müdahale edilmeden, modüller üzerinden yenilenebilmekte ve iyileştirilebilmektedir.

IONOLAB-Fusion algoritmasında işlem yükünü arttıran model matris oluşturulurken N_d gün için iyonküre parametrelerinin hesaplanmasından kaynaklanmaktadır. Model matris oluşturulurken geçen süre ve işlem yükü bölge sınırlarına ve çözünürlük değerlerine bağlıdır. Bu nedenle model matrisler seçilen tarih, saat ve N_d değerleri için ayrı bir modülde oluşturularak kaydedilmektedir. Oluşturulan model matrisler yeni günlerin eklenmesine elverişli haldedir.

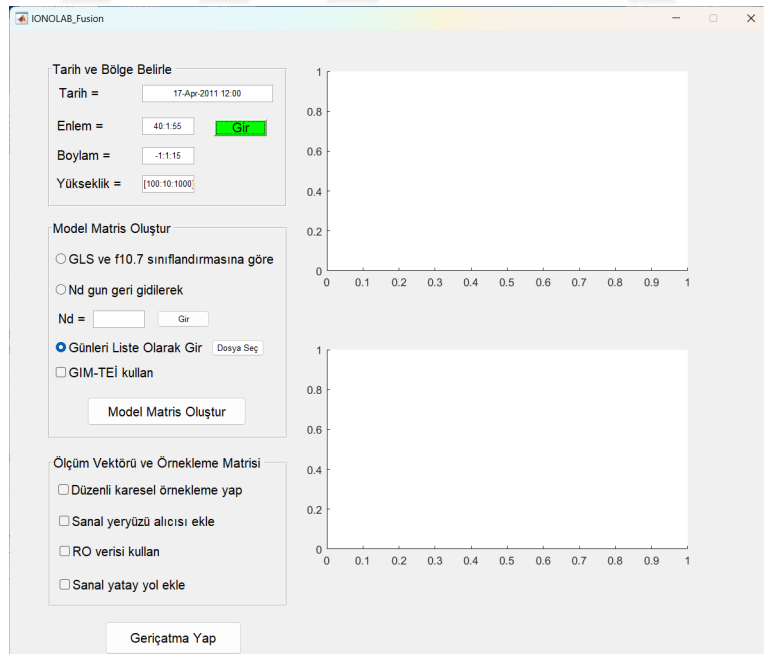
Intel(R) Core(TM) i5-10210U CPU @1.60 GHz, 8 GB bellek özelliklerinde bir bilgisayar kullanılarak 25 enlem, 36 boylam ve 62 yükseklik adımından oluşan 3-B küresel hücre yapısı ile verilen tarih ve saate karşılık $N_d = 1$ için yaklaşık 1 dakika sürmektedir.

IONOLAB-Fusion algoritması için Şekil EK-C.1'de gösterimi verilen kullanıcı arayüzü geliştirilmiştir.



Şekil EK-C.1: IONOLAB-Fusion kullanıcı arayüzü gösterimi.

Kullanıcı arayüzü üç ana bölümden oluşmaktadır. Tomografinin yapılacağı tarih ve saat ile bölge sınırları örnek olarak Şekil EK-C.2’de Çizelge EK-C.1’de verilen format ile girilmektedir.



Şekil EK-C.2: Tarih girişi.

Çizelge EK-C.1: Parametreler ve Açıklamaları

Parametre Adı	Açıklama	Birim	Format	Örnek
Tarih	Tarih veya çoklu koşumlar için tarih dizisi	char	Tarih formatı: GG-AAA-YYYY SS:DD { 'tarih1', 'tarih2', ..., 'tarihn' }	{ '25-Mar-2011 12:00', '01-Jan-2012 03:00' }
Enlem	Enlem dizisi Kullanıcının yerküre üzerinde belirleyeceği ilgilenilen bölgenin enlem sınırlarını ve çözünürlüğünü tanımlar.	°	[-90, 90] aralığında reel sayı değerleri alabilir. 0: ekvator, 90: kuzey kutbu -90: güney kutbu [başlangıç:çözünürlük:bitiş] veya eşit adım artışı olmak zorunda olmayan bir dizi Enlem dizisi değerleri küçükten büyüğe sıralı olmalıdır.	[35:3:50] veya [35, 38, 41, 44, 47, 50] Eğer artış 1 ise [35:45] olarak girilebilir.
Boylam	Boylam dizisi Kullanıcının dünya üzerinde tanımlayacağı ilgi alanı bölgenin boylam sınırlarını ve bu sınırların arasının nasıl bölüneceğini (çözünürlüğünü) tanımlar.	°	[0, 360] aralığında reel sayı değerleri alabilir. 0: Greenwich, doğuya doğru artan [başlangıç:çözünürlük:bitiş] veya eşit adım artışı olmak zorunda olmayan bir vektör Boylam dizisi değerleri küçükten büyüğe sıralı olmalıdır.	[25:5:45] veya [25, 30, 35, 40, 45] Eğer artış 1 ise [25:1:45] olarak girilebilir.
Yükseklik	Yükseklik dizisi Kullanıcının tanımlayacağı ilgi alanı bölgenin yükseklik sınırlarını ve bu sınırların arasının nasıl bölüneceğini (çözünürlüğünü) tanımlar.	km	[80, 20200] aralığında reel sayı değerler alabilir. [başlangıç:çözünürlük:bitiş] veya eşit adım artışı olmak zorunda olmayan bir vektör Yükseklik dizisi değerleri küçükten büyüğe sıralı olmalıdır.	[80:10:1000] veya [80:10:700 800:100:1300 1800:500:2800]

Model matris oluşturulurken kullanılacak günler için seçim yapılmalıdır.

Tarih ve Bölge Belirle

Tarih = 17-Apr-2011 12:00

Enlem = 40.155

Boylam = -1.115

Yükseklik = 100 10 1000

Model Matris Oluştur

☐ GLS ve f10.7 sınıflandırmasına göre

☒ Nd gün geri gidilerek

Nd = 7

☐ Günleri Liste Olarak Gir

☒ GIM-TEI kullan

Ölçüm Vektörü ve Örnekleme Matrisi

☒ Düzenli karesel örnekleme yap

☒ Sanal yeryüzü alıcısı ekle

☐ RO verisi kullan

☐ Sanal yatay yol ekle

Şekil EK-C.3: Model matris oluşturulurken kullanılacak günlerin belirtilmesi.

Güneş aktivitesine göre veya N_d gün geriye gidilerek model matris oluşturulacaksa kullanılacak gün sayısı belirtilmelidir. N_d değeri en az 1 olarak girilmelidir. GIM-TEI haritası arka plan iyonküre modeline girdi olarak verilecek ise bu seçim arayüz üzerinden belirtilmelidir. Model matris oluşturulurken girilecek günler liste olarak da beslenebilmektedir. Liste yapısı Şekil EK-C.4’de verildiği formatta olmalıdır.

17-Apr-2011 12:00

16-Apr-2011 12:00

15-Apr-2011 12:00

14-Apr-2011 12:00

13-Apr-2011 12:00

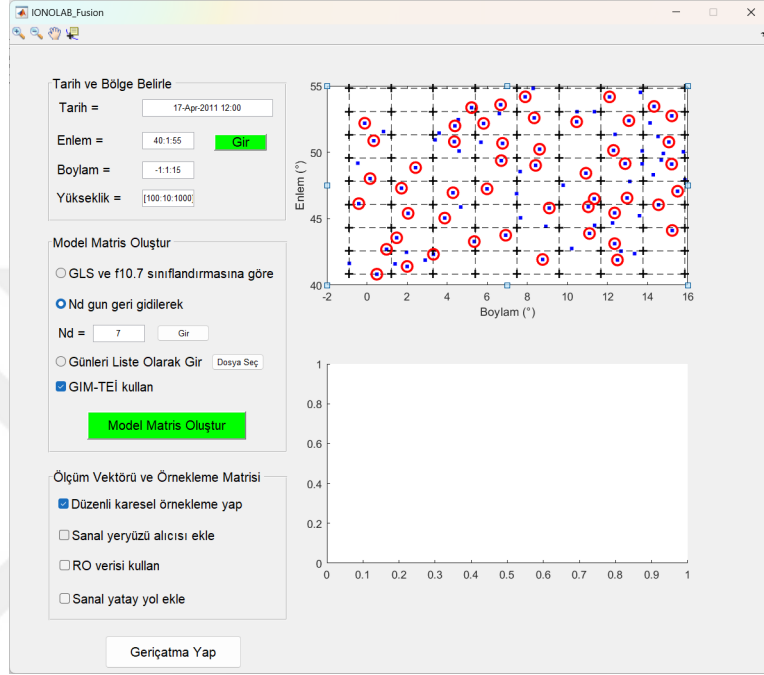
12-Apr-2011 12:00

11-Apr-2011 12:00

Şekil EK-C.4: Tarihler için liste girişi.

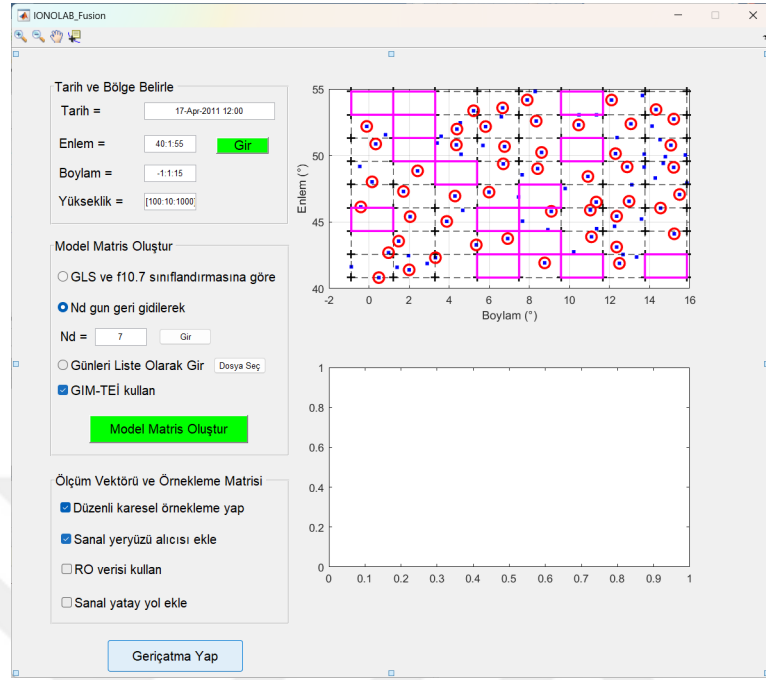
Model matris oluşturulduktan sonra kodun çalıştığı dizine *Gmatrix_Tarih_Saat.mat* olarak kaydedilmektedir. Örneğin 17 Nisan 2011 saat 12:00 GS için *Gmatrix_17Apr2011_12_00.mat*

Örnekleme matrisi ve ölçüm vektörü oluşturulurken kullanılacak alıcıların belirlenmesi için arayüz üzerinden seçim yapılmalıdır. Düzenli karesel örnekleme yapılması seçildiyse örnekleme sonrası istasyonların grafiği arayüz üzerinde verilmektedir.



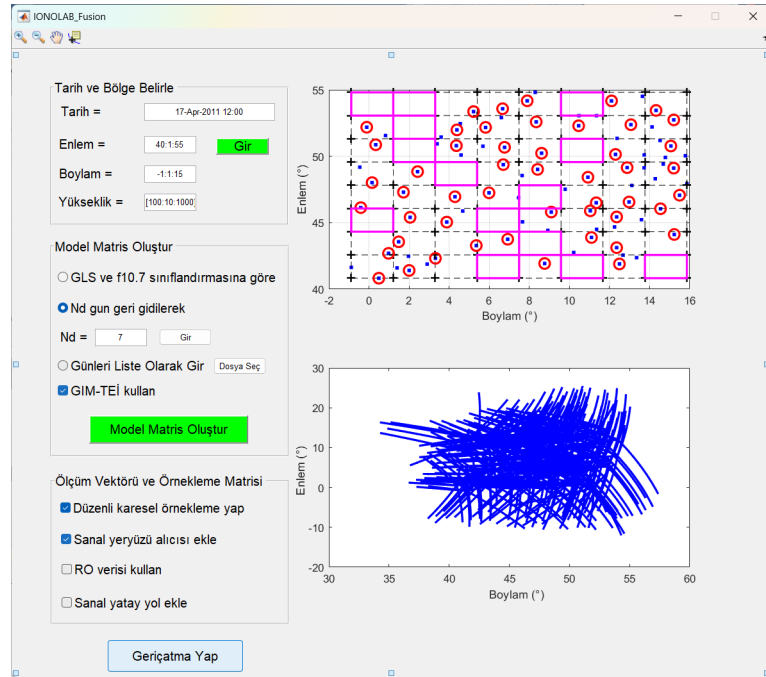
Şekil EK-C.5: Düzenli karesel örnekleme gösterimi.

Sanal yeryüzü alıcısı eklenmesi tercih edilirse istasyon bulunmayan ızgaralar tespit edilerek ızgara merkezine sanal yeryüzü alıcısı eklenmektedir.

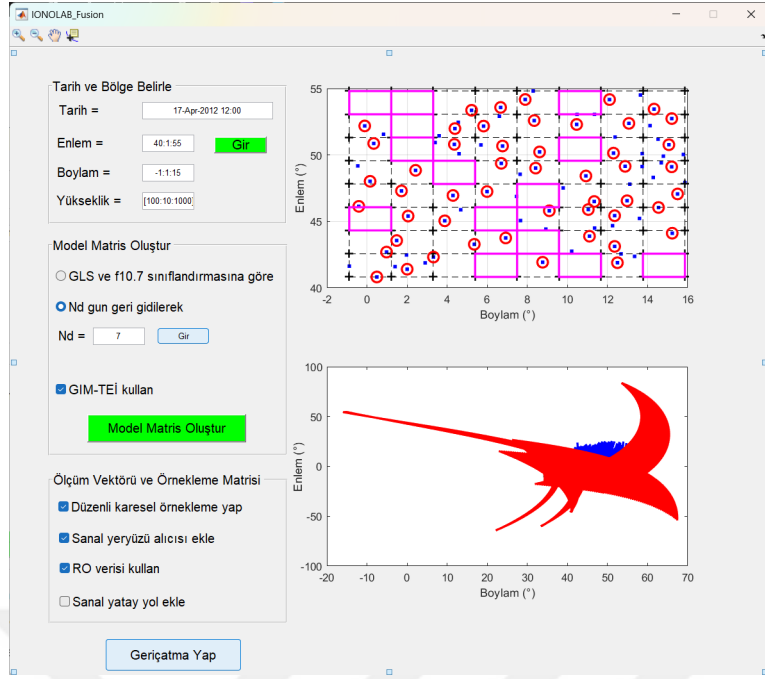


Şekil EK-C.6: Sanal yeryüzü alıcısı ekleme.

YKS uydu ve yeryüzü alıcıları arasındaki ışınların izdüşümleri çizdirilebilmektedir.



Şekil EK-C.7: YKS uydu ve yeryüzü alıcıları arasındaki ışınların izdüşümleri.



Şekil EK-C.8: RO veri ekleme.

AYY uyduları üzerindeki alıcılara ait verilerin kullanılması tercih edilirse bu seçim arayüz üzerinden de belirtilmelidir.

Sanal yatay yolların kullanılması isteniyorsa bu seçim arayüz üzerinden belirtilmelidir. Gerçekleştirme Yap butonuna basılarak yapılan seçimler için gerçekleştirme algoritması çalıştırılmaktadır. Algoritmanın çıktıları Çizelge EK-C.2’de verilmiştir.

Çizelge EK-C.2: Çıktı Açıklamaları

Parametre Adı	Açıklama	Birim
p_LLA	Dalganın, içinden yol aldığı hücrelerin sınır yüzeyleri ile kesiştiği noktalar. LLA (latitude, longitude and altitude) koordinat sisteminde	Enlem: derece Boylam: derece Yükseklik: metre
p_ECEF	Dalganın, içinden yol aldığı hücrelerin sınır yüzeyleri ile kesiştiği noktalar. ECEF (Earth Centered Earth Fixed) koordinat sisteminde	3 eksen de metre
p_ENU	Dalganın, içinden yol aldığı hücrelerin sınır yüzeyleri ile kesiştiği noktalar. ENU (East North Up – Doğu Kuzey Yukarı) koordinat sisteminde	3 eksen de metre
n_full	Dalganın içinden yol aldığı her bir hücrenin kırılma indisi	
stec_np	YKS uydu ve alıcılar arasındaki ETEİ değerleri (ölçüm vektörü)	TECU
NE_nl	Küresel hücreler içerisindeki elektron yoğunluğu geriçatım sonuçları.	el/m ³
Amatrix_np_nl	YKS uydu ve alıcı çiftleri arasındaki ışınların her bir hücrede kat ettikleri mesafe değeri (Örnekleme matrisi)	m