

# **İYONKÜREDE ELEKTROMANYETİK DALGA YAYILIM MODELİ VE BENZETİMİ**

## **ELECTROMAGNETIC WAVE PROPAGATION MODEL AND SIMULATION IN IONOSPHERE**

**ESRA ERDEM**

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

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

2017

**Esra ERDEM**'in hazırladığı "**İyonkürede Elektromanyetik Dalga Yayılım Modeli ve Benzetimi**" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ayhan Altıntaş

Başkan



Prof. Dr. Feza Arıkan

Danışman




Prof. Dr. Gülbin Dural Ünver

Üye



Doç. Dr. Cenk Toker

Üye



Doç. Dr. Özlem Özgün

Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **DOKTORA TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**

(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etseniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

- Tezimin/Raporumun ..... tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

- Tezimin/Raporumun ..... tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**

- Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**

21 / 02 / 2017



(imza)

Esra ERDEM

Bu tez kapsamındaki alışmalar Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından ortak TUBİTAK 112E568 ve RFBR 13-02-91370-CT projesi ve ortak TUBİTAK 114E092 ve AS CR 14/001 projesi ile desteklenmiştir.

## ETİK

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

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

beyan ederim.

21/02/2017

Esra ERDEM

## ÖZET

# İYONKÜREDE ELEKTROMANYETİK DALGA YAYILIM MODELİ VE BENZETİMİ

**ESRA ERDEM**

**Doktora, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü**

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

**Ocak 2017, 144 sayfa**

Kısa Dalga (KD) bandında (3 - 30 MHz) elektromanyetik dalga yayılımı uzak mesafe haberleşme için büyük önem taşımaktadır. KD bandında dalganın yayılım ortamı, atmosferin iyonküre katmanıdır. İyonküre, iyonlaşan gazlardan oluşan, zamana göre değişim gösteren, düzgün dağılmayan ve yön bağımlı bir ortamdır. İyonküre ortamına elektromanyetik dalga yayılımı çözümlerinin yapılması zorlu bir problemdir.

Dalga denkleminin düzgün dağılmayan ve yön bağımlı bir ortamda çözülmesi için hali hazırda uygulanan çeşitli analitik ve nümerik yöntemler yetersiz kalmaktadır. Bu yöntemler ancak iyonkürenin fiziksel özelliklerinin büyük ölçüde ihmal edilmesi ve dalga denkleminde çeşitli yaklaşımların yapılması ile uygulanabilmektedir. İşlem yükü ve çözüm süresi fazla olan bu yöntemler ile elde edilen çözümler, uygulanan yaklaşımlar nedeniyle iyonkürenin fiziksel yapısını yansıtmayan çıktılar vermektedir. Bazı durumlarda dalga yayılımı hesaplama iyonkürenin zamana göre değişim hızından daha yavaş olmakta ve elde edilen çözüm geçerliliğini yitirmektedir.

Uzak mesafe iletişim teknolojisinin başarımı iyonküre ve iyonkürede dalga yayılımı modellerinin gerçeğe yakın olması ile artmaktadır. Bu nedenle yeni bir yaklaşımla iyonkürede elektromanyetik dalga yayılımının modellenmesi ve iyonkü-

renin yapısının bu modele dahil edilmesi ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.

Bu doktora tezi çalışmasında KD bandı için yeni ve özgün bir dalga yayılım modeli geliştirilmiştir. Bu model, dalganın ışın izleme ile gösterimi ve iyonkürenin 3 Boyutlu (3B) küresel hücre modeli bileşenlerinden oluşmaktadır. Işın izleme, bir geometrik optik yaklaşımı olarak uygulanmaktadır. Geliştirilen dalga yayılım modelinde ışın izleme yöntemlerinden Snell yasası uygulanmaktadır. Snell yasası ile ışın izlemede önemli bir parametre olan kırılma indisinin hesaplanmasında, Appleton-Hartree eşitliği kullanılmaktadır. Appleton-Hartree eşitliği iyonkürenin fiziksel parametrelerini içermekte olup, geliştirilen modelde tüm parametreleri ile hesaba dahil edilmektedir.

İyonkürenin yön bağımlı olmasının bir sonucu olarak kaynaktan yayınlanan dalga iyonküreye girdiğinde sıradan ve sıradışı dalga olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bu tez kapsamında geliştirilen modelde sıradan ve sıradışı dalga için ayrı ayrı, 3B küresel hücre modeli üzerinden ışın izleme uygulanmaktadır. 3B küresel hücre modeli iyonkürenin düzgün dağılmayan yapısını yansıtmaktadır. Her bir hücreye karşılık gelen iyonküre parametreleri zamana bağımlı olarak hesaplandığından, iyonkürenin zamana göre değişimi de model tarafından karşılanmaktadır.

İyonküre parametreleri IRI-Plas yazılım aracı ile hesaplanmaktadır. IRI-Plas, iyonkürenin ölçülebilen bazı parametrelerinin verilerini girdi olarak alarak mevcut iyonküreyi daha gerçekçi benzetebilmektedir. Bu tez kapsamında geliştirilen modelde IRI-Plas yazılımının bu özelliğinden yararlanılmakta ve verilen zamana karşılık Toplam Elektron İçeriği (TEİ) verileri otomatik olarak sağlanarak IRI-Plas yazılımına beslenebilmektedir.

Geliştirilen iyonkürede dalga yayılım modelinin mühendislik uygulamasını yapmak üzere IONOLAB-RAY algoritması tasarlanmıştır. IONOLAB-RAY ön işlem ve ana işlem olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır. Kullanıcı tarafından tanımlanan ilgi alanı bölge ve zamanlar için koşum süresi görece olarak uzun süren hesaplamalar ön işlem aşamasında yapılarak kaydedilmektedir. Ana işlem

aşamasında ise oluşturulan ilgi alanı bölge ve zamanlar için istenilen senaryolar koşturulabilmektedir. Dalga yayılımının modellenmesi için ihtiyaç duyulan tüm parametreler IONOLAB-RAY modülleri tarafından otomatik olarak hesaplanmaktadır. Girdi parametrelerinin çoklu değerlerine karşılık tüm senaryo kombinasyonları tek komutla koşturulabilmektedir. Elde edilen çıktıların formatları mühendislik çalışmalarına ve analizlerine uygundur.

IONOLAB-RAY algoritması modülleri ile dalganın ilerleme yolunun yanı sıra dalganın zayıflaması, zaman gecikmesi, faz hızı, grup hızı ve Faraday dönmesi parametrelerini hesaplayabilmektedir. Bu parametreler aynı zamanda uzak mesafe haberleşmede kullanılan kanal modellerine girdi sağlayabilmektedir.

IRI-Plas yazılımına istatistiksel modele dayalı veri beslemesi yapılabilmektedir. Böylece dalganın izlediği yolun, yeryüzüne ulaştığı konumların ve dalga parametrelerinin istatistiksel dağılımlarının incelenmesine imkan sağlanmaktadır.

Bu tez kapsamında geliştirilen IONOLAB-RAY algoritması ile dünyanın farklı konumları için mevsim ve günün saatindeki değişimlere göre dalganın yayılım yolları incelenmiştir. Dalganın kaynaktan yayınlanmasını tanımlayan girdi parametrelerinin değişimine karşılık elde çıktılar değerlendirilmiştir. İyonküre modelini veri ile beslemenin etkileri gözlenmiştir.

IONOLAB-RAY algoritması literatürde bulunan benzer amaçlarla geliştirildiği bilinen çalışmalar ile karşılaştırılmış, kullanılan modellerden kaynaklı farklılıklar göz önünde bulundurularak çıktıların uyumlu olduğu değerlendirilmiştir. IONOLAB-RAY algoritması ile iyonogram türetilmiş ve ölçüm çıktısı olan iyonogram ile karşılaştırılmıştır. Böylece IONOLAB-RAY literatürde bulunan benzer amaçlı yazılımlar ve iyonogram ölçümleri üzerinden geçerlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kısa Dalga Bandı, Dalga Yayılımı, İyonküre, Işın İzleme, Toplam Elektron İçeriği.



## **ABSTRACT**

# **ELECTROMAGNETIC WAVE PROPAGATION MODEL AND SIMULATION IN IONOSPHERE**

**ESRA ERDEM**

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

**Supervisor: Prof. Dr. Feza Arıkan**

**January 2017, 141 pages**

High frequency (HF) electromagnetic wave propagation is important for long distance communication. In HF, the medium for wave propagation is the ionosphere layer of the atmosphere. Ionosphere, which is composed of ionized gases, is a time varying, inhomogeneous and anisotropic medium. In ionosphere, it is challenging to solve wave equation problems.

Existing analytical and numerical methods are insufficient which are applied to solve wave equation in anisotropic an inhomogeneous ionosphere. These methods can be applied only when some physical properties of ionosphere are ignored or some approximations on the wave equation are made. The results obtained with such heavy processing load and long run time methods can not reflect the physical structure of the ionosphere. In some cases run time gets longer than the time that the structure of the ionosphere changes, so that the result can not be valid for the ionosphere which is desired to be modeled.

The performance of long distance communication technology increases, when the models of ionosphere and wave propagation are close to the reality. So there is a demand for a new approach arises to model wave propagation through the ionosphere and represent the physical properties of the ionosphere in

this model.

In this thesis, a novel and unique HF wave propagation model is developed. This model is composed of ray tracing representation of wave and 3 Dimensional (3D) spherical voxel model of ionosphere. Ray tracing is applied as a geometrical optics approach. Snell's law is used as a ray tracing technique. The well known Appleton-Hartree formula is used for calculation of refractive index, which is a critical parameter of ray tracing with Snells law. Appleton-Hartree formula represents physical parameters of ionosphere and in the developed model, all components of the formula are covered.

Wave incident to the ionosphere splits into two waves, which are ordinary and extraordinary waves, as a result of anisotropic structure of the ionosphere. In the wave propagation model developed in this thesis, ray tracing is applied for each of ordinary and extraordinary waves through 3D spherical voxel model of the ionosphere. 3D spherical voxel structure of represents the inhomogeneous structure of the ionosphere. Parameters of the ionosphere are calculated for each voxel for each given time. So that time dependency of ionosphere is also fulfilled by the model.

The parameters of the ionosphere is calculated using IRI-Plas software tool. IRI-Plas can be assimilated with data to represent the state of ionosphere better. IONOLAB-RAY provides Total Electron Content data automatically and using IRI-Plas, gives the opportunity to assimilate date to the ionosphere model.

IONOLAB-RAY algorithm is developed to implement wave propagation and ionosphere models generated in this study and to apply on engineering applications. IONOLAB-RAY is composed of preprocess and mainprocess phases. For the region of interest and time defined by the user, calculations which need relatively longer time and proper to do previously are done in preprocess phase. In mainprocess desired scenarios can be run in the given region of interest and time. All of the parameters needed in calculation of wave pro-

propagation in the ionosphere are calculated automatically by the modules of the IONOLAB-RAY. Multiple runs can be applied for sets of values of input parameters with one command and all combinations of the scenarios can be run. The format of outputs is available for engineering studies and analysis.

IONOLAB-RAY includes modules to calculate wave parameters such as, attenuation, time delay, phase velocity, group velocity and Faraday rotation. These parameters can also be inputs of channel models of long distance communication.

Data assimilation to the IONOLAB-RAY based on statistical models is available. This property enables to examine the statistical variation of wave propagation paths and arrival positions on Earth.

Wave paths with respect to different locations on Earth, days in year and times in day are generated using IONOLAB-RAY, which is developed in the scope of this thesis study. Results depending on the variations in the input parameters are obtained. The effects of data assimilation into the ionosphere model is observed. All of the results are examined.

IONOLAB-RAY algorithm is compared with other limited studies in the literature, which have the same purposes with IONOLAB-RAY, and compatible results are obtained under the limitations of major differences of the models. Ionograms are produced using IONOLAB-RAY algorithm and compared with measured ionograms. So that IONOLAB-RAY is validated over the comparisons both with simulations and measurements.

**Keywords:** High Frequency, Wave Propagation, Ionosphere, Ray Tracing, Total Electron Content

## TEŞEKKÜR

Akademik alıŐmalarımın en baŐından beri beni her zaman destekleyen, teŐvik eden, yolumu aydınlatan, kariyerimdeki her baŐarımda bŸyŸk katkıları olan değerli danışman hocam Prof. Dr. Feza ARIKAN'a saygıyla, minnetle ve sevgiyle teŐekkŸrlerimi sunarım.

Tez jŸrimdeki hocalarıma rehberlikleri ve kıymetli katkıları için teŐekkŸr ederim.

IONOLAB ailesinin parçası olan çok değerli hocalarıma ve araştırmacı arkadaşlarıma her tŸrlŸ destek, yardım, ilgi ve katkılarından dolayı teŐekkŸr ederim.

Tez sŸrecinde bana gŸsterdikleri anlayıŐ ve destek için ASELSAN'daki yŸnetici ve çalışma arkadaşlarıma ŐŸkranlarımı sunarım.

Canım arkadaşlarıma, bu zorlu ve uzun sŸrete yanımda olarak, verdikleri destek ve gŸsterdikleri anlayıŐ için teŐekkŸr ederim.

Bu zorlu sŸreci kolaylaŐtırmak için her tŸrlŸ fedakarlığı yapan, anlayıŐı gŸsteren, sevgi ve Őefkatleri ile beni her zaman destekleyen, bugŸnlere gelmemi sağlayan, en kıymetlilerim canım babacığım, anneciğim ve kardeŐime çok teŐekkŸr ederim.

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iv
TEŞEKKÜR .....	vii
İÇİNDEKİLER .....	viii
ŞEKİLLER .....	xi
ÇİZELGELER .....	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xviii
SÖZLÜK DİZİNİ .....	xix
1. GİRİŞ .....	1
2. İYONKÜRENİN ÖZELLİKLERİ .....	11
2.1. İyonkürenin Yapısı .....	11
2.2. İyonosonda ve İyonogram .....	18
2.3. IRI-Plas .....	19
2.4. İyonkürede Dalga Yayılımı Uygulamaları .....	21
3. IŞIN İZLEME .....	25
3.1. Işın İzleme Yaklaşımları .....	26
3.1.1. Dalga Denklemi .....	26
3.1.2. Eikonal Denklemi .....	30
3.1.3. Haselgrove Denklemleri .....	31
3.1.4. WKB Yöntemi .....	32
3.1.5. Booker Denklemi .....	33
3.2. Snell Yasası ile Işın İzleme .....	35
3.3. İyonkürede Kırılma İndisi .....	40
4. VERİ GİRİŞİ İLE BESLENEBİLEN 3 BOYUTLU KÜRESEL İYONKÜRE MODELİ .....	43
4.1. İyonkürenin 3 Boyutlu Küresel Hücre Modeli .....	43

4.2. İyonkürenin Veri İle Güncellenebilen IRI-Plas Modeli .....	46
4.2.1. Dalganın yayılım yolunda TEİ verisi kullanımının etkisi .....	47
4.2.2. IRI-Plas üst limitine kadar dalga yayılım yolu .....	49
4.3. Yerkürenin Manyetik Alan Modeli .....	50
4.4. Nötr Havaküre Amprik Modeli .....	52
5. IONOLAB-RAY ALGORİTMASI .....	53
5.1. IONOLAB-RAY Algoritmasının Yapısı .....	55
5.1.1. IGRF Modülü .....	58
5.2. IONOLAB-RAY Algoritmasının Kullanımı .....	58
5.2.1. Ön İşlem fonksiyonunun kullanımı .....	59
5.2.2. Ana İşlem fonksiyonunun kullanımı .....	61
5.2.3. Dalga Yayılım Yolu Grafiği Çizdirme Fonksiyonu .....	64
5.3. IONOLAB-RAY Algoritması ile Elde Edilen Bulgular .....	66
5.3.1. Frekansın değişimine karşılık dalga yayılım yolu .....	68
5.3.2. Yükseliş açısının değişimine karşılık dalga yayılım yolu .....	70
5.3.3. Konum tarih ve günün saatindeki değişimine karşılık dalga yayılım yolu .....	73
5.3.4. Yerkürenin Manyetik Alanındaki Değişimin Etkisi .....	78
5.4. IONOLAB-RAY Algoritmasının Alternatif Çalışmalar ile Karşılaştırılması .....	80
5.4.1. Çin coğrafi bölgesi için geliştirilmiş model ile IONOLAB-RAY'in karşılaştırılması .....	81
5.4.2. IONORT ile IONOLAB-RAY'in karşılaştırılması .....	82
5.4.3. PHARLAP ile IONOLAB-RAY'in karşılaştırılması .....	84
6. IONOLAB-RAY ALGORİTMASI İLE DALGA PARAMETRELERİNİN HESAPLANMASI .....	90
6.1. Zayıflama Katsayısı .....	90
6.2. Grup Hızı .....	96

6.3. Faz Hızı .....	106
6.4. Zaman Gecikmesi .....	111
6.5. Faraday Dönmesi .....	116
7. IONOLAB-RAY ALGORİTMASININ GENİŞLETİLMİŞ UYGULAMALARI .....	119
7.1. IONOLAB-RAY Algoritması ile İyonogram Yapılandırılması .....	119
7.2. İstatistiksel Modellere Dayalı Veri Beslemesi .....	127
8. SONUÇ .....	132
KAYNAKLAR .....	135
EK-1 .....	141
ÖZGEÇMİŞ .....	143

## ŞEKİLLER

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Ankara'da 21 Haziran 2015 tarihinde 00:00 GS, 03:00 GS, 06:00 GS, 09:00 GS, ve 12:00 GS için elektron yoğunluğu. . . .	12
Şekil 2.2. Pruhonice'de bulunan dijisonda ile 8 Ocak 2017 tarihi saat 23:00 GS için elde edilen iyonogram. . . . .	19
Şekil 2.3. Dalga yayılım tipleri. . . . .	22
Şekil 3.1. İyonküre katman sınır düzleminde kırılma. . . . .	38
Şekil 3.2. İyonküre katman sınır düzleminde yansıma. . . . .	39
Şekil 4.1. İlgi alanı bölge üzerinde 3B küresel hücre modelinin gösterimi. . . . .	45
Şekil 4.2. İyonkürede sıradan ve sıradışı dalganın yayılım modeli. . . . .	46
Şekil 4.3. Sakin günde TEİ beslemesinin etkisi, 17 Nisan 2011, 02:00, Ankara, 6 MHz, yanca açısı 90°, yükseliş açısı 30°. . . . .	48
Şekil 4.4. Fırtınalı günde TEİ beslemesinin etkisi, 25 Ekim 2011, 02:00, Ankara, 6 MHz, yanca açısı 90°, yükseliş açısı 30°. . . . .	49
Şekil 4.5. İyonküre ve Plazmakürenin 20.200 km yüksekliğe kadar modellenmesi, 21 Mart 2015, 12:00 GS, 20 MHz, Ankara, yanca açısı 90°, yükseliş açısı 89.9°. . . . .	50
Şekil 4.6. Yerkürenin manyetik alanının IGRF modülü ile hesaplanan bileşenleri . . . . .	52
Şekil 5.1. Ön İşlem Akış Şeması. . . . .	56
Şekil 5.2. Ana İşlem Akış Şeması. . . . .	58
Şekil 5.3. Sıradan ve sıradışı dalga yayılım yolu, 21 Aralık 2015, 10:00 GS, 6 MHz, İzmir, yanca 90°, yükseliş 60°. . . . .	68
Şekil 5.4. Frekans değişimine karşılık sıradan dalga yayılım yolu, 21 Haziran 2015, 10:00 GS, Ankara, yükseliş 30° yanca 90°. . . . .	69
Şekil 5.5. Frekans değişimine karşılık sıradışı dalga yayılım yolu, 21 Haziran 2015, 10:00 GS, Ankara, yükseliş 30° yanca 90°. . . . .	70
Şekil 5.6. Yükseliş açısı değişimine karşılık sıradan dalga yayılım yolu, 21 Haziran 2015, 22:00 GS, İzmir, 6 MHz, yanca 90°. . . . .	71



Şekil 5.7. Yükseliş açısı değişimine karşılık sıradışı dalga yayılım yolu, 21 Haziran 2015, 22:00 GS, İzmir, 6 MHz, yanca 90° . . . . .	72
Şekil 5.8. Yükseliş açısı değişimine karşılık sıradan dalga yayılım yolu, 21 Aralık 2015, 10:00 GS, İzmir, 6 MHz, yanca 90° . . . . .	72
Şekil 5.9. Yükseliş açısı değişimine karşılık sıradışı dalga yayılım yolu, 21 Aralık 2015, 10:00 GS, İzmir, 6 MHz, yanca 90° . . . . .	73
Şekil 5.10. Konum ve zaman değişiminin sıradan ve sıradışı dalga yayılım yolu üzerinde etkisi, Saint Petersburg, 6 MHz, yükseliş 45°, yanca 90° . . . . .	75
Şekil 5.11. Konum ve zaman değişiminin sıradan ve sıradışı dalga yayılım yolu üzerinde etkisi, Saint Petersburg, 8 MHz, yükseliş 45°, yanca 90° . . . . .	75
Şekil 5.12. Konum ve zaman değişiminin sıradan ve sıradışı dalga yayılım yolu üzerinde etkisi, Ankara, 6 MHz, yükseliş 45°, yanca 90° . . . . .	76
Şekil 5.13. Konum ve zaman değişiminin sıradan ve sıradışı dalga yayılım yolu üzerinde etkisi, Ankara, 8 MHz, yükseliş 45°, yanca 90° . . . . .	77
Şekil 5.14. Konum ve zaman değişiminin sıradan ve sıradışı dalga yayılım yolu üzerinde etkisi, Kampala, 6 MHz, yükseliş 45°, yanca 90° . . . . .	78
Şekil 5.15. Konum ve zaman değişiminin sıradan ve sıradışı dalga yayılım yolu üzerinde etkisi, Kampala, 8 MHz, yükseliş 45°, yanca 90° . . . . .	78
Şekil 5.16. Yerkürenin manyetik alanında güncelleme yapıldığında sıradan dalga yayılım yolundaki değişim, 25 Ekim 2011, 14:00 GS, Ankara, 6 MHz, yanca açısı 90°, yükseliş açısı 30° .	79
Şekil 5.17. Yerkürenin manyetik alanında güncelleme yapıldığında sıradışı dalga yayılım yolundaki değişim, 25 Ekim 2011, 14:00 GS, Ankara, 6 MHz, yanca açısı 90°, yükseliş açısı 30° .	80
Şekil 5.18. IONORT ile IONOLAB-RAY karşılaştırma, 21 Ekim 2010, 12:00 GS, 41° N, 12° E, 9 MHz, 45° başucu ve 0° yanca açısı. . . . .	84

Şekil 5.19. PHARLAP ile IONOLAB-RAY karşılaştırma, 01 Ocak 2014, 12:00 GS, 39° K, 35° D, 9 MHz, 20°'den 60°'ye 10°'lik adımlarla değişen yükseliş ve 45° yanca açısı. ....	87
Şekil 5.20. IRI-Plas kullanacak şekilde güncellenmiş PHARLAP ile IONOLAB-RAY çıktılarının karşılaştırması, 01 Ocak 2014, 12:00 GS, 39° K, 35° D, 9 MHz, 20°'den 60°'ye 10°'lik adımlarla değişen yükseliş ve 45° yanca açısı. ....	88
Şekil 5.21. PHARLAP ile TEİ verisi ile beslenmiş IONOLAB-RAY çıktılarının karşılaştırması, 01 Ocak 2014, 12:00 GS, 39° K, 35° D, 9 MHz, 20°'den 60°'ye 10°'lik adımlarla değişen başucu ve 45° yanca açısı. ....	89
Şekil 6.1. Günün saatine göre sıradan dalga yayılım yolu, 17 Nisan 2011, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°. ....	93
Şekil 6.2. Günün saatine göre sıradışı dalga yayılım yolu, 17 Nisan 2011, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°. ....	94
Şekil 6.3. Günün saatine göre zayıflama katsayısı, 17 Nisan 2011, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°. ....	94
Şekil 6.4. Günün saatine göre zayıflama katsayısının üstel bileşeni, 17 Nisan 2011, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°. ....	95
Şekil 6.5. Günün saatine göre dalga yayılım yolu uzunluğu, 17 Nisan 2011, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°. ....	95
Şekil 6.6. Yönbağımlı ortamda grup hızı.....	96
Şekil 6.7. Sakin gün 17 Nisan 2011 ve fırtınalı gün 25 Ekim 2011, sıradan ve sıradışı dalga yayılım yolu, 14:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°.....	99
Şekil 6.8. Sakin ve fırtınalı gün sıradan dalga yayılımının grup hızı değişimi, 17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 14:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°. ....	100

Şekil 6.9. Sakin ve fırtınalı gün sıradışı dalga yayılımının grup hızı değişimi, 17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 14:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90° . . . . .	100
Şekil 6.10. Sıradan dalganın yayıldığı yol boyunca elektron yoğunluğu değişimi, 17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 14:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90° . . . . .	101
Şekil 6.11. Sıradışı dalganın yayıldığı yol boyunca elektron yoğunluğu değişimi, 17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 14:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90° . . . . .	101
Şekil 6.12. Sakin gün 17 Nisan 2011 ve fırtınalı gün 25 Ekim 2011, sıradan ve sıradışı dalga yayılım yolu, 02:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90° . . . . .	102
Şekil 6.13. Sakin ve fırtınalı gün sıradan dalga yayılımının grup hızı değişimi, 17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 14:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90° . . . . .	103
Şekil 6.14. Sakin ve fırtınalı gün sıradışı dalga yayılımının grup hızı değişimi, 17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 14:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90° . . . . .	104
Şekil 6.15. Sıradan dalganın yayıldığı yol boyunca elektron yoğunluğu değişimi, 17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 02:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90° . . . . .	105
Şekil 6.16. Sıradışı dalganın yayıldığı yol boyunca elektron yoğunluğu değişimi, 17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 02:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90° . . . . .	105

Şekil 6.17. Sakin ve fırtınalı gün sıradan dalga yayılımının faz hızı değişimi, 17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 14:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°. . . . .	108
Şekil 6.18. Sakin ve fırtınalı gün sıradışı dalga yayılımının faz hızı değişimi, 17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 14:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°. . . . .	108
Şekil 6.19. Sakin ve fırtınalı gün sıradan dalga yayılımının faz hızı değişimi, 17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 02:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°. . . . .	110
Şekil 6.20. Sakin ve fırtınalı gün sıradışı dalga yayılımının faz hızı değişimi, 17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 02:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°. . . . .	110
Şekil 6.21. Sakin ve fırtınalı gün sıradan dalga yayılımının zaman gecikmesi, 17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 02:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°. . . . .	114
Şekil 6.22. Sıradan ve sıradışı dalganın izlediği yol ve zaman gecikmesi, 21 Haziran 2015 10:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°. . . . .	115
Şekil 6.23. Sıradan ve sıradışı dalganın izlediği yol ve zaman gecikmesi, 21 Haziran 2015 10:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 45°, yanca açısı 90°. . . . .	115
Şekil 6.24. Sıradan ve sıradışı dalganın izlediği yol ve zaman gecikmesi, 21 Haziran 2015 10:00 GS, Ankara, 9 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°. . . . .	116
Şekil 6.25. Sıradan ve sıradışı dalganın izlediği yol ve zaman gecikmesi, 21 Haziran 2015 10:00 GS, Ankara, 9 MHz, yükseliş açısı 45°, yanca açısı 90°. . . . .	116

Şekil 7.1. Ölçüme ve IONOLAB-RAY modeline dayalı iyonogramların karşılaştırılması, Pruhonice, 14 Şubat 2015, 13:00 GS, sıradan dalga. ....	123
Şekil 7.2. Ölçüme ve IONOLAB-RAY modeline dayalı iyonogramların karşılaştırılması, Pruhonice, 14 Şubat 2015, 13:00 GS, sıradışı dalga. ....	124
Şekil 7.3. Ölçüme ve IONOLAB-RAY modeline dayalı iyonogramların karşılaştırılması, Pruhonice, 14 Şubat 2015, 17:00 GS, sıradan dalga. ....	124
Şekil 7.4. Ölçüme ve IONOLAB-RAY modeline dayalı iyonogramların karşılaştırılması, Pruhonice, 14 Şubat 2015, 17:00 GS, sıradışı dalga. ....	125
Şekil 7.5. Ölçüme ve IONOLAB-RAY modeline dayalı iyonogramlar ile IONOLAB-RAY ile hesaplanan gerçek yükseklik karşılaştırılması, Pruhonice, 14 Şubat 2015, 13:00 GS, sıradan dalga. ....	126
Şekil 7.6. Ankara 08:00 - 09:00 GS Mart Ekinoks için elde edilen Lognormal OYF ve ölçüm TEİ dağılımı. ....	129
Şekil 7.7. İstatistiksel TEİ verisi ile beslenen IONOLAB-RAY ile elde edilen sıradan dalga yayılım yolu, 20 deney, Ankara, 5 Mart 2011, 12:00 GS, 9 MHz, yükseliş açısı 60°, yanca açısı 90°. . .	130
Şekil 7.8. İstatistiksel TEİ verisi ile beslenen IONOLAB-RAY ile elde edilen sıradışı dalga yayılım yolu, 20 deney, Ankara, 5 Mart 2011, 12:00 GS, 9 MHz, yükseliş açısı 60°, yanca açısı 90°. . .	131

## ÇİZELGELER

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5.1. Senaryolarda kaynak konumları. ....	55
Çizelge 5.2. Ön işlem fonksiyonunun girdi parametreleri. ....	60
Çizelge 5.3. Ana işlem fonksiyonunun girdi parametreleri. ....	62
Çizelge 5.4. Ana işlem fonksiyonunun girdi parametrelerinin çıktı olarak kaydedilmesi. ....	64
Çizelge 5.5. Ana işlem fonksiyonunun çıktı parametreleri. ....	65
Çizelge 5.6. Dalga yayılım yolu grafiğini çizdiren modülün girdi parametreleri. ....	67
Çizelge 5.7. Çin ve yakın çevresi için geliştirilen dalga yayılım modeli ile IONOLAB-RAY'in kıyaslanması. ....	81
Çizelge 5.8. IONORT ile IONOLAB-RAY'in kıyaslanması. ....	83
Çizelge 5.9. PHARLAP ile IONOLAB-RAY'in kıyaslanması. ....	85
Çizelge 6.1. Zayıflama katsayısı modülünün çıktı parametreleri. ....	93
Çizelge 6.2. Grup hızı modülünün çıktı parametreleri. ....	98
Çizelge 6.3. Faz hızı modülünün çıktı parametreleri. ....	107
Çizelge 6.4. Zaman gecikmesi modülünün çıktı parametreleri. ....	113
Çizelge 6.5. Faraday dönmesi modülünün girdi parametreleri. ....	118
Çizelge 6.6. Faraday dönmesi modülünün çıktı parametreleri. ....	118

## SİMGELER VE KISALTMALAR

3B	3 Boyutlu
AFD	Ayrık Fourier Dönüşümü
DKY	Doğu Kuzey Yukarı koordinat sistemi
DTEİ	Dik Doğrultuda Toplam Elektron İçeriği
EBY	Enlem Boylam Yükseklik koordinat sistemi
ETEİ	Eğik Doğrultuda Toplam Elektron İçeriği
GS	Greenwich Saati
KD	Kısa Dalga
IRI	International Reference Ionosphere
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
TEİ	Toplam Elektron İçeriği
YKS	Yerküresel Konumlama Sistemi
YKUS	Yerküresel Konumlama Uydu Sistemleri
YMYs	Yerküre Merkezli Yerküre Sabit koordinat sistemi
ZUSF	Zaman Uzamında Sonlu Farklar
K	Kuzey
G	Güney
D	Doğu
B	Batı

## SÖZLÜK DİZİNİ

Ana işlem	:	Mainprocess
Aradeğerleme	:	Interpolation
Ayrık Fourier Dönüşümü	:	Discrete Fourier Transform
Çoklu yol	:	Multi path
Dalga cephesi	:	wave front
Dalgasayısı	:	Wavenumber
Dik doğrultuda toplam elektron içeriği	:	Vertical total electron content
Doğu Kuzey Yukarı koordinat sistemi	:	East North Up coordinate system
Dönme frekansı	:	Cyclotron frequency
Düzgün dağılmayan	:	Inhomogeneous
Eğik doğrultuda toplam elektron içeriği	:	Slant total electron content
Elektrik geçirgenlik	:	Permittivity
En büyük kullanılabilir frekans	:	Maximum Usable Frequency (MUF)
Faraday dönmesi	:	Faraday rotation
Fazör	:	Phasor
Gerçel (sayı)	:	Real (number)
Gökyüzü dalgası	:	Sky wave
Görüş Doğrultusu	:	Line of sight
Greenwich Saati	:	Universal Time (UT)
Güneş Lekesi	:	Sun Spot
Havaküre	:	Atmosfer
İlgi alanı bölge	:	Region of interest
İyonküre	:	İyonosfer
İyonogram	:	Ionogram
Karmaşık sayı	:	Complex number
Konuma göre değişimi dağınık	:	Spatially dispersive
Kutuplanma	:	Polarization



Manyetik geçirgenlik	:	Permeability
Noktalı veri yapısı	:	Pointer data structure
Ön işlem	:	Preprocess
Sanal (sayı)	:	Imaginary (number)
Serbest uzay	:	Freespace
Sonlu elemanlar yöntemi	:	Finite Elements Method (FEM)
Sönümlenme	:	Fading
Toplam Elektron İçeriği (TEİ)	:	Total Electron Content (TEC)
Uyumlandırma fonksiyonu	:	Fit function
Uzay dalgası	:	Space wave
Yanca	:	Azimuth
Yayılm	:	Propagation
Yer dalgası	:	Ground wave
Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS)	:	Global Positioning System (GPS)
Yerküresel Konumlama Uydu Sistemleri	:	Global Navigation Satellite Systems
Yön bağımlı	:	Anisotropic
Yükseliş	:	Elevation
Zaman alanında sonlu farklar	:	Finite Difference Time Domain (FDTD)
Zamana göre değişimi dağınık	:	Temporally dispersive

# 1. GİRİŞ

Kısa Dalga (KD) bandında (3-30 MHz), iyonküre ortamında elektromanyetik dalga yayılımı uzak mesafe haberleşme için önem taşımaktadır. İyonküre havakürenin temel olarak güneş kaynaklı olarak iyonlaşmış, yön bağımlı, düzgün dağılmayan, zamana göre değişim gösteren, zamana ve konuma göre değişimi dağınık özelliklerde bir katmandır [1–5]. İyonkürrede dalga yayılımı, uydu haberleşmesinde [6, 7], ufuk ötesi radarlarda [8–12], yön bulmada [13, 14] ve Yerküresel Konumlama Uydu Sistemleri (YKUS) konumlandırma hatalarının düzeltilmesi [15–17] konularında önemli rol oynamaktadır.

Elektromanyetik dalgaların iyonkürrede yayılımı işletim frekansına, kaynak antenin konumuna, kaynak antenden çıkan dalganın yönelimine, yani yanca ve yükseliş açılarına ve iyonkürenin konum ve zamana göre değişimine bağlıdır. Kaynaktan çıkan dalga iyonkürenin yapısı sayesinde yansıyarak uzak mesafelere ulaşabilmektedir. İyonküre kaynaklı koşulların değişmesi halinde kaynaktan çıkan dalga iyonkürrede kırılarak havaküreden çıkabilir ya da yeryüzündeki alıcı antene göre daha yakın veya uzağa ulaşabilir. İyonkürrede dalga yayılımının güvenilir ve gürbüz bir modelinin geliştirilebilmesi için iyonkürenin yapısal özellikleri mümkün olduğunca gerçekçi bir şekilde hesaba katılmalıdır.

İyonkürenin karmaşık yapısı 1930'lardan beri ilgi gösterilen bir konu olmuştur. İlk dönemlerde yansıma, iyonların çarpışması ve yerkürenin manyetik alanının etkileri gibi fiziksel kavramların anlaşılmasına yönelik girişimler ortaya çıkmıştır [18–21]. Erken dönemde Chapman tarafından yüksekliğe göre değişen elektron yoğunluğu profili modeli geliştirilmiştir [22].

Bu girişimler iyonkürrede dalga yayılımına yönelik formüller geliştirmenin yolunu açmaya başlamış ve KD bandında dalga yayılımının modellenmesinde en kritik parametrelerden birinin kırılma indisi olduğu görülmüştür. Kırılma indisinin hesaplanmasına yönelik farklı zaman ve yerlerde, Lassen, Appleton ve Hartree tarafından çalışmalar yapılmıştır [23–25]. İyonkürenin yönbağımlılık ve

düzcün dağılmama özelliğlerini de bulunduran, genelleştirilmiş kırılma indisi ifadesi Appleton-Hartree formülü olarak bilinmektedir [1, 26–29].

1960'lı yılların sonlarında Committee on Space Research (COSPAR) ve International Union of Radio Science (URSI) tarafından desteklenen International Reference Ionosphere (IRI) adı verilen proje başlatılmıştır [30]. Bu projenin amacı iyonkürenin standart ampirik modelini geliştirmektir. Günümüzde halen geliştirilmeye devam eden IRI yazılımı iyonkürenin gözlemlerine dayanan modeller ile elektron yoğunluğu, iyon bileşimi, iyon ve elektron sıcaklıkları ve toplam elektron içeriği parametrelerinin günlük-aylık orta değerlerini verilen zaman ve konum için 60 km - 1500 km yükseklik aralığında hesaplamaktadır [31–34].

IRI'nın plazmaküreyi 20.200 km'ye kadar kapsayacak şekilde güncellenmiş hali IRI-Plas olarak adlandırılmaktadır [35]. IRI-Plas iyonküre modeli olarak uluslararası standart kabul edilmektedir [36]. IRI-Plas kullanıcıya ilgilenilen zaman ve konum için yüksek güven seviyesinde elde edilebilen Toplam Elektron İçeriği (TEİ) gibi önemli iyonküre parametrelerini yazılıma girdi olarak besleme imkanı sağlamaktadır. IRI-Plas'da bulunan modeller ve ilgili katsayılar bu girdi değerlerine göre güncellenmekte ve böylece iyonküre daha gerçeğçi olarak modellenebilmektedir.

İyonkürenin karmaşık ve değişken yapıya sahip olması nedeniyle, iyonküre ortamında dalganın yayılım yolunun hesaplanmasına yönelik elektromanyetik dalga denklemlerinin çözümleri zorlu bir problem haline gelmektedir. Bu probleme, iyonküredeki düzensizliklerin boyutlarının KD bandının kapsadığı dalgaboylarından çok daha büyük olması sayesinde, bir tür geometrik optik yaklaşımı olan ışın izleme ile çözümleri getirilebilmektedir. Dalga denklemlerinde, kırılma indisinin konuma göre yavaş değişim göstermesi kabulü uygulanması sonucunda Eikonal denklemi elde edilmektedir [1]. İyonküre ortamında Eikonal denkleminin çözümleri için altı diferansiyel denklemden oluşan Haselgrove denklem seti türetilmiştir [37, 38]. Dalganın yayılım yolunun hesaplanabilmesi için bu

diferansiyel denklemlerin bir arada yol üstünden integralinin hesaplanması gerekmektedir. Bu çözümü sağlamak halen zor olduğundan daha ileri seviyede yaklaşımların yapılması ihtiyacı bulunmaktadır [1].

İyonküredeki dalga yayılımını karakterize etmek ve modellemek için 1960'lı yıllardan itibaren çeşitli algoritmalar ve yazılım araçları geliştirilmiştir. Bunlar arasında hesaplama karmaşıklığı az olan, en temel olarak ve sıklıkla kullanılan Jones ve Stephenson tarafından geliştirilen algoritmadır [39]. Bu algoritma çeşitli kabuller altında Haselgrove denklemlerini çözmektedir. Jones ve Stephenson koduna dayanarak iyonkürede ışın izleme yapan uygulamalar geliştirilmiştir. Bu uygulamalarda yerkürenin manyetik alanı ve elektron çarpışmaları ihmal edilmekte, kırılma indisi yalnız elektron yoğunluğu dağılımına bağlı olan sadeleştirilmiş formüller ile hesaplanmaktadır [40–42]

Düzgün dağılmayan iyonkürede dalga yayılımının modellenmesinde Wentzel-Kramers-Brillouin (WKB) metodundan da faydalanılmaktadır [1, 43]. Bu model konuma göre yavaş olan dielektrik katsayısı değişiminin yalnız yüksekliğe bağlı olduğu kabulü altında iyonküre için uygulanabilmektedir. Dalga yayılımının hesaplanmasına yönelik iyonkürenin modellenmesinde uygulanan bir diğer yaklaşım ise iyonkürenin katmanlı bir yapıda tasarlanmasına ve her bir katmanın kendi içinde düzgün dağılan ve yön bağımsız olduğunun kabul edilmesine dayanmaktadır. Bu kabul altında dalganın izlediği yolun hesaplanmasında ışın izleme yöntemi olarak Snell Yasası uygulanmaktadır [44]. İyonkürenin yatay düzlemde de düzgün dağılmamış yapıya sahip olması dalga yayılımı üzerinde önemli etki gösterdiğinden iyonkürenin yalnız yüksekliğe göre değişimini ifade eden modeller ile yeterli hassasiyette çözüm sağlanamamaktadır.

Literatürde analitik yöntemlerle ışın izleme çözümleri uygulayan çalışmalar bulunmaktadır [45–48]. Bu çalışmalarda iyonküre küresel katmanlardan oluşan bir ortam olarak modellenmektedir. Işının izlediği yolu hesaplamak üzere denklemler türetilmekte ve analitik olarak 2 ve 3 boyutta çözülmeye çalışılmaktadır. Verilen çalışmalarda yerkürenin manyetik alanı ihmal edilmekte ve kırılma in-

disi yalnız plazma frekansına bağılı bir uyumlandırma fonksiyonu ile hesaplanmaktadır. Bu yaklaşımlar sonucu iyonkürenin yön bağımlı olma özelliği kapsanmamaktadır.

Analitik yöntemlerin yanı sıra iyonküre ortamında dalga denklemlerinin çözümünde nümerik yöntemler de uygulanmaktadır [49, 50]. Verilen kaynak çalışmalarda iyonküre global enlem ve boylam ızgaralarına bölünmektedir. Elektrik ve manyetik alan yayılımı Zaman Uzamında Sınırlı Farklar (ZUSF) yöntemi ile hesaplanmaktadır. İyonküre zamana göre değişim gösteren bir ortam olduğundan, yüzlerce hatta binlerce kilometre uzunluğundaki yayılım yolunun hesaplanmasında geçen süre ve işlem yükü bu yöntemin uygulanabilirliğinin değerlendirilmesinde göz önünde bulundurulmalıdır.

Literatürde sınırlı sayıda iyonkürerde dalga yayılımını modelleyen yazılım aracı bulunmaktadır. Bunlardan biri IONORT yazılımıdır [51]. Bu yazılımda Haselgrove denklem setinin çözümüne dayanan ışın izleme yöntemi uygulanmaktadır. Denklem setinin çözümünde dalganın izlediği yolun bağımsız integral değişkeni olması kabulüne dayanan Johns ve Stephenson kodu kullanılmaktadır. Yazılım kendi içinde bir iyonküre modelleme aracı içermemekte; iyonküre parametrelerinin kullanıcı tarafından metin dosyası ile girilmesi beklenilmekte ya da analitik standart Chapman modeli ile elektron yoğunluğu profili hesaplanabilmektedir. Johns ve Stephenson'un FORTRAN tabanlı kodunun doğrudan kullanılması algoritmada güncelleme yapılmasını kısıtlamakta ve yazılımın çalışma süresini uzatmaktadır. Yazılımda kullanılan kırılma indisi formülü ve hesaplanma algoritması açık olarak belirtilmemiştir. Kullanıcı arayüzü tarih ve zaman girdisi almamaktadır. Dolayısı ile yazılım kendi içinde zamana bağılı iyonküre modeli sağlamamaktadır. Kullanıcı arayüzü ile sağlanan çıktı grafik formatları oldukça kısıtlıdır. Yazılıma İtalya ve Yunanistan bölgesi için girilen veriler ile elde edilen çıktılar bu bölgede elde edilen ölçümler ile karşılaştırılmıştır [52].

Literatürdeki KD bandında dalga yayılımını modelleyen diğer bir yazılım, Aust-

ralya'nın araştırma kurumu olan Defence Science and Technology Organisation (DSTO) tarafından geliştirilen PHARLAP yazılımdır [53]. 2 boyutlu (2B) ışın izlemeden, 3 boyutlu (3B) yerkürenin manyetik alanının hesaba dahil edildiği ışın izlemeye kadar çeşitli detay seviyelerinde çözümler sunmaktadır. 2B ışın izlemede Coleman denklemleri kullanılmaktadır. 3B ışın izleme Haselgrove denklem setinin çözülmesi ile uygulanmaktadır. Haselgrove denklemlerini küresel koordinatlarda çözen Johns ve Stephenson kodu yerine işlem karmaşıklığını azaltmak amacıyla denklem setinin kartezyen koordinatlarındaki halini çözen kod uygulanmaktadır. İyonküre modeli quasi-parabolik katmanlar ile oluşturulmaktadır. Kırılma indisi için Appleton-Hartree eşitliği kullanılmaktadır. İyonkürenin parametrelerinin hesaplanmasında IRI kullanılmaktadır ve IRI modelinin getirdiği kısıtlar PHARLAP yazılımına yansımaktadır. Bu yazılımın işlem yükü fazla ve koşum süresi uzun olmaktadır.

İyonkürede dalga yayılımının modellenmesinde uygulanan farklı bir ışın izleme tekniği ise ışın tüpü yaklaşımı olarak adlandırılmaktadır [54]. Bu teknikte işlemsel karmaşıklığı ve yükü azaltmak için bir ışın için hesaplama yapılmakta ve bir ışın demetinin yayılımı bu ışın için yapılan hesaptan türetilmektedir. Işın tüpü yaklaşımında bir tüp içindeki ışın demetinin ortak bir yolu takip ettiği kabulü yapılmaktadır. Ancak ışın demetindeki farklı yanca ve yükseliş açıları ile kaynaktan çıkan ışınlar, iyonkürenin yapısı nedeniyle oldukça farklı yollardan yayılabilmektedir. Bu yöntemde bu durum modele yansıtılamamaktadır.

Dalganın yayılım yolunun modellenmesi ile KD bandında haberleşme kanallarının çeşitli parametreleri hesaplanabilmektedir [55]. Verilen bu çalışmada KD kanal karakteristikleri 3B ışın izleme ile hesaplanmaktadır. Uygulanan ışın izleme modelinde Appleton-Hartree formülü kullanılmaktadır. Yerkürenin manyetik alanı hesaba katılmakta, böylece iyonkürenin yön bağımlı olma özelliği kapsanmaktadır. Bu çalışma ile geliştirilen algoritmada iyonkürenin fiziksel özelliklerini yansıtan parametrelerin aylık ortanca değerlerinin hesaplanmasında, Çin ve yakın çevresinin coğrafyasını sınırlayan bölge için geliştirilmiş bir iyonküre

modeli kullanılmaktadır. Bu nedenle bu algoritma iyonkürenin güncel halini modellemekte eksik kalmaktadır. Ayrıca Çin ve yakın çevresinin coğrafi sınırları dışında kalan bölgelerdeki iyonküreyi modele yansıtamamaktadır. Algoritmada uygulanan ışın izleme yöntemi açık olarak anlatılmamaktadır.

İyonkürede dalga yayılımının modellenmesinden farklı olarak KD radyo haberleşmenin modellenmesi ve planlanması için ihtiyaç duyulan parametrelerin hesaplanmasına yönelik geliştirilen yazılım araçları bulunmaktadır. Institute for Telecommunication Sciences (ITS) tarafından IONCAP (IONospheric Communication Analysis and Prediction) programı geliştirilmiştir [56]. ICED (Ionospheric Conductivity and Electron Density profile) adı verilen iletkenlik ve elektron yoğunluğu profilinin IONCAP yazılımına eklenmesi ile ICEPAC (Ionospheric Communications Enhanced Profile Analysis and Circuit prediction) programı meydana getirilmiştir [57, 58]. ICEPAC yazılımı iyonküre ve dalga yayılımı ile ilgili katmanların kritik frekansları, En büyük Kullanılabilir Frekans (EKF), optimum trafik frekansları, olası en yüksek frekans, katmanların gerçek ve sanal katman yükseklikleri gibi çeşitli parametrelerini çıktı olarak sunmaktadır. ICEPAC yazılımı dalga yayılım yolunu hesaplamamaktadır. Bunun yerine saatlik aylık ortanca değerleri kullanarak daha önceden kurulmuş iyonkürenin değişken özelliğini yansıtmayan belli formüller ile bir takım iyonküre parametrelerini sunmaktadır. KD bandında işletilen yayıcı kaynağa göre kapsama alanları IONCAP ve ICEPAC kullanılarak hesaplanabilmektedir. [59].

KD bandında iyonkürede dalga yayılımının modellenmesi iki temel konunun bileşiminden oluşmaktadır. Bunlardan birincisi iyonkürenin yapısının ve fiziksel parametrelerinin modellenmesidir. İkinci bileşen ise dalga yayılımının iyonkürenin yapısına ve ilgili dalga boyu koşullarına uygun yaklaşımlar altında hesaplanmasıdır. Literatürde bulunan çalışmalar incelendiğinde, dalga yayılımı modelinin karmaşıklığı yüksek olduğunda, kabul edilebilir işlem yükü ve hesap süresi ile çözüm elde edilebilmesi için, iyonküre modelinde gerçeği yansıtmayan kabullerin yapılması ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. İyonkürenin zamana göre

değişim gösteren bir yapıya sahip olması ve kısa süreler içinde büyük değişiklikler gösterebilmesi sebebi ile geliştirilen modellerin kabul edilebilir işlem yükü ve çalışma süresi koşullarında uygulanabilmesi gerekmektedir [60–62]. İyonkürenin karmaşık yapısı KD bandında dalga yayılımı üzerinde etkili olmaktadır. İyonkürenin yapısal özelliklerinin dalga yayılım modeline mümkün olduğunca dahil edilmesi başarıyı arttırmaktadır. Bu bakış açısı ile bu doktora tezi çalışmasında KD bandında dalga yayılım modeli geliştirilmiştir.

KD bandında dalga yayılım modelinin iki ana bileşeninden dalga yayılım modelinde, ışın izleme tekniklerinden Snell Yasası uygulanmaktadır [63]. Snell Yasası ile ışın izlemenin en kritik parametresi olan kırılma indisi, Appleton-Hartree eşitliği ile hesaplanmaktadır. KD bandında dalga yayılım modelinin diğer bileşeni olan iyonküre modeli 3B küresel hücre yapısı ile benzetilmekte ve iyonkürenin parametreleri IRI-Plas aracı ile sağlanmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, KD bandında dalga yayılım modelinin yanı sıra bu modelin uygulanması amacıyla IONOLAB-RAY adı verilen algoritma geliştirilmiştir. IONOLAB-RAY algoritması ön işlem ve arı işlem fazlarından oluşmakta; bu sayede çalışma süresi ve işlem yükü açısından kazanç sağlamaktadır. IONOLAB-RAY algoritması, iyonkürenin benzetilmesi ve Appleton-Hartree formülünde bulunan parametrelerin hesaplanması için gereken tüm araçları kendi bünyesinde bulundurmaktadır. Girdi parametrelerinin çoklu değerlerine karşılık tek seferde çalışma imkanı ve sunduğu çıktı parametresi çeşitliliği ile mühendislik uygulamaları için verimli olmaktadır. IONOLAB-RAY algoritması iyonkürenin yapısını modellemekte ve fiziksel parametrelerini hesaplamakta IRI-Plas yazılım aracını kullanmakta ve sağladığı avantajlardan faydalanmaktadır. IONOLAB-RAY dalganın zayıflama katsayısı, grup hızı, faz hızı, zaman gecikmesi ve Faraday dönmesi parametrelerini hesaplayan modüller içermektedir. Mevcut hali ile IONOLAB-RAY algoritması mümkün olan tüm girdi koşullarına karşılık, KD bandında, iyonkürede dalga yayılımını modelleyen ve dalga parametrelerini hesaplayan yeni ve benzersiz bir araçtır. IONOLAB-RAY algo-



ritmasının öne çıkan özellikleri aşağıda liste halinde açıklanmaktadır.

- İyonkürenin düzgün dağılmayan yapısı, 3B küresel hücre yapısı ile modellenmektedir. Bu hücre yapısı, kullanıcı tarafından belirlenebilen enlem, boylam ve yükseklik sınırları çerçevesinde ve istenilen çözünürlükte kurulmaktadır. Enlem, boylam ve yükseklik adımları esnek şekilde tanımlanabilmektedir. Böylece ilgi alanı bölge içinde farklı çözünürlükte kısımlar oluşturulabilmektedir. İyonkürenin fiziksel parametreleri her bir hücre için hesaplanmakta olup; yatayda ve dikeyde konuma göre değişim modele dahil edilmektedir.
- İyonkürenin yön bağımlı olma özelliği, kırılma indisinin hesaplanmasında Appleton-Hartree eşitliğinin yerkürenin manyetik alanı parametresi de dahil olmak üzere tüm bileşenleri ile hesaplanması sayesinde kapsamaktadır. Yerkürenin manyetik alanı vektörünün bileşenleri, algoritmanın bir parçası olarak International Geomagnetic Reference Field (IGRF) modülü ile otomatik olarak sağlanmaktadır.
- İyonkürenin zamana göre değişim gösterme özelliği, IONOLAB-RAY yazılımının iyonküre parametrelerini zaman değişkenine bağlı hesap yapması sayesinde karşılanmaktadır. İyonkürenin parametreleri girilen tarih ve zamana göre olarak hesaplanmakta ve algoritmadaki işlemlerde kullanılmaktadır.
- IONOLAB-RAY algoritmasında iyonkürenin fiziksel parametrelerinin hesaplanmasında IRI-Plas yazılım aracı kullanılmaktadır. IONOLAB-RAY'in bir modülü olarak kullanılan IRI-Plas, kullanıcının girdiği senaryo koşullarında otomatik olarak iyonküre parametrelerini hesaplamaktadır. IRI-Plas kullanımının bir avantajı olarak ilgili konum ve zaman için TEI verileri ile beslenerek, bu veriler ile güncellenmiş değerleri sağlamasıdır.
- IONOLAB-RAY algoritması kendi içinde bir bütündür. İhtiyaç duyulan tüm hesaplamalar yazılımda bulunan modüller aracılığı ile otomatik olarak ya-

pılabilmektedir. Kullanıcının dışarıdan veri sağlaması ihtiyacı bulunmamaktadır. Bu sayede herhangi bir kısıt olmadan yerkürenin istenilen bölgesinde, istenilen tarih ve zamanda senaryolar koşturulabilmektedir. Bunun yanı sıra algoritmanın esnekliğinin getirdiği bir avantaj olarak, tercih edilmesi halinde iyonkürenin ilgili parametrelerinin dışarıdan girdi olarak sağlanması mümkündür.

- IONOLAB-RAY algoritması modüler bir tasarıma sahiptir. Modüller güncellenebilir, değiştirilebilir veya iyileştirilebilir durumdadır. Böylece algoritmanın genel yapısında değişiklik yapmaya gerek kalmadan algoritma yenilenebilmektedir. Grafik çıktıları üreten ve dalganın zayıflama katsayısı, grup hızı, faz hızı, zaman gecikmesi ve Faraday dönmesi dalga parametrelerini hesaplayan modüller içermektedir.
- IONOLAB-RAY algoritması esnek bir yapıya sahiptir. Kullanıcı, iyonkürenin 3B ızgara yapısını istenilen çözünürlükte ve farklı çözünürlük dağılımlarında girebilmektedir. Girdi parametrelerinin birden fazla değerine karşılık algoritma tek seferde çoklu olarak koşum yapabilmekte ve çıktıları belli bir sıralama yapısı ile toplu olarak verebilmektedir.
- IONOLAB-RAY algoritması çalışma süresi ve işlem yükü açısından ekonomiktir. Bu anlamda ışın izlemede Snell Yasasının kullanımının avantajının yanı sıra algoritmanın ön işlem ve ana işlem olarak iki fazdan oluşması etkinlik sağlamaktadır. Kullanıcının belirleyeceği yerküre üzerindeki bölge ve zaman girdilerine karşılık, hesaplanması zaman alabilen ve önceden hesaplanabilen parametreler ön işlem aşamasında hesaplanmaktadır. Sonrasında bu bölge ve zamanlar için çeşitli senaryolar hızla koşturulabilmektedir.
- IONOLAB-RAY algoritması kullanıcı dostudur. Karmaşık hesaplamalar ve kullanıcı tarafından sağlanması zor olan parametreler algoritma içinde otomatik olarak sağlanmaktadır. Kullanıcı komut satırı ile senaryo parametrelerini girebilmektedir. Gelecek çalışmalarda algoritmaya bir kullanıcı

arayüzü sağlanabilecektir.

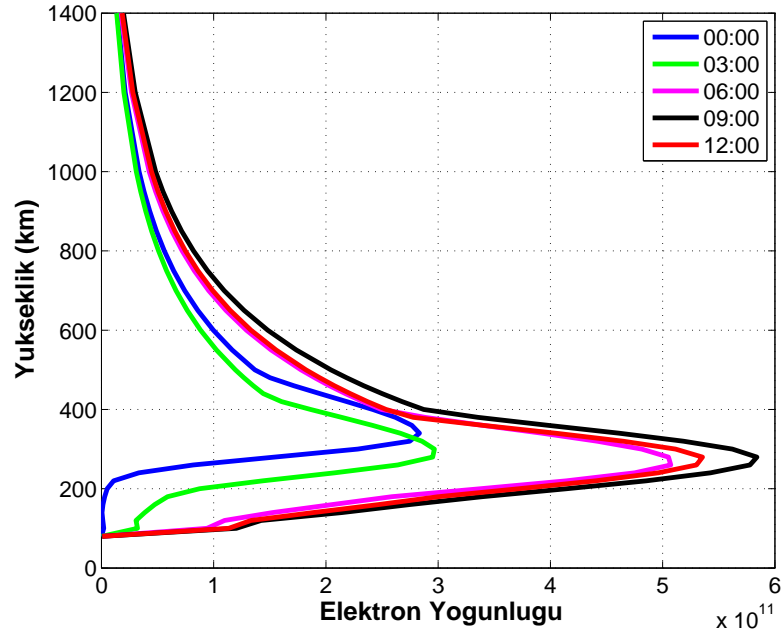
Bu tezde, tez çalışması kapsamında geliştirilen KD bandında dalga yayılım modelinin ve IONOLAB-RAY algoritmasının tasarım ayrıntıları, özellikleri, sağladıkları yenilik ve avantajlar ile geliştirilmeye açık olan yönleri anlatılmaktadır. Bölüm 2'de iyonkürenin yapısı, parametreleri, yapısının anlaşılması ve ifade edilmesi için uygulanan ölçüm yöntemleri, modellemede kullanılan IRI-Plas yazılımı ve etki ettiği dalga yayılım uygulamaları verilmektedir. Bölüm 3'te ışın izleme yaklaşımları ve bu tez kapsamında uygulanan ışın izleme yöntemi açıklanmaktadır. Bölüm 4'te bu tez kapsamında geliştirilen 3B küresel hücre yapısındaki iyonküre modeli ve bu modelin veri ile beslenebilmesi ile ilgili bilgiler ifade edilmektedir. Bölüm 5 ile bu tez kapsamında geliştirilen IONOLAB-RAY algoritmasının yapısı, bu algoritmanın girdi parametrelerinin değişimine karşılık elde edilen bulgular ve IONOLOAB-RAY ile benzer amaçlara yönelik geliştirilen yazılımlar ile karşılaştırılması sunulmaktadır. Bölüm 6'da IONOLAB-RAY'in modülleri ile dalganın, zayıflama katsayısı, grup hızı, faz hızı, zaman gecikmesi ve Faraday dönmesi parametrelerinin hesaplanması ve bu modüller ile elde edilen bulgular verilmektedir. IONOLAB-RAY'in genişletilmiş uygulamalarından istatistiksel modele dayalı veri beslemesi ve IONOLAB-RAY algoritması ile iyonogram yapılandırılması konuları Bölüm 7'de anlatılmaktadır. Sonuçlar Bölüm 8'de tartışılmaktadır.

## 2. İYONKÜRENİN ÖZELLİKLERİ

İyonküre güneş ışınlarının etkisi ile iyonize olan gazlardan oluşan bir havaküre tabakasıdır. Bu tabakanın sınırları keskin olmamakla birlikte yaklaşık olarak havakürede yeryüzünden 60 km ile 1.100 km yükseklik arasında kalan katman iyonküre olarak kabul edilmektedir. Güneş ve yerkürenin manyetik alanındaki aktiviteler iyonkürenin yapısı üzerinde etkili olmaktadır. Bu etkilerin sonucu olarak iyonküre düzgün dağılmamış, yön bağımlı ve zamana göre değişim gösteren karmaşık bir yapıdadır. Ayrıca iyonkürenin zamana ve konuma göre değişimi dağınıktır. Yeryüzüne göre iyonkürenin sonrasında plazmaküre adı verilen yine iyonlardan oluşan ve daha düşük enerjili bir katman gelmektedir. Bu tez kapsamında geliştirilen modeller 20.200 km'ye kadar iyonküreyi ve plazmaküreyi kapsamaktadır. Bu bölümdeki bilgiler için [1–5] kaynaklarından yararlanılmıştır.

### 2.1 İyonkürenin Yapısı

İyonküre elektron ve iyonlardan oluşan bir yapıdır. Güneşten gelen mor ötesi ve X-ışınları havakürenin yaklaşık 60 km ile 1.100 km arasında kalan bölgesinde iyonlaşmaya sebep olmaktadır. İyonkürenin özelliklerin ifade edilmesinde kullanılan en önemli parametre elektron yoğunluğudur.  $N_e$  ile gösterilen iyonkürenin elektron yoğunluğu bir metre küp hacme düşen elektron sayısıdır. İyonkürede elektron yoğunluğunun dağılımı konuma ve zamana göre değişim göstermektedir. Örnek olarak Ankara'da 21 Haziran 2015 tarihinde saat 00:00 GS, 03:00 GS, 06:00 GS, 09:00 GS, ve 12:00 GS için IRI-Plas modeli ile hesaplanan elektron yoğunluğu grafikleri Şekil 2.1'de verilmektedir.



Şekil 2.1. Ankara'da 21 Haziran 2015 tarihinde 00:00 GS, 03:00 GS, 06:00 GS, 09:00 GS, ve 12:00 GS için elektron yoğunluğu.

İyonkürede elektronların yanı sıra iyonlar da bulunmaktadır. İyonlar yaklaşık olarak elektrona göre 2.000 ila 60.000 kat daha ağır olduğundan iyonların hareketinin iyonküredeki dalga yayılımına olan etkisi ihmal edilmektedir [1].

Elektronun kütlesi  $m$ , hızı  $\vec{v}$ , yükü  $e$ , sönümlenme kuvveti  $\nu$  ile ifade edildiğinde,  $\vec{B}$  manyetik akı yoğunluğuna maruz kalan bir plazmada, elektronun hareket denklemi,

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = e\vec{E} + e \left[ \vec{v} \times \vec{B} \right] - m\nu\vec{v} \quad (2.1)$$

olarak verilmektedir. İyonküre yerkürenin manyetik alanına maruz kalan bir plazmadır. Manyetik alan  $\vec{B}$

$$\vec{B} = \mu_o \vec{H} \quad (2.2)$$

olarak yazıldığında, elektronun manyetik alan vektörüne dik düzlemdeki dönme

frekansı  $\omega_h$ ,

$$\omega_h^2 = \frac{|e|\mu_o H}{m} \quad (2.3)$$

olarak ifade edilmektedir. Eş. 2.2'de verilen  $\mu_o$  manyetik geçirgenlik katsayısıdır.

İyonküre içinde oluşan indüklenme akımı  $\vec{J}$

$$\vec{J} = eN_e\vec{v} \quad (2.4)$$

olarak verildiğinde ve hareket denkleminin fazör uzamındaki ifadesi kullanıldığında

$$\vec{J} = \frac{N_e e^2}{j\omega m} \vec{E} \quad (2.5)$$

yazılabilmektedir.  $\omega$  frekansı ifade etmektedir. Maxwell denklemlerinden hareket ile

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega\epsilon_o\vec{E} + \vec{J} \quad (2.6)$$

denkleminde indüklenme akımı ifadesi kullanıldığında

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega\epsilon_o \left(1 - \frac{N_e e^2}{\omega^2 m \epsilon_o}\right) \vec{E} \quad (2.7)$$

yazılabilmektedir. Eş. 2.7'e göre plazma frekansı  $\omega_p$

$$\omega_p^2 = \frac{N_e e^2}{m \epsilon_o} \vec{E} \quad (2.8)$$

olarak ifade edilmektedir.

İyonkürenin diğer parametresi kritik frekanstır. Kritik frekans iyonküreden yansıyabilecek bir dalganın sahip olabileceği en büyük frekans değeri olarak ta-

nımlanmaktadır. Bu değerden daha büyük frekansta olan dalgalar iyonküreden yansımayıp kırılarak yollarına devam etmektedirler. Kritik frekans  $f_c$  en büyük elektron yoğunluğu  $N_m$  değerine bağlı olup,

$$f_c = 9\sqrt{N_m} \quad (2.9)$$

ifadesi ile verilmektedir. Dalganın  $\psi_i$  yükseliş açısı ile iyonküreye geldiği durumda

$$f_c = 9\sqrt{N_m} \sec \psi_i \quad (2.10)$$

olarak ifade edilen kritik frekans En büyük Kullanılabilir Frekans (EKF) olarak tanımlanmaktadır. İyonkürenin bir diğer önemli parametresi Toplam Elektron İçeriği (TEİ)'dir. Bir sinyal yolu boyunca, bir metre kare kesit alanı olan bir silindir içindeki toplam serbest elektron miktarını ifade etmektedir. Matematiksel olarak  $L$  yolu boyunca, elektron yoğunluğunun

$$\text{TEİ} = \int_L N_e dl \quad (2.11)$$

çizgi integrali ile tanımlanmaktadır. TEİ'nin birimi TECU'dur.  $10^{16} \text{ el}/\text{m}^2$ , 1 TECU olarak tanımlanmaktadır. TEİ yaygın olarak YKS kullanılarak kestirilmekte ve elde edilen veriler GIM-TEİ olarak yayınlanmaktadır. TEİ iki kavram ile verilebilmektedir. Alıcı ile uydu arasındaki eğik hat üzerinden elde edilen TEİ, Eğik doğrultuda Toplam Elektron İçeriği (ETEİ), bu eğik hattın alıcıya göre dik doğrultudaki izdüşümü için hesaplanan TEİ ise Dik doğrultuda Toplam Elektron İçeriği (VTEC) olarak tanımlanmaktadır. YKS alıcıları maliyet açısından etkin oldukları, yerküre üzerinde geniş alanlarda yayılmaları ve sürekli çalışmaları sayesinde TEİ kestiriminde YKS alıcılarından faydalanılmaktadır. Teorik ve ampirik modellerin yanı sıra TEİ kestirimi için yer tabanlı ve uydu tabanlı çeşitli teknikler bulunmaktadır. Yaygın olarak uluslararası analiz merkezleri (IGS - International GNSS Service) tarafından YKS ile yapılan TEİ kestirimleri Yerküresel İyonküre

Haritaları (GIM - Global Ionospheric Maps) olarak yayınlanmaktadır. GIM-TEİ haritaları gereken aradeğerleme işlemleri sonucunda  $2.5^\circ$  enlem ve  $5^\circ$  boylam çözünürlüğünde, saatte ya da iki saatte bir olacak şekilde üretilmektedir. Bu haritalara internet üzerinden IONosphere Map EXchange Format (IONEX) dosya formatında erişilebilmektedir. IONOLAB-RAY ile bu formattaki IGS tarafından sağlanan bu dosyalar <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products> adresinden otomatik olarak indirilmekte ve kullanıcı tanımlı 3B iyonküre modeli çözünürlüğüne ve girilen zaman uygun olacak şekilde aradeğerleme yapılarak kullanılmaktadır.

İyonküre elektron yoğunluğuna bağlı olarak üç temel katmana ayrılmaktadır. Bu katmanlar D, E ve F katmanlarıdır [1, 2, 5].

İyonkürenin D katmanı havakürenin yaklaşık 60 km ile 90 km arasında kalan ve iyonlaşma miktarının en az olduğu katmandır. Güneşin doğması ile yerküreye gelen yüksek enerjili X ışınlarının etkisiyle havakürenin bu kısmında iyonlaşma başlamakta ve D katmanı oluşmaktadır. Gece saatlerinde güneşten gelen ışınların kesilmesi ile D katmanının belirginliği kaybolmaktadır. Yaklaşık 1 MHz'e kadar frekanslardaki dalgalar üzerinde yansıtma, daha kısa dalga dalgalar üzerinde soğurma etkisi göstermektedir. Soğurma etkisinin sebebi elektromanyetik dalganın serbest elektronları uyarması ile havaküredeki moleküllerin çarpışması sonucundaki enerji kaybıdır.

İyonkürenin yeryüzüne göre 90 km ile 150 km yükseklik arasında kalan kısmı E katmanı olarak adlandırılmaktadır. Bu katman düşük enerjili X ışınlarının etkisi ile meydana gelmektedir. Soğurma etkisi D katmanına göre daha azdır. Yaklaşık 20 MHz frekansına kadar olan dalgaları kırmaktadır. Yüksek iyonlaşmanın olduğu kısımlarda düzensiz E katmanı oluşumu meydana gelmektedir.

Yeryüzüne göre 150 km yükseklik sonrasında iyonkürenin üst sınırına kadar olan havaküre tabakası F katmanı olarak adlandırılmaktadır. Bu katman güneşin mor ötesi ışınlarının etkisi ile oluşmaktadır. Gece boyunca tek bir kat-



man halinde olan F katmanı gündüz F1 ve F2 olarak isimlendirilen iki katmana ayrılmaktadır. İyonlaşma miktarının en fazla olduğu katman F2 katmanıdır. F katmanı kısa dalga bandındaki dalgaları yansıtmakta ve yerküre üzerinde uzak mesafe haberleşmeye olanak sağlamaktadır. F2 katmanındaki en yüksek elektron yoğunluğu NmF2, kritik frekansı foF2, iyonlaşmanın en fazla olduğu yükseklik ise hmF2 olarak ifade edilmektedir.

İyonkürenin özellikleri yerkürenin enlemlerine göre değişim göstermektedir. Buna göre, ekvatorial, orta enlem ve yüksek enlem olmak üzere üç enlem bölgesinde iyonkürenin özellikleri incelenmektedir. İyonkürenin en yüksek elektron yoğunluğuna sahip olduğu bölge ekvatorial enlem bölgesi olmaktadır. Güneşin yüksek radyasyon seviyesi ve yerkürenin manyetik alanı ile elektronlar ekvatorial bölgeye doğru hareket ederler. Ekvatorial bölgedeki elektron yoğunluğunun yükselmesine neden olan bu durum ekvatorial anomali olarak adlandırılır. Yüksek enlem bölgesinde güneş ışımalarının yanı sıra havaküredeki parçacıkların birbiri ile çarpışmaları sonucunda da iyonlaşma meydana gelmektedir. Orta enlem bölgesinde iyonküre daha az değişim gösteren bir yapıya sahiptir. Bu nedenle iyonküre ile ilgili çalışmalar için ihtiyaç duyulan sistemler daha çok yerkürenin orta enlem bölgelerine yerleştirilmektedir.

Güneşin etkisi ile günün saatlerinde ve yılın mevsimlerinde iyonkürede değişim gözlenmektedir. Bunun yanı sıra güneş lekeleri sayısının da iyonküre üzerinde etkisi bulunmaktadır. Güneş lekeleri sayısı 11 yıllık periyotla değişim gösterdiğinden iyonküre üzerinde yarattığı etki 11 yıllık periyoda sahip olmaktadır.

İyonkürede değişikliğe neden olan bir diğer etki iyonküre fırtınalarıdır. İyonkürenin fırtınalı olması yerkürenin manyetik alanındaki bozulmalardan kaynaklanmaktadır. Güneş patlamaları ya da kütle kopmaları bu bozulmaları yaratmaktadır. İyonküre fırtınalarında öncelikli olarak F2 katmanı etkilenmektedir. Fırtınanın şiddetine göre etki daha alt katmanlara da ilerleyebilmektedir. İyonkürede fırtına olması durumu Kp ve Dst indisleri ile değerlendirilebilmektedir. Kp indisi, yerkürenin manyetik alanının yatay bileşenlerindeki bozulmayı sayısal olarak

ifade eden, 0 ile 9 aralığında tam sayı değerleri alabilen bir indistir. Dst indisi ise yerkürenin manyetik alanındaki düzensizliğin doğrudan ölçüsüdür. Negatif değer alması manyetik alanın zayıflaması anlamına gelmektedir ki bu da güneş fırtınaları sırasında meydana gelmektedir. Kp indisinin 4'den büyük ve Dst indisinin -20'den küçük değer alması halinde fırtınalı iyonküre değerlendirmesi yapılabilmektedir.

Ayrıca beklenmedik şekilde ani iyonküre bozulmaları da meydana gelebilmekte ve bu bozulmalar kestirilemeyen bir süre devam edebilmektedir. Bunların yanı sıra havaküredeki bazı hava akımları ve rüzgarlar iyonküredeki elektron ve iyonların da hareket etmesine sebep olabilmektedir.

İyonkürenin bu özellikleri göz önünde bulundurulduğunda, dalganın iyonkürede yayıldığı uygulamalarda iyonküre modelinin zamana ve konuma bağlı mevcut iyonküreyi yansıtmasının önemi anlaşılmaktadır. Özellikle iyonkürenin yapısında değişim yaratan fırtınalı durumlarda bu önem daha da artmaktadır. Bu tez kapsamında geliştirilen modelde iyonküre parametreleri zamana ve konuma göre hesaplanmaktadır. Kullanılan IRI-Plas yazılımı, iyonkürenin ölçüme dayalı verileri ile beslenebilmekte; böylece özellikle fırtınalı iyonküre koşullarında hesaplanan değerler mevcut iyonküreyi daha iyi yansıtacak şekilde güncellenmektedir.

Elektromanyetik dalganın iyonküredeki yayılımının modellenmesi kapsamında iyonküre soğuk plazma olarak kabul edilebilmektedir. Bu kabul ile elektronların termal hızları ihmal edilmektedir. Ancak elektronların çarpışması elektromanyetik dalga yayılımı üzerinde etkili olmaktadır ve ihmal edilmemelidir [1]. Bu tez kapsamında geliştirilen dalga yayılım modelinde de iyonküre soğuk plazma olarak kabul edilmekte; bununla birlikte elektron çarpışma etkisi modellere yansıtılmaktadır. Soğuk plazma yaklaşımı ile elektron ve iyonların termal hızları ihmal edilmektedir.

İyonküre, yerkürenin manyetik alanının etkisi ile yön bağımlı bir ortam haline

gelmektedir. Elektronların bulunduğu bir ortam manyetik alana maruz kaldığında elektronların hareket yön ve hızları manyetik alana bağlı olarak değişim göstermektedir. İyonkürede elektron dönme frekansı, yerkürenin manyetik alanının bir fonksiyonudur. Bu etkiyle iyonkürenin ortam özelliği yerkürenin manyetik alanına bağlı olduğundan iyonküre yönbağımlı olarak nitelendirilmektedir.

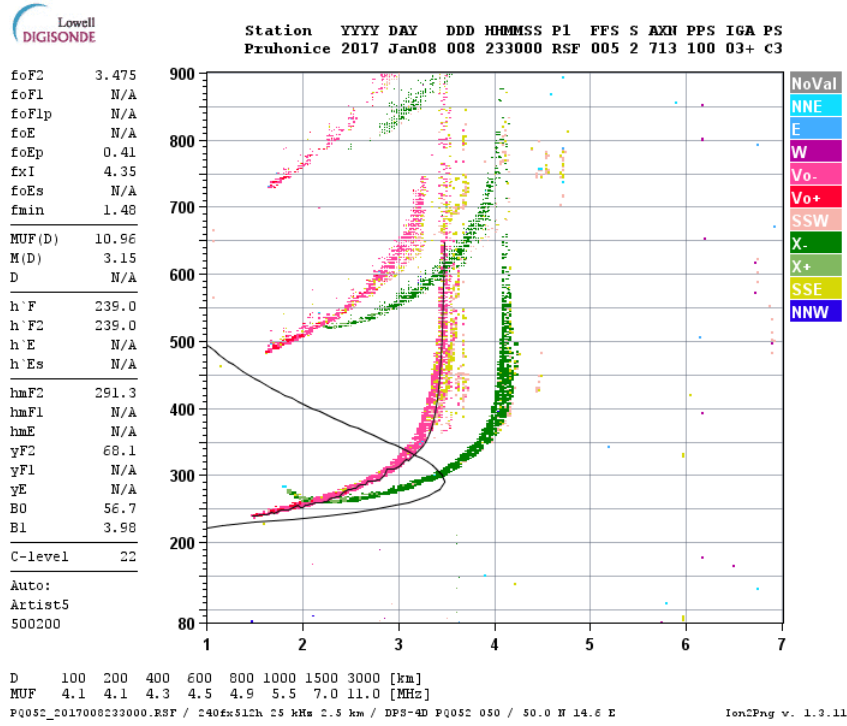
İyonkürenin yön bağımlı olması sebebiyle iyonküreye giren bir dalga 'sıradan' ve 'sıradışı' olarak isimlendirilen iki dalgaya ayrılarak yoluna devam etmektedir. Bu tez kapsamında geliştirilen dalga yayılım modelinde sıradan ve sıradışı dalganın izlediği yol ve dalga parametreleri hesaplanmaktadır. Bu konu iyonkürede dalga yayılımı uygulamaları için önem taşımaktadır.

## **2.2 İyonosonda ve İyonogram**

İyonosondalar iyonküreyi incelemek için geliştirilen özel radarlardır. KD bandında haberleşme ve yayınların yapılabilmesi için en uygun yayın frekanslarının bulunması için kullanılmaktadır. İyonosondalar frekansları tipik olarak 1 - 20 MHz arasındaki KD bandındaki darbeleri iyonküreye yollayarak, geri dönen darbelerin yol alma sürelerine dayanarak iyonküredeki elektron dağılımını hesaplamayı amaçlamaktadır. EM dalgaların iyonküredeki yayılma hızı ve yansıma yüksekliği frekansa bağlı olarak değişmektedir. Farklı frekanslarda elde edilen veriler kullanılarak, yüksekliğe bağlı elektron dağılımı profili kestirmek mümkün olmaktadır. Dijital tasarım, kontrol ve sinyal işleme bileşenlerine sahip modern iyonosondalar 'dijisonda' olarak isimlendirilmektedir.

İyonogramlar iyonosondalar tarafından türetilen verileri gösteren grafiklerdir. İyonogramlarda her bir frekans adımına karşılık elde edilen sanal yansıma yükseklikleri çizdirilmektedir. Ayrıca, sanal yansıma yüksekliği verileri elektron yoğunluğu profiline dönüştürülerek iyonogram üzerinde verilmektedir. Yansıma yükseklikleri sıradan ve sıradışı dalgalar için ayırt edilerek gösterilmektedir. Ayrıca yeryüzüne dönen dalgaların yeryüzünden yansiyarak iyonküreye gitmesi ve orada tekrar yansıması ile elde edilen sonuçlar da iyonogramlara yansımak-

tadır. İyonosondanın başucu yönünde gönderilen ve alınan darbeler ile elde edilen çıktılar dikey iyonogram olarak ifade edilmektedir. Bunun yanı sıra farklı iyonosondadan yayınlanan ancak iyonküreden yansıdıktan sonra açılı bir şekilde alıcı iyonosondaya gelen sinyaller de iyonograma işaretlenmektedir. Bu işaretler açılı iyonogramı meydana getirmektedir. İyonosonda tarafından algılanan bu sinyaller çeşitli yöntemlerle ayrıştırılarak farklı renklerde gösterilmektedir. Örnek bir iyonogram Şekil 2.2'de verilmektedir.



Şekil 2.2. Pruhonice'de bulunan dijisonda ile 8 Ocak 2017 tarihi saat 23:00 GS için elde edilen iyonogram.

### 2.3 IRI-Plas

İyonkürenin fiziksel yapısı çeşitli parametreler ile ifade edilmekte ve bu parametrelerin değerlerinin hesaplanmasında analitik ya da amprik modellere dayanan araçlar geliştirilmektedir. Bu tez kapsamında, ışın izlemenin etkin olarak uygulanabilmesi için kırılma indisinin iyonkürenin özelliklerini yansıtacak parametreler üzerinden hesaplanması gerekmektedir. Bunun için Eş. 3.46 ve Eş. 3.47'de verilen Appleton-Hartree eşitliği tüm parametreleri ile birlikte kullanılır.

maktadır. İhtiyaç duyulan bu parametre değerlerinin verilen zaman ve konum için kullanıcı tarafından modele girdi olarak sağlanması uygulanamayacak kadar zordur. Bu nedenle tez kapsamında geliştirilen IONOLAB-RAY algoritmasında iyonküre parametrelerinin hesaplanması için IRI-Plas yazılım aracı gömülü olarak kullanılmaktadır.

IRI-Plas yazılımı IRI yazılımının genişletilmesi ile türetilmiştir. IRI kısaltması Uluslararası Referans İyonküre IRI ve IRI-Plas, uluslararası standardizasyon Kurumu (ISO - International Standardization Organization) tarafından IRI ve IRI-Plas yazılımlarını iyonküre ve plazmaküre parametrelerinin hesaplanmasına yönelik standart yazılımlar olarak önerilmektedir [36].

IRI modeli, Uzay Araştırma Komitesi (COSPAR) ve Uluslararası Radyo Bilimi Birliği (URSI) sponsorluğunda geliştirilmiştir [30–34]. IRI modeli ampirik ve iklimsel bir modeldir. IRI modeli verileri, Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS) uydularından, yerküresel iyonosonda ağından ve geri saçılımlı radarlardan sağlanmaktadır. IRI, belirlenen zaman ve konum için yerel koordinatlarda dik eksen doğrultusunda, 50 km ile 2.000 km aralığında 50 km çözünürlükle, saatlik ortalama elektron yoğunluğu ( $N_e$ ), iyon bileşenlerin yoğunluğu ( $O^+$ ,  $H^+$ ,  $N^+$ ,  $He^+$ ,  $O_2^+$ ,  $NO^+$ ), iyon ve elektron sıcaklığı ile toplam elektron içeriğini hesaplamaktadır.

IRI-Plas, IRI modeline iyonkürenin 20.200 km yüksekliğine kadar olan plazma kısmının da dahil edilmesi ile ortaya çıkmıştır. Kullanıcı tarafından ilgili tarih ve zaman için ölçüme dayalı TEİ veri girişi imkanı sağlamaktadır. Kullanıcı tarafından girilen bu veriler IRI-Plas içindeki modellere beslenebilmekte ve böylece mevcut iyonküreyi daha iyi yansıtan parametre değerleri çıktı olarak sunulabilmektedir. Özellikle fırtınalı iyonkürenin modellenmesinde bu imkan büyük önem taşımaktadır. IRI-Plas'ın standart yükseklik çözünürlüğü, 80 km'den 500 km'ye 20'şer km, 500 km'den 1000 km'ye 50'şer km, 1.000 km'den 2000 km'ye 200'er km, 2.000 km'den 3.000 km'ye 500'er km, 3.000 km'den 10.000 km'ye 2.000'er km, 10.000 km'den 20.000 km'ye 2.000'er km ve 20.000'den

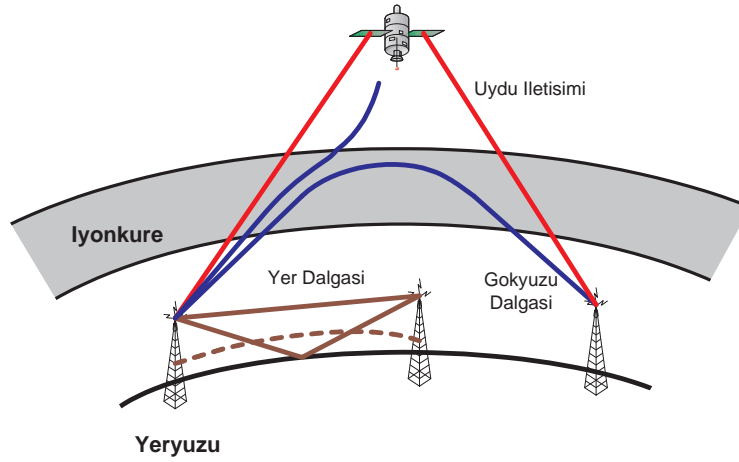
20.200 km'ye 200 km adımlar ile verilmektedir. IRI-Plas standart çözünürlüğünden daha yüksek çözünürlükte aradeğerleme yaparak çalışmaktadır. Bu tez kapsamında IRI-Plas'ın bu aradeğerleme özelliğinden faydalanılmaktadır. Aradeğerleme sebebiyle beklenmedik verilerin modele gelmesi halinde kullanıcıya bu durum ile ilgili uyarı mesajı iletilmekte ve çözünürlüğü düşürmesi önerilmektedir.

## **2.4 İyonkürede Dalga Yayılımı Uygulamaları**

KD bandında dalga yayılım ortamı iyonküredir. EM spektrumda 3 - 30 MHz frekans aralığı KD bandı olarak tanımlanmaktadır. Bu frekans aralığı dalga boyu cinsinden 10 - 100 m aralığına karşılık gelmektedir. Bu tez kapsamında geliştirilen dalga yayılım modelinin asıl kullanım amacı KD bandında dalga yayılımının modellenmesi ve KD bandında haberleşmeye girdi olacak dalga parametrelerinin hesaplanmasıdır. Bu amacın yanı sıra geliştirilen model uydu haberleşmesi, YKS, ufuk ötesi radarlar ve yön bulma gibi önemli uygulamalara da katkı sağlayabilecektir.

Yeryüzündeki bir kaynaktan çıkıp iyonkürede yol alan ve sonrasında yansıyarak yeryüzüne dönen dalga gökyüzü dalgası olarak isimlendirilmektedir. Gökyüzü dalgası KD bandında 30 MHz'e yaklaştıkça iyonkürenin o anki durumuna da bağlı olarak yeryüzüne geri dönmeyip; iyonkürede kırılmalara uğrayarak uzaya doğru yoluna devam edebilmektedir. Gökyüzü dalgasının yanı sıra haberleşmede yer dalgası ve uydu haberleşmesinde de kullanılmaktadır. Bu dalga yayılım tipleri Şekil 2.3'de gösterilmektedir. Yeryüzü ile iyonküre arasında yol alan dalgalara yer dalgası denilmektedir. Yer dalgası kaynaktan alıcıya görüş doğrultusu boyunca doğrudan gelen, yeryüzünden ya da yeryüzündeki yapılardan yansıyarak gelen ve yüzey dalgası olarak gelen dalgaların bileşiminden oluşabilmektedir. Yüzey dalgası Şekil 2.3'te kesik çizgi olarak gösterilmektedir. Yüzey dalgası, yerkürede indüklenen akımlar sayesinde yeryüzünü takip ederek yol alan dalgadır. Şekil 2.3'te gösterildiği üzere, uydu haberleşmesinde yeryüzündeki kaynaktan çıkan dalga iyonkürede yol almakta ve sonrasında uyduya

ulaşmaktadır. Uydudan yayınlanan dalga da yeryüzüne ulaşana kadar iyonkü-  
renin etkisine maruz kalmaktadır. Santimetre dalga bandının (3 - 30 GHz, 1  
- 10 cm) çeşitli alt bantlarında YKS ve uydu haberleşmesi için dalga yayılımı  
kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında geliştirilen dalga yayılım modeli, 20.200  
km'ye kadar iyonküre ve plazmaküre modellerini kapsamaktadır. Kullanılan bu  
modeller santimetre dalga bandında da geçerliliğini korumaktadır. Bu sayede  
gökyüzü dalgalarının yanı sıra uydu haberleşmesinde yayılan dalga üzerinde  
iyonküre ve plazmakürenin etkilerinin hesaplanmasına imkan sağlamaktadır.



Şekil 2.3. Dalga yayılım tipleri.

KD bandında haberleşme uygulamalarında yayılan dalga iyonkürenin yapısı  
gereği çeşitli etkiler altında kalabilmektedir. Bu etkilerin kanal modellerinde ve  
sinyal işleme tekniklerinde göz önünde bulundurulması haberleşmenin başa-  
rımı için önemli olmaktadır. İyonkürede yayılan bir dalga temel olarak emilime,  
zayıflamaya, kırılmaya, yansımaya, zaman gecikmesine, faz kaymasına, çoklu  
yola maruz kalmaktadır. Bu tez kapsamında geliştirilen IONOLAB-RAY algo-  
ritması ile dalganın sıradan ve sıradışı dalgaya ayrılması ve farklı yolları takip  
etmesi modellenmektedir ve bu modeller Bölüm 5'de anlatılmaktadır. Dalganın  
iyonkürede kırılması ve yansımaları, kırılma indisine bağlı olarak Snell yasası

ile modellenmekte ve bu modeller Bölüm 3'de açıklanmaktadır. Dalganın zaman gecikmesi, faz dönmesi, faz hızı, grup hızı ve zayıflaması gibi özellikleri IONOLAB-RAY'in bu tez kapsamında geliştirilen ilgili modülleri ile hesaplanabilmektedir. Bu modüller ile ilgili bilgiler Bölüm 6'te verilmektedir.

İyonkürenin yön bağımlı yapısı nedeniyle iyonküreye giren dalga sıradan ve sıradışı dalga olarak ikiye ayrıldığında, bu iki dalga farklı yollardan yayılmaya devam etmektedir. Sıradan ve sıradışı dalganın her ikisi uzaya gidebilmekte; biri yeryüzüne dönerken diğeri uzaya gidebilmekte ya da her ikisi de yeryüzüne dönebilmektedir. Her iki dalganın yeryüzüne döndüğü durumda, sıradan ve sıradışı dalga iyonkürenin o zamanki fiziksel yapısına bağlı olarak, farklı yollar üzerinden ilerleyebilmektedir. Bu durumda bu dalga bileşenleri farklı zaman gecikmesine, farklı zayıflamaya, farklı hızlara ve farklı faz kaymalarına sahip olarak alıcıya ulaşmaktadırlar. Bu durum çoklu yol olarak tanımlanmaktadır ve alıcı tarafından kaynaktan gönderilen sinyalin doğru anlaşılabilmesi için çözülmesi gereken bir problem teşkil etmektedir.

Dalganın iyonküreye girdikten sonra sıradan ve sıradışı dalga olarak yayılmasından kaynaklı olarak yeryüzüne dönen toplam dalganın kutuplanmasında dönme meydana gelmektedir. Belli bir doğrusal kutuplanma ile kaynaktan çıkan dalga iyonküreye girdiğinde ikiye ayrıldığında, sıradan ve sıradışı dalga birbirine ters yönde dairesel kutuplanma ile yol almaya devam etmektedir. Bu iki dalganın iyonkürede aldıkları yol ve geçirdikleri süre farklı olduğundan yeryüzüne döndüklerinde ve alıcıda toplandıklarında elde edilen toplam dalganın kutuplanması kaynaktan çıkan dalganın kutuplanmasında farklı olmaktadır. İyonküreden kaynaklanan bu kutuplanma farkı Faraday dönmesi olarak isimlendirilmektedir. Kaynaktan çıkan dalganın alıcıda uygun şekilde işlenebilmesi için alıcının Faraday dönmesi etkisindeki dalgaya uyumlanması gerekmektedir.

Sönümlenme, alıcıdaki sinyalin büyüklüğünün iyonküredeki değişimler sebebiyle dalgalanmasıdır. Fırtınalı iyonküre koşullarında sönümlenmenin olumsuz etkileri artmaktadır. Çoklu yol koşullarında dalgaların büyüklükleri, izledikleri



yolların uzunluklarına ve yol aldıkları iyonküre içindeki değişimler sebebiyle farklı oranlarda değişim göstermektedir. Bu sebeplerle alıcıda devamlı sabit büyüklükte sinyal elde etmek çok zordur. Sinyal büyüklüğündeki dalgalanma sırasında sinyali tamamen kaybetmemek için yüksek güçlü vericiler kullanılmaktadır. Ancak özellikle ufuk ötesi radarlar ile ilgili uygulamalar açısından daha verimli çözümler adapte edilmesi gerekmektedir.

Bölüm 3'de ışın izleme yaklaşımları ve bu tez kapsamında uygulanan modeller anlatılmaktadır.

### 3. IŞIN İZLEME

KD bandında haberleşmede gönderilen ve alınan sinyal elektromanyetik dalgadır. Yayılan elektromanyetik dalganın büyüklüğü ve yönü, zamana ve konuma bağlı olarak, dalga denkleminin çözümü ile hesaplanabilmektedir. Dalga denkleminin çözümü, dalganın yayıldığı ortamın yapısı karmaşıklıktıkça zorlaşmaktadır. İyonküre, zamana göre değişkenliği, düzgün dağılmaması ve yön bağımlılığı ile, dalganın yayılabileceği en karmaşık ortamlardan biridir. İyonküre ortamında analitik ya da nümerik yöntemlerle dalga denklemini çözmek zorlu bir problem teşkil etmekte ve bu probleme çeşitli yaklaşımlarla çözüm aranmaktadır.

KD bandındaki dalganın iyonküredeki yayılımının modellenmesinde uygulanan yaklaşımlardan en yaygın olanı ışın izlemedir. Fizikte ışın izleme değişken emilim özelliklerine, yansıma yüzeylerine ve yayılım hızlarına sahip bölgelerden oluşan bir sistem içinde dalganın ya da parçacıkların ilerleme yolunu hesaplamak için kullanılan bir yöntemdir. Işın izleme bir geometrik optik yaklaşımıdır. Geometrik optik yaklaşımı, ortamdaki düzensizliklerin değişim boyutunun yayılan dalganın dalgaboyuna göre çok büyük olması halinde geçerli olmaktadır.

Kaynaktan yayınlanan dalga iyonküreye geldiğinde, iyonkürenin yön bağımlı olması özelliğinin etkisi ile sıradan ve sıradışı dalga olmak üzere ikiye ayrılmakta ve yoluna iki ayrı dalga olarak devam etmektedir [1]. Sıradan ve sıradışı dalga iyonküre içinde farklı yollar izleyebilmekte, farklı yüksekliklerden yansıyarak yeryüzünde farklı sürelerle farklı konumlara ulaşabilmektedir. Bu tez kapsamında geliştirilen dalga yayılım modelinde kırılma indisinin hesaplanmasında Appleton-Hartree formülünün kullanılması sayesinde iyonkürenin yön bağımlılığı hesaba katılmakta ve böylece sıradan ve sıradışı dalga için dalga yayılımı ayrı ayrı hesaplanabilmektedir.

Dalga denkleminin iyonküre ortamında doğrudan çözülmesindeki zorluk nedeniyle çeşitli yaklaşımlar uygulanmakta ve farklı zorluk seviyesinde denklemler

türetilmektedir. Dalganın iyonkürede yayılımı söz konusu olduğunda uygulanan yaklaşımların iyonkürenin yapısı ile uyumlu olması gerekmektedir. Dalga denkleminin çözülebilir zorluk seviyesine gelmesi için yapılan yaklaşımlar ve elde edilen denklemler Bölüm 3.1’de verilmektedir. Bölüm 3.2’de bu tez kapsamında uygulanan yöntem olan Snell Yasası ile ışın izleme yaklaşımı anlatılmaktadır. Snell Yasası ile ışın izlemenin en önemli parametresi kırılma indisidir. Dalga yayılımı için uygulanan ışın izleme yaklaşımlarının karşılığında kırılma indisinin, iyonkürenin fiziksel yapısını yansıtacak şekilde hesaplanması önem kazanmaktadır. Bu tez kapsamında geliştirilen dalga yayılım modelinde kırılma indisinin hesaplanması Bölüm 3.3’de açıklanmaktadır.

Bu bölümde verilen bilgiler ve denklemler [1–5, 63, 64] kaynaklarından derlenmiştir.

### **3.1 Işın İzleme Yaklaşımları**

Bu bölümde dalga denkleminde başlayarak uygulanan yaklaşımlar ve bu yaklaşımlar ile elde edilen denklemler anlatılmaktadır. Elde edilen denklemlerin iyonkürede dalga yayılımına uygulanması ile ilgili değerlendirmeler yapılmaktadır.

#### **3.1.1 Dalga Denklemi**

Dalga denklemi Maxwell denklemlerinden türetilen matematiksel ifadedir. Elektrik ve manyetik alanı elde edebilmek için iyonküre ortamında dalga denkleminin çözülmesi gerekmektedir. Kaynağın bulunmadığı kayıplı bir ortamda dalga denkleminin fazör gösterimi

$$\nabla^2 \vec{E} - \gamma^2 \vec{E} = 0 \quad (3.1)$$

şeklinde yazılabilir. Eş. 3.1'de,  $\vec{E}$  elektrik alan vektörünü ifade etmektedir.  $\gamma$  ifadesi

$$\gamma = jk \quad (3.2)$$

olarak tanımlanmaktadır. Eş. 3.2'de  $k$  dalga sayısını ifade etmektedir. Dalga sayısı ile, kırılma indisi arasında

$$k = k_o n_c \quad (3.3)$$

$$k_o = \omega \sqrt{\epsilon_o \mu_o} = \omega / c \quad (3.4)$$

ile verilen bağıntılar bulunmaktadır. Eş. 3.3'de,  $n_c$  karmaşık kırılma indisini, Eş. 3.4'de  $\epsilon_o$  serbest uzaydaki elektrik geçirgenliği,  $\mu_o$  serbest uzaydaki manyetik geçirgenliği ve  $c$  dalganın serbest uzaydaki hızı göstermektedir. Karmaşık kırılma indisinin gerçel ve sanal bileşenleri

$$n_c = n' - jn'' \quad (3.5)$$

olarak yazılmaktadır. Eş. 3.2 ve Eş. 3.3 kullanılarak Eş. 3.1 yeniden düzenlendiğinde

$$\nabla^2 \vec{E} - k_o^2 n_c^2 \vec{E} = 0 \quad (3.6)$$

elde edilmektedir [64].

Dalga denkleminin düzlem dalga için çözümü

$$\vec{E} = \vec{E}_o \exp(-\gamma \hat{a}_k \cdot \vec{r}) \quad (3.7)$$

veya

$$\vec{E} = \vec{E}_o \exp(-jk_o n_c \hat{a}_k \cdot \vec{r}) \quad (3.8)$$

formunda olmaktadır. Eş. 3.7 ve Eş. 3.8'de verilen  $\hat{a}_k$  dalgaının yayılım yönünü gösteren ve dalga cephesine dik olan birim vektörü ve  $\vec{r}$  konum vektörünü ifade etmektedir.

İyonküre gibi yönbağımlı ortamlar için ise Maxwell denklemlerinden hareketle aşağıdaki ifadeler çıkarılmaktadır.

$$-j\vec{k} \times \vec{E} = -j\omega\vec{B} \quad (3.9)$$

$$-j\vec{k} \times \vec{H} = j\omega\vec{D} \quad (3.10)$$

$$\vec{B} = \mu_o\vec{H} \quad (3.11)$$

$$\vec{D} = \epsilon_o\bar{\epsilon}_r\vec{E} \quad (3.12)$$

Eş. 3.9 - Eş. 3.12'de verilen denklemlerde gerekli işlemler yapıldığında,

$$\vec{k} \times \vec{k} \times \vec{E} + \omega^2\mu_o\epsilon_o\bar{\epsilon}_r\vec{E} = 0 \quad (3.13)$$

elde edilmektedir. Eş. 3.13'de, Eş. 3.14 ve Eş. 3.15 uygulandığında

$$\vec{k} \times \vec{k} \times \vec{E} = \vec{k}(\vec{k} \cdot \vec{E}) - (\vec{k} \cdot \vec{k})\vec{E} \quad (3.14)$$

$$\vec{k} = k_x\hat{x} + k_y\hat{y} + k_z\hat{z} \quad (3.15)$$

Eş. 3.16 elde edilmektedir.

$$\{KK^T - k^2[1] + k_o^2\bar{\epsilon}_r\}[E] = 0 \quad (3.16)$$

Eş. 3.16 yönbağımlı ortamlar için temel matris denklemleri olarak tanımlanmaktadır. Denklemden, [1] 3x3'lük birim matrisi,  $k$ ,  $\vec{k}$  vektörünün büyüklüğünü gös-

termektedir.  $[E]$  ve  $K$ ,

$$[E] = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_z \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

olarak verilmektedir.

Bir ortamın kırılma indisi, dalganın serbest uzaydaki hızının, dalganın o ortamdaki hızına oranıdır. Kırılma indisi kayıpsız ortamlarda gerçel, kayıplı ortamlarda karmaşık sayı değerleri almaktadır. Kırılma indisi ortamın tamamında sabit olabileceği gibi çeşitli parametrelerin fonksiyonu da olabilmektedir. İyonkürde kırılma indisi zamanın, içinde yayılan dalganın frekansının, üç boyutta konumun, yerkürenin manyetik alanının büyüklüğünün ve yönünün ve elektron yoğunluğunun fonksiyonudur. Maxwell denklemlerinden türetilen yukarıdaki ifadeler incelendiğinde iyonküre gibi yönbağımlı ve kayıplı ortamlarda gerek analitik, gerekse nümerik yöntemler dalga denklemini doğrudan çözme konusunda yetersiz kalmaktadır.

Dalga denklemi, iyonküre ortamında analitik olarak bir takım kabuller altında çözülebilmektedir. Nümerik yöntemlerin uygulanması ile daha genel durumlar için çözümler elde etmek mümkündür [46–48, 65]. Dalga denkleminin iyonkürede çözümünde Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ve Zaman Uzamında Sonlu Farklar (ZUSF) yöntemi gibi çeşitli nümerik yöntemler kullanılmakta, gelen ve yansıyan dalganın ayırt edilebilmesi için ise Ayrık Fourier Dönüşümü (AFD) uygulanmaktadır [50, 66]. Ancak bu çözümler de işlem yükü olarak maliyetli olmaktadır. Bu nedenle literatürde iyonkürenin ve KD bandının özelliklerinden faydalanılarak çeşitli yaklaşımların yapılması ile çözümler geliştirilmeye çalışılmaktadır.

### 3.1.2 Eikonal Denklemi

Kırılma indisinin değişim gösterdiği ortamlarda dalga denkleminin doğrudan çözümleri zordur. Bunun için bir takım yaklaşımlarda bulunulması ihtiyacı doğmaktadır. Eikonal denklemi, dalga denkleminde, kırılma indisinin konuma göre değişiminin yavaş olduğu kabulünün uygulanması ile elde edilen denklemdir. Fiziksel dalga ile geometrik optik yaklaşımı arasındaki geçişin ilk adımı sayılmaktadır [1].

Kırılma indisinin konuma göre değişim gösterdiği durumda Eş. 3.8

$$\vec{E} = \vec{E}_o(x, y, z) \exp[-jk_o S(x, y, z)] \quad (3.19)$$

haline gelmektedir. Eş. 3.19'de,  $\vec{E}_o(x, y, z)$ , büyüklüğü  $E_o$ , yönü elektrik alanının yönü olan konuma bağlı vektör ve  $S(x, y, z)$ , konuma bağlı faz fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Eş. 3.19'de verilen  $S(x, y, z)$  ile verilen faz fonksiyonu 'Eikonal fonksiyonu' olarak isimlendirilmektedir.

Eş. 3.19'de verilen elektrik alan ifadesinin Eş. 3.1'de verilen dalga denklemine yerleştirilmesi ve elde edilen denklemin düzenlenmesi ile

$$E_o [n_c^2 - |\nabla S|^2] + \left(\frac{1}{k_o^2}\right) \nabla^2 E_o - \left(\frac{j}{k_o}\right) [E_o \nabla^2 S + 2(\nabla E_o) \cdot (\nabla S)] = 0 \quad (3.20)$$

ifadesi elde edilmektedir. Bu aşamada

$$\nabla^2 E_o \ll k_o^2 \quad (3.21)$$

$$E_o \nabla^2 S + 2(\nabla E_o) \cdot (\nabla S) \ll k_o \quad (3.22)$$

koşullarının geçerli olduğu kabul edildiğinde

$$|\nabla S|^2 = n_c^2 \quad (3.23)$$

denklemleri elde edilmektedir ve bu denklemler 'Eikonal denklemleri' olarak bilinmektedir.

Eş. 3.21'de verilen kabul, dalganın yayıldığı ortamda nokta kaynakların ya da güçlü dağıntık kaynakların olmamasına, Eş. 3.22'de verilen kabul ise dalganın büyüklüğündeki değişimin hızlı olmamasına dayanmaktadır. Yapılan kabullerin ihlal edildiği durumlarda Eikonal denklemleri geçerliliğini yitirmektedir.

Eikonal denklemlerine göre  $S(x_o, y_o, z_o)$  bir noktada biliniyorsa başka bir noktadaki  $S(x, y, z)$  iki nokta arasındaki yol boyunca  $n_c$ 'nin integrali ile hesaplanabilmektedir. Ortamın yön bağımsız olması durumunda dalga cepheleri faz fonksiyonunu sabit yapan düzlemlerden oluşmakta ve ışın bu düzlemlere dik yönde yayılmaktadır. Bu nedenle yönbağımsız ortam için uygulanabilen Eikonal denklemlerinin çözümü, iyonküre ortamı için zordur. İyonküre konuma göre değişimi yavaş kabul edilebilen bir ortam olmasının yanı sıra yön bağımlı olması sebebiyle Eikonal fonksiyonu ancak ek yaklaşımlar ve kabullerle hesaplanabilmektedir. Eikonal denklemlerinin matematiksel olarak çözülmesine yönelik Hamilton fonksiyonu ve denklemleri türetilmiştir [67]. Bu denklemlerin iyonküre ortamında dalga yayılımı hesaplamak üzere özelleşmiş hali ise Haselgrove denklemleridir [37, 38].

### 3.1.3 Haselgrove Denklemleri

Eikonal denklemlerinin 3 boyutlu ve küresel koordinatlarda çözülebilmelerine yönelik olarak türetilen altı diferansiyel denklemden oluşmaktadır. Daha önce Eikonal denklemlerinin çözümü olarak Hamilton tarafından genel yön bağımlı ortamlar için bir fonksiyon tanımlanmış ve diferansiyel denklemler türetilmiştir [67]. Haselgrove bu denklemleri iyonkürerde ışın yayılımı için özelleştirerek Eş. 3.24 - 3.29'de verilen denklemler setini türetmiştir [37, 38].

$$\frac{dr}{dt} = \frac{1}{n^2} \left( \rho_r - n \frac{\partial n}{\partial \rho_r} \right) \quad (3.24)$$



$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{rn^2} \left( \rho_\theta - n \frac{\partial n}{\partial \rho_\theta} \right) \quad (3.25)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{rn^2 \sin \theta} \left( \rho_\varphi - n \frac{\partial n}{\partial \rho_\varphi} \right) \quad (3.26)$$

$$\frac{d\rho_r}{dt} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial r} + \rho_\theta \frac{d\theta}{dt} + \rho_\varphi \frac{d\varphi}{dt} \sin \theta \quad (3.27)$$

$$\frac{d\rho_\theta}{dt} = \frac{1}{r} \left( \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial \theta} - \rho_\theta \frac{dr}{dt} + r \rho_\varphi \frac{d\varphi}{dt} \cos \theta \right) \quad (3.28)$$

$$\frac{d\rho_\varphi}{dt} = \frac{1}{r \sin \theta} \left( \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial \varphi} - \rho_\varphi \frac{dr}{dt} \sin \theta - r \rho_\varphi \frac{d\theta}{dt} \cos \theta \right) \quad (3.29)$$

Eş. 3.24 - 3.29'de verilen denklem setinde  $r, \theta, \varphi$ , küresel koordinat eksenlerini,  $n$  karmaşık değerler alabilen kırılma indisinin gerçel kısmını,  $\rho_r, \rho_\theta, \rho_\varphi$  dalga cephesinin küresel koordinatlardaki bileşenlerini,  $t$  fazın hareket zamanı olarak ifade edilmektedir.

Bu denklemlerin çözümüne yönelik nümerik ve analitik yaklaşımlar vardır. Nümerik çözümlerden Jones ve Stephenson [39] ile Coleman [9] tarafından geliştirilen algoritmalar bulunmaktadır. Literatürde analitik çözümler üzerine yapılan çalışmalar bulunmaktadır [46–48, 65].

### 3.1.4 WKB Yöntemi

İyonkürenin düzgün dağılmayan ve yön bağımlı bir bölge olması sebebiyle bu bölgenin herhangi bir noktası için 3 boyutlu küresel koordinatlarda verilen Haselgrove denklemlerinin analitik ya da nümerik olarak çözülmesi yeterince kolay olmamaktadır. Bu nedenle çözümün sağlanabilmesi için iyonkürenin bazı özelliklerinin ihmal edildiği yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu yaklaşımlardan bir tanesi WKB yöntemidir [1, 5, 64]. WKB isimlendirmesi Wentzel, Kramers, Brill-

loun isimlerinin baş harflerinden oluşmaktadır. WKB yöntemi, konuma göre değişim gösteren sabitler bulunduran, doğrusal kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünde uygulanabilen bir yaklaşımdır. İyonkürenin yön bağımlı olma özelliği ihmal edildiğinde ve konuma göre gösterdiği değişimin yalnız  $z$  ekseninde olduğu kabul edildiğinde WKB methodu uygulanarak çözüm elde edilebilmektedir. Bu yaklaşımlar altında dalga denklemi çözülmeye çalışıldığında denklem

$$\left[ \frac{d^2}{dz^2} + q^2(z) \right] E_o(z) = 0 \quad (3.30)$$

haline gelmektedir. Bu denklemde  $E_o(z)$  kartezyen koordinat sisteminde  $z$  yönüne bağlı dalga fonksiyonunu ifade etmektedir.  $q(z)$ , Eş. 3.31'de verilen ifade ile tanımlanmaktadır.

$$q^2(z) = k_o^2 [n^2(z) - \sin^2 \theta_i] \quad (3.31)$$

Eş. 3.31'de  $\theta_i$ , dalganın geliş başucu açısını ( $z$  eksenine ile yaptığı açı),  $n$ , kırılma indisini ifade etmektedir. Dalga fonksiyonunun çözümü, ortamın konuma göre yani  $z$  yönünde yavaş değişim göstermesi koşulu altında

$$E_o(z) = \frac{1}{\sqrt{q(z)}} \exp \left[ -j \int q(z) dz \right] \quad (3.32)$$

olarak türetilmektedir. Eş. 3.32'de verilen integral  $z$  yönündeki yol boyunca alınmaktadır. WKB yöntemi daha çok iyonküre gibi değişken ve karmaşık bir ortam olan akustikte, yerçekimi dalgası çözümlerinde kullanılmaktadır [68, 69]. İyonkürede de uygulamaları bulunmaktadır [43].

### 3.1.5 Booker Denklemi

İyonkürede ışın izleme probleminin biraz daha sadeleştirilebilmesi için uygulanabilecek yaklaşımlardan bir diğeri de Booker denklemidir [1, 5, 64]. Booker denklemi iyonkürenin yalnızca  $z$  yönünde düzgün dağılmamış,  $x$  ve  $y$  yönünde

düzgün dağılmış olduğu kabul edilebilir. Bu yaklaşımda iyonkürenin kendi içinde düzgün dağılmış olan paralel, düzlem katmalardan oluştuğu kabul edilmektedir. Katmanların kalınlığı azaldıkça model gerçeğe daha yakın hale gelmektedir. Katmanların kendi içinde yön bağımsız olması şartı aranmamaktadır. Ancak yön bağımsız olma durumunu bozan yerkürenin manyetik alanının konuma göre sabit olduğu kabul edilmektedir. Bu kabulün de yapılması halinde Booker denklemleri bir sonraki kısımda anlatılan Snell yasası ile eşdeğer hale gelmektedir. İyonküreye gelen dalganın faz fonksiyonu  $S(x, y, z)$

$$S(x, y, z) = [-jk(S_1x + S_2y + Cz)] \quad (3.33)$$

olarak ifade edilebilmektedir. Bu ifadede  $S_1$  dalga cephesinin normalinin  $x$  eksenindeki,  $S_2$ ,  $y$  eksenindeki,  $C$  ise  $z$  eksenindeki izdüşümünü göstermektedir. Her bir katman için, katmanın kırılma indisi  $n$ , gelen dalganın  $z$  eksenine yaptığı açı  $\theta_i$  olduğunda yayılan dalganın faz fonksiyonu,

$$S(x, y, z) = \exp[-jk \{S_1x + S_2y + n(\cos \theta_i)z\}] \quad (3.34)$$

olarak yazılabilir. Buradan

$$n \sin \theta_i = (S_1^2 + S_2^2)^{1/2} \quad (3.35)$$

elde edilebilmektedir. Eş. 3.35'den doğrudan  $\theta_i$  hesaplanamamaktadır; çünkü, yön bağımlı ortamda  $n$  dolaylı olarak  $\theta_i$ 'ye bağlı olmaktadır. Bu denkleme çözüm getirebilmek için yeni bir  $q$  değişkeni tanımlanmaktadır. Bu değişken

$$q = n \cos \theta_i \quad (3.36)$$

olarak tanımlanmaktadır ve bu değişken kullanılarak,

$$n^2 = S_1^2 + S_2^2 + q^2 \quad (3.37)$$

denklemini elde edilmektedir ve bu denklem 'Booker quartic' denklemini olarak bilinmektedir.

Katman kalınlığı azaldıkça model gerçeğe yakınlaşmaktadır. Katmanların yön bağımlı olma özellikleri korunmakla birlikte yerkürenin manyetik alanındaki konuma bağlı değişim ihmal edilmektedir. Bu yaklaşımlar altında Booker quartic denklemini iyonkürrede dalga yayılımı uygulamalarında kullanılmaktadır [70–72].

### **3.2 Snell Yasası ile Işın İzleme**

Geometrik optik yaklaşımı ile ışın izleme yöntemlerinden bir diğeri Snell yasasının uygulanmasıdır. Bu tez çalışmasında iyonkürrede dalga yayılımı Snell yasası ile modellenmektedir. Bu yöntemin seçilmesindeki en önemli etken, dalga yayılımının modellenmesinde işlem yükü ve çözüm süresi bakımından 3.1'de anlatılan diğer yöntemlere göre avantaj sağlamasıdır.

Snell yasası iki katman arasındaki sınır yüzeyinden geçen ışının yayılma yolunu ifade eden yasadır [1, 2, 5, 63, 64]. Booker denkleminde dalganın yayıldığı ortamın yön bağımsız olduğu kabulü yapıldığında denklem Snell yasasına eşdeğer olmaktadır. Ortamın düzgün dağılmış ve yön bağımsız olması kabulünün iyonkürreye uygulanabilmesi için iyonküre katmanlara ya da hücrelere bölünerek modellenmektedir. Literatürde, iyonkürenin yüksekliğe göre katmanlardan oluştuğu ve her bir katmanın kendi içinde düzgün dağılmış ve yön bağımsız olarak modellendiği çalışmalarda Snell yasası sıklıkla kullanılmaktadır [73–77]. Bu tez kapsamında geliştirilen, iyonkürenin 3B küresel hücre yapısı, Bölüm 4'de anlatılmaktadır. Bu yapıda her bir hücre kendi içinde düzgün dağılmış ve yön bağımsız kabul edilmektedir. Ancak modelin tamamı iyonkürenin düzgün dağılmama, yön bağımlı olma ve zamana göre değişim gösterme özelliklerini kapsamaktadır.

- Hücreler arasında yani konuma göre iyonkürenin fiziksel özelliklerini ifade eden parametrelerin değerleri değişmektedir. Böylece iyonkürenin düz-

gün dağılmama özelliği kapsamaktadır.

- Snell yasasının uygulanmasındaki en kritik parametre olan kırılma indisinin hesaplanmasında, iyonkürenin yön bağımlı olmasına neden olan parametreleri kullanılmaktadır. Bu sayede de iyonkürenin yön bağımlı olma özelliği modele yansıtılmaktadır.
- Her bir hücreye karşılık hesaplanan parametreler zamana bağımlı olarak hesaplanmaktadır. Böylece geliştirilen modelde iyonkürenin zamana göre değişimi sağlanmaktadır.

Snell yasası, kırılma indisleri sırası ile  $n_1$  ve  $n_2$  olan iki komşu ortamdan birinde ilerleyen dalganın diğer ortam ile olan sınıra geldiğinde nasıl davranacağını ifade etmektedir. Snell yasası iki katman arasındaki sınır yüzeyinde faz uyumlanmasına dayanarak elde edilmektedir [63,64]. Gelen dalga ile yansıyan ya da kırılan dalganın fazları sürekli olmalıdır. Snell yasasının kırılma ve yansıma eşitlikleri buradan yola çıkılarak elde edilmektedir. Snell yasasının geçerli olabilmesi için,

- sınır yüzeyinin dalgaboyuna göre yeterince büyük olması,
- gelen dalganın düzleme teğet olmaması
- sınır yüzeyinin pürüzsüz kabul edilebilmesi

gerekmektedir.

Sınıra temas eden dalga kırılma veya yansıma etkisine maruz kalmaktadır. Kritik açıdan küçük geliş açısına sahip olan dalga kırılarak ikinci ortama geçmektedir. Geliş açısı kritik açıdan büyük olduğunda ise yansıyarak geldiği ortama geri dönmektedir. Kritik açı ise gelen dalganın  $90^\circ$  ile kırıldığı açıdır.

Birinci Snell yasasına göre sınırdan yansıyan dalganın yansıma açısı,  $\theta_r$ , sınıra gelen dalganın geliş açısına,  $\theta_i$ , eşittir

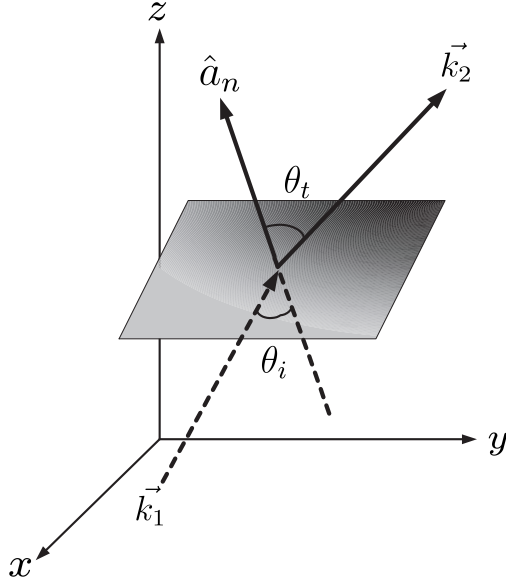
$$\theta_r = \theta_i \quad (3.38)$$

İkinci Snell yasasına göre ise kırılan dalganın kırılma açısı,  $\theta_t$ , ile gelen dalganın geliş açısı arasındaki ilişki

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (3.39)$$

Bu tez kapsamında uygulanan Snell yasası ile ışın izlemede ışının hareket yönü vektörel olarak ifade edilmekte, sınır ise düzlem olarak kabul edilmektedir. Hesaplamalarda kullanılan ifadelerde  $\theta_i$ , ışının iyonküre katman sınırına geliş açısı,  $\theta_t$ , ışının komşu iyonküre katmanına kırılarak girdiği kırılma açısı,  $\theta_r$ , ışının iyonküre katman sınırından yansıma açısı,  $\hat{a}_n (a_{nx}, a_{ny}, a_{nz})$ , iyonküre katman sınır düzleminin yüzey normali vektörü,  $\vec{k}_1 (k_{1x}, k_{1y}, k_{1z})$ , gelen ışının yayılma yön vektörü,  $\vec{k}_2 (k_{2x}, k_{2y}, k_{2z})$ , kırılan ya da yansıyan ışının yayılma yön vektörü olarak tanımlanmaktadır.

Işının katman sınırına geliş açısı kritik açıdan küçük olduğu durumda ışın kırılarak komşu katmanın içine doğru ilerlemektedir. Kırılarak komşu katmanda yayılan ışının yayılma yön vektörü Şekil 3.1'deki geometrik yapıya göre hesaplanmaktadır.



Şekil 3.1. İyonküre katman sınır düzleminde kırılma.

Bu yapıya göre şu koşullar sağlanmalıdır:

- Katmanlar arasındaki sınırının yüzey normali, birinci katmandaki ışın yayılım yönü ve ikinci katmandaki ışın yayılım yönü aynı düzlem üzerinde olmalıdır. Buna göre

$$\left( \hat{a}_n \times \vec{k}_1 \right) \cdot \vec{k}_2 = 0 \quad (3.40)$$

olmaktadır.

- Birinci katmandaki ışın yayılım yönü ile ikinci katmandaki ışın yayılım yönü arasındaki açı  $\theta_t - \theta_i$  olmalıdır.  $\theta_t$  açısı Eş. 3.39 ile hesaplanmaktadır. Bu durumda

$$\vec{k}_1 \cdot \vec{k}_2 = \cos(\theta_t - \theta_i) \quad (3.41)$$

sağlanmalıdır.

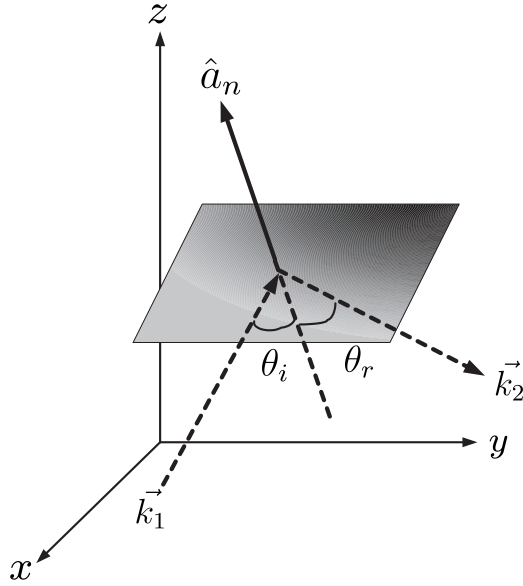
- Katmanlar arasındaki sınırının yüzey normali ile ikinci katmandaki ışın

yayılm yönü arasındaki açı  $\theta_t$  olmalıdır. Buna göre

$$\hat{a}_n \cdot \vec{k}_2 = \cos(\theta_t) \quad (3.42)$$

eşitliği elde edilmektedir.

Verilen bu üç eşitliğin beraber çözülmesi sonucunda ikinci katmandaki ışın yayılım yönü vektörünün üç bileşeni hesaplanmaktadır. Işının katman sınırına geliş açısı kritik açıdan büyük olduğu durumda ışın yansıyor aynı katmanın içine doğru ilerlemektedir. Yansıyan ışının yayılma yön vektörü Şekil 3.2'deki geometrik yapıya göre hesaplanmaktadır.



Şekil 3.2. İyonküre katman sınır düzleminde yansıma.

Bu yapıya göre şu koşullar sağlanmalıdır:

- Katmanlar arasındaki sınırının yüzey normali, birinci katmandaki ışın yayılım yönü ve ikinci katmandaki ışın yayılım yönü aynı düzlem üzerinde olmalıdır. Buna göre

$$(\hat{a}_n \times \vec{k}_1) \cdot \vec{k}_2 = 0 \quad (3.43)$$



olmaktadır.

- Birinci katmandaki ışın yayılım yönü ile ikinci katmandaki ışın yayılım yönü arasındaki açı  $180^\circ - (\theta_i + \theta_r)$  olmalıdır.  $\theta_r$  açısı Snell yasasına göre  $\theta_i$  açısına eşit olmaktadır. Bu durumda

$$\hat{a}_n \cdot \vec{k}_2 = \cos(180^\circ - 2\theta_i) \quad (3.44)$$

eşitliği elde edilmektedir.

- Katmanlar arasındaki sınırının yüzey normali ile ikinci katmandaki ışın yayılım yönü arasındaki açı  $180^\circ - \theta_i$  olmalıdır. Buna göre

$$\hat{a}_n \cdot \vec{k}_2 = \cos(180^\circ - \theta_i) \quad (3.45)$$

sağlanmalıdır.

Verilen bu üç eşitliğin beraber çözülmesi sonucunda ikinci katmandan yansıyan ışının yayılım yönü vektörünün üç bileşeni hesaplanmaktadır.

### 3.3 İyonkürede Kırılma İndisi

İyonkürede ilerleyen dalganın yayılım yolunun hesaplanmasında en önemli parametrelerden biri iyonkürenin kırılma indisidir. Bu tez kapsamında iyonkürenin kırılma indisini hesaplamak için Eş. 3.46 ve Eş. 3.47’de verilen Appleton-Hartree formülü kullanılmaktadır. Appleton-Hartree formülü soğuk plazma ortamı için kırılma indisini veren matematiksel ifadedir. Bu ifade birbirlerinden bağımsız olarak E. V. Appleton, D. Hartree ve H. K. Lassen tarafından geliştirilmiştir. Bu nedenle bu denklem Appleton-Lassen formülü olarak da bilinmektedir [18, 23–25].

Bu formülde, sıradan ve sıradışı dalga için kırılma indisi, sırasıyla  $n_o$  ve  $n_e$ , elektron yoğunluğu  $N_e$ , plazma frekansı  $f_N$ , yayılan dalganın frekansı  $f$ , yer-kürenin manyetik alanının büyüklüğü  $B$ , gelen dalganın ilerleme yönü ile yer-

kürenin manyetik alanının yönü arasındaki açı  $\theta$ , elektronun parçacıklarla çarpışma frekansı  $f_v$ , elektronun dönme frekansı  $f_h$ , elektron yükü  $e$ , elektronun kütlesi  $m$  ve serbest uzaydaki dielektrik sabiti  $\epsilon_o$  parametrelerine bağlı olarak verilmektedir.

Sıradan dalga için Appleton-Hartree formülü:

$$n_o^2(N_e, B, \theta, f) = 1 - \frac{X}{1 - jZ - \frac{Y^2(\sin \theta)^2}{2(1-X-jZ)} + \left[ \frac{Y^4(\sin \theta)^4}{4(1-X-jZ)^2} + Y^2(\cos \theta)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (3.46)$$

Sıradışı dalga için Appleton-Hartree formülü:

$$n_e^2(N_e, B, \theta, f) = 1 - \frac{X}{1 - jZ - \frac{Y^2(\sin \theta)^2}{2(1-X-jZ)} - \left[ \frac{Y^4(\sin \theta)^4}{4(1-X-jZ)^2} + Y^2(\cos \theta)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (3.47)$$

Eş. 3.46 ve 3.47'de,

$$X(N_e, f) = (N_e e^2) / (\epsilon_o m (2\pi f)^2) = f_N^2 / f^2 \quad (3.48)$$

$$Y(B, f) = (eB) / (2\pi f m) = f_h / f \quad (3.49)$$

$$Z(f) = f_v / f \quad (3.50)$$

olarak tanımlanmaktadır.

Elektronun dönme frekansı  $f_h$  2.3'de verilen denklem ile hesaplanmaktadır. Elektronun, iyon parçacıkları ve nötr moleküller ile çarpışma frekansı, her bir parçacık için  $f_v$  Eş. 3.51 ile hesaplanmaktadır.

$$f_{vAB} = N_A N_B (r_A + r_B)^2 \sqrt{\frac{8\pi k_B T}{\mu_{AB}}} \quad (3.51)$$

Denklemden verilen  $N_A$  sistemdeki A parçacığının sayısı,  $N_B$  sistemdeki B parçacığının sayısı,  $r_A$  A molekülünün yarıçapı,  $r_B$  B molekülünün yarıçapı,  $k_B$  Boltzmann sabiti,  $T$  Kelvin cinsinden sıcaklığı ifade etmektedir.  $\mu_{AB}$  ise

$$\mu_{AB} = \frac{m_A m_B}{m_A + m_B} \quad (3.52)$$

olarak tanımlanmaktadır. Eş. 3.52'de  $m_A$  A parçacığının kütlesini,  $m_B$  B parçacığının kütlesini ifade etmektedir.

İyonkürede elektronun iyon ve nötr parçacıklarla çarpışmasının hesaplanmasında verilen ifadelerde A parçacığı elektronu, B parçacığı ise iyonküredeki hidrojen, oksijen, azottan meydana gelen iyon ve molekülleri temsil etmektedir.

Eş. 3.46 ve Eş. 3.47 uygulamaya göre çeşitli kabullerle basitleştirilebilmektedir. Örneğin, yer kürenin manyetik alanı, elektronun dönme hareketi ve elektronun parçacıklarla çarpışma etkisi ihmal edildiğinde denklem

$$n^2 = 1 - X \quad (3.53)$$

haline gelmektedir. Kırılma indisinin hesaplanmasında uygulanacak yaklaşımın problemin doğasına ve istenilen detay seviyesine uygun olması gerekmektedir. Bu nedenle bu tez kapsamında geliştirilen modelde iyonkürenin fiziksel özelliklerinin modele yansıtılması amacıyla kırılma indisinin hesaplanmasında Eş. 3.46 ve 3.47 sadeleştirme yapılmadan, tüm bileşenleri ile hesaplanmaktadır.

## 4. VERİ GİRİŞİ İLE BESLENEBİLEN 3 BOYUTLU KÜRESEL İYONKÜRE MODELİ

İyonküre içerdiği elektron yoğunluğu sayesinde KD bandında radyo dalgalarını yansıtarak uzak mesafe haberleşmesine imkan sağlamaktadır. Uydu sistemleri ile yeryüzündeki sistemler arasındaki haberleşme sırasında iletilen sinyaller iyonküreden geçerken etkilenmektedir. Uzak mesafe kısa dalga haberleşme ve uydu ile yeryüzü sistemleri arasındaki haberleşmenin başarımının artırılması için iyonkürenin değişken ve kritik özelliklerinin anlaşılması ve geliştirilecek modellerde bu özelliklerin kapsanması gerekmektedir.

İyonkürenin yapısı ve fiziksel özellikleri Bölüm 2'de özetlenmektedir. Bu tez kapsamında geliştirilen dalga yayılım modelinde iyonkürenin bu yapısını yansıtmak üzere iyonkürenin 3B küresel hücre modeli tasarlanmıştır. Her bir hücre için iyonkürenin fiziksel parametrelerinin hesaplanmasında, veri ile beslenebilme özelliği olan ve Bölüm 2'de anlatılan IRI-Plas modeli kullanılmaktadır. Bu bölümde bu tez kapsamında geliştirilen ve ışın izlemeye ortam sağlayan iyonkürenin 3B küresel hücre modeli anlatılmaktadır.

### 4.1 İyonkürenin 3 Boyutlu Küresel Hücre Modeli

Bu tez çalışması kapsamında dalga yayılımında ışın izlemenin uygulanabilmesi amacı ile iyonküre, aralarında sınır yüzeyler olan katmanlardan oluşacak şekilde modellenmesi öngörülmüştür. Bu amaçla basitten karmaşığa doğru adım adım ilerlenmiş, ihtiyaca yönelik olarak uygun bir yapı tasarlanmıştır.

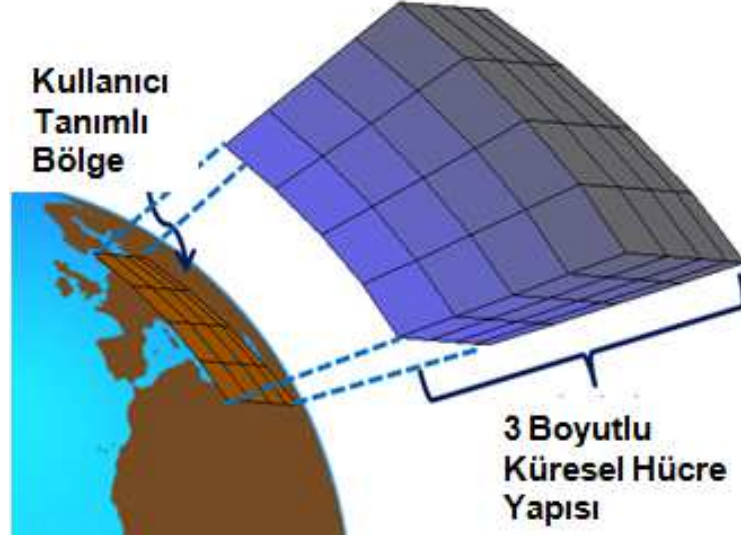
İlk olarak yeryüzünden olan yüksekliğe göre iyonkürenin elektron yoğunluğundaki değişimin modellenmesi için iyonküre paralel düzlemlerden oluşacak şekilde modellenmiştir. Her bir düzlem eş elektron yoğunluğu düzlemi gibi değerlendirilmiş, iki düzlem arası iyonküre parametrelerinin sabit kaldığı kabul edilmiştir. Işın izleme algoritmaları bu geometrik model üzerinden uygulanmıştır.

Geniş coğrafi bölgelerde iyonkürenin eş elektron yoğunluğu düzlemlerinin birbirine paralel değil, eğik düzlemler olarak modellenebileceği değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda iyonküre katmanları hem doğu-batı doğrultusunda hem de kuzey-güney doğrultusunda istenilen açılarda döndürülmüş ve ışın izleme uygulanmıştır.

Bir sonraki adımda, özellikle KD bandında dalganın yeryüzüne ulaşana kadar aldığı yol göz önünde bulundurulduğunda yeryüzünün ve doğası gereği küresel yapıda olan iyonkürenin düzlem katmanlar ile modellenmesinin yeterli olmayacağına karar verilmiştir. Paralel katmanlardan, küresel katman yapısına geçiş yapılmıştır. Küresel katman yapısında da her bir katmanın kendi içinde sabit iyonküre parametre değerlerine sahip olduğu kabulü yapılmıştır [78].

İyonküre modelinin geliştirilmesindeki bu ön çalışmalar sürecinde öncelikle kırılma indisinin hesaplanmasında verilen Appleton-Hartree formülünün yalnız elektron yoğunluğuna bağımlı olarak hesaplandığı Eş. 3.53'de verilen hali kullanılmıştır.

İyonkürenin düzgün dağılmayan yapısı yalnız yüksekliğe bağımlı değildir. Aynı zamanda iyonküre yatay düzlemde de düzgün dağılmayan bir yapıda sahiptir. Bu nedenle iyonkürenin eşyükseklik sınırlarına sahip olan küresel katmanlara ayrılması yaklaşımı ilerletilmiştir. İyonküre modelinde yüksekliğe göre katmanların yanı sıra enlem ve boylama göre dilimler oluşturulmuş ve böylece 3B küresel hücre modeli ortaya çıkmıştır [79]. İyonküre parametreleri IRI-Plas yazılım aracı kullanılarak bu yapının her bir hücresi için ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Bu sayede iyonkürenin düzgün dağılmayan yapısı en uygun şekilde modele yansıtılmaktadır. Geliştirilen model Şekil 4.1'de temsili olarak gösterilmektedir.

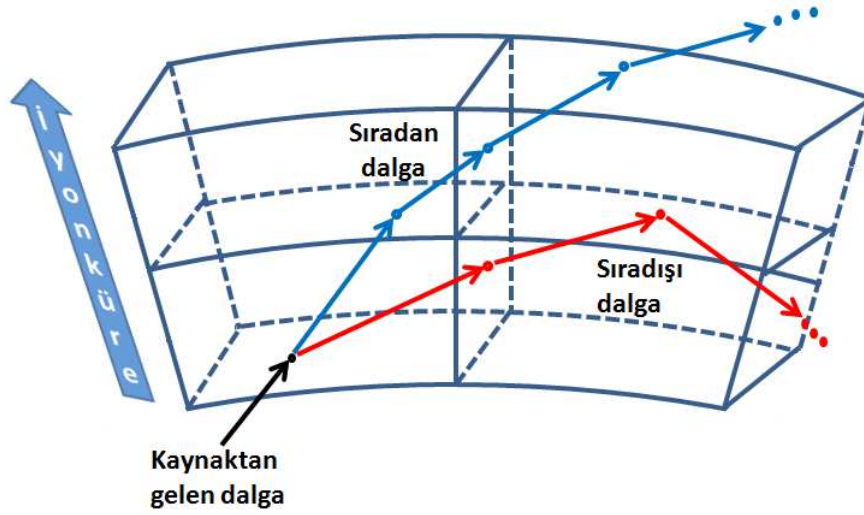


Şekil 4.1. İlgili alanı bölge üzerinde 3B küresel hücre modelinin gösterimi.

Bu tez kapsamında geliştirilen IONOLAB-RAY algoritmasında uygulanan 3 boyutlu küresel ızgara modelinin çeşitli avantajları bulunmaktadır. Bunlardan ilki kullanıcı tarafından ilgi alanı bölge tanımlanabilmektedir. Kullanıcı dalga yayılım modelinde uygulayacağı senaryolar için ihtiyaç duyacağı bölgenin enlem, boylam ve yükseklik sınırlarını belirleyebilmektedir. İkinci avantaj ise tanımlanan bölgedeki hücre çözünürlüğü kullanıcı tarafından belirlenebilmektedir. Çözünürlüğün belirlenmesinde yazılımsal olarak bir limit bulunmamakla birlikte kullanılan IRI-Plas yazılımının hesaplama limitleri göz önünde bulundurulmalıdır. Çözünürlük arttıkça aradeğerleme uygulanmaktadır. Aradeğerleme sonucunda uygun olmayan ya da anlamsız değerler ile karşılaşılması halinde kullanıcı uyarılmaktadır. Ayrıca kullanıcı tanımlı bölgedeki enlem, boylam ve yükseklik bölmelerinin eşit dağılımlı olma mecburiyeti bulunmamaktadır. Böylece kullanıcı tanımlı bölge içinde, değişkenliğin fazla olacağı öngörülen kısımlar yüksek çözünürlükte, diğer kısımlar düşük çözünürlükte modellenebilmektedir.

Tez çalışmaları sürecinde, geliştirilen 3 boyutlu küresel hücre modelinde, Snell yasası öncelikle yalnız yüksekliğe bağlı küresel sınırlarda uygulanmıştır. Bu uygulamada, sınır yüzeyi, ışının küre ile kesiştiği noktadaki teğet düzlem ola-

arak kabul edilmektedir. Daha sonra enlem ve boylamdaki dilimlerden dolayı oluşan yanal yüzeylerde de Snell yasası uygulanarak dalganın yanal yüzeylerdeki kırılması da modele eklenmiştir. Sıradan ve sıradışı dalganın temsili olarak hücrelere ayrılmış iyonküre içinde yayılma modeli Şekil 4.2’de gösterilmektedir.



Şekil 4.2. İyonkürede sıradan ve sıradışı dalganın yayılım modeli.

3 boyutlu küresel hücre modeli iyonkürenin zamana göre değişkenlik özelliğini de dalga yayılımına yansıtılabilmektedir. Bunun için her bir hücreye için hesaplanan iyonküre parametreleri yılın günü ve günün saatine karşılık hesaplanmaktadır.

Bu tez kapsamında geliştirilen 3 boyutlu küresel hücre modeli, Snell yasasına dayanan ışın izleme yöntemini uygulamak ve iyonkürenin özelliklerini modele yansıtmak için uygulanabilir ve etkin bir çözüm sağlamaktadır.

#### 4.2 İyonkürenin Veri İle Güncellenebilen IRI-Plas Modeli

Bu tez kapsamında dalga yayılımının modellenmesinde iyonküre ortamına ilişkin parametreler IRI-Plas yazılımı ile hesaplanmaktadır. IRI-Plas ile ilgili bilgiler

Bölüm 2.3'de özetlenmektedir. Kullanıcı tarafından tanımlanan tarih ve saate karşılık GIM-TEİ verisi otomatik olarak internetten indirilmekte, ilgi alanı bölge ve enlem - boylam çözünürlüğü ile uyumlu olacak aradeğerlemeler yapılmakta ve IRI-Plas'a beslenmektedir. Ayrıca kullanıcının bu işlemi otomatik olarak yapmayı tercih etmemesi halinde TEİ verileri veri dosyası olarak da IONOLAB-RAY algoritmasına girilebilmekte ve sonrasında IRI-Plas'a beslenebilmektedir. IRI-Plas'a beslenebilen diğer parametreler, örneğin F2 katmanının kritik frekansı (foF2) ve F2 katmanının en büyük iyonlaşma yüksekliği (hmF2) parametreleri de kullanıcı tarafından girilebilmektedir.

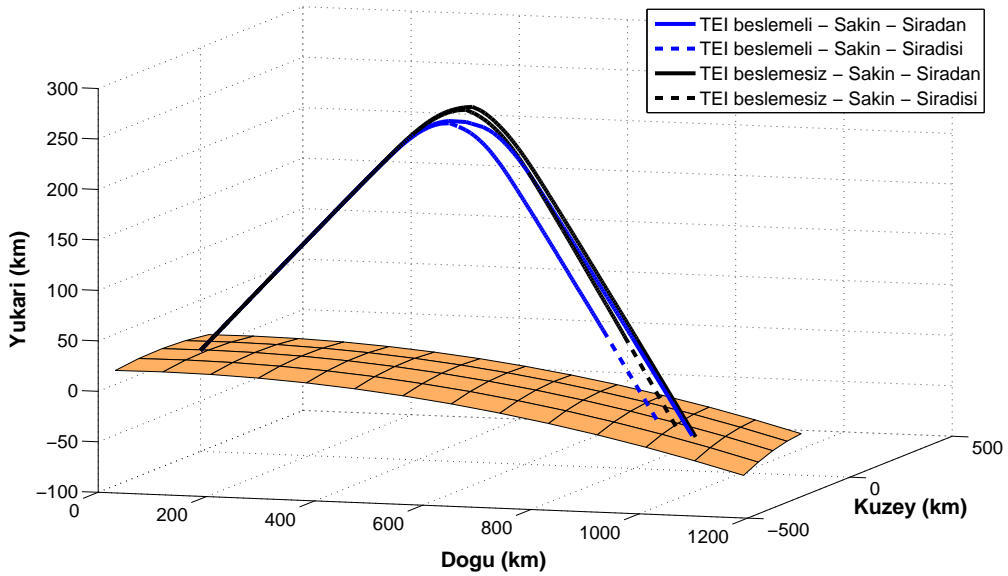
IONOLAB-RAY algoritmasında 20.200 km'ye kadar modelleme yapabilen IRI-Plas yazılım aracının gömülü olarak kullanılmasının bir diğer avantajı da gelecekte IONOLAB-RAY'in genişletilmiş bir uygulaması olarak uydu haberleşmesinde de dalga yayılım modelinin kullanılabilmesine imkan sağlamasıdır. IRI-Plas yazılımının 20.200 km'ye kadar hesaplama yapabilmesi avantajının uygulandığı bir örnek Bölüm 5.3'de sunulmaktadır.

#### **4.2.1 Dalganın yayılım yolunda TEİ verisi kullanımının etkisi**

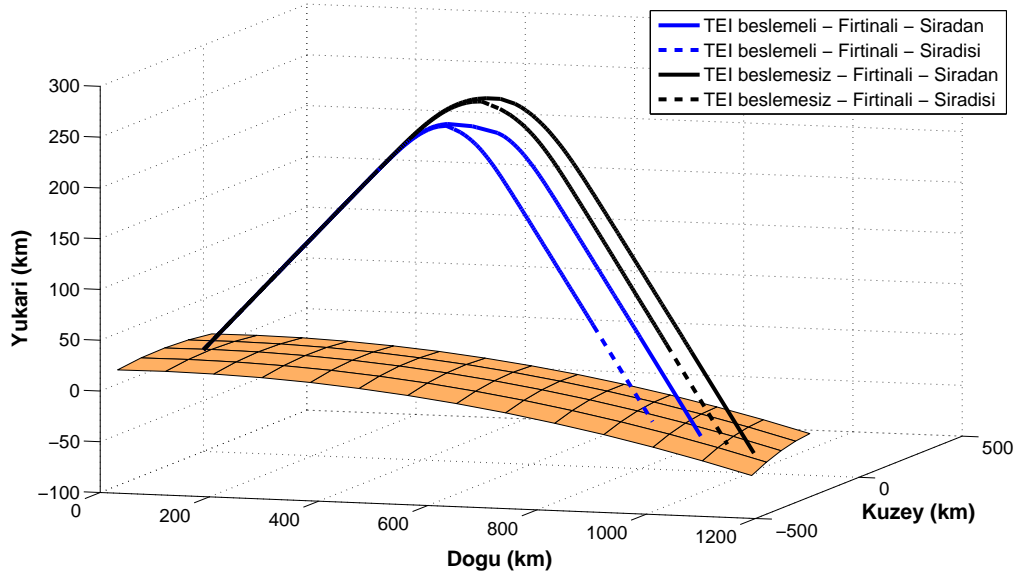
Bu alt bölümde IONOLAB-RAY algoritmasında sakin ve fırtınalı durumlarda iyonküre modelinin TEİ verisi ile beslenmesinin etkisi değerlendirilmektedir. Sakin gün için 17 Nisan 2011, fırtınalı gün için 25 Ekim 2011 seçilmiştir. TEİ besleme etkisinin gözlemleneceği örnek senaryolar 02:00 GS için koşturulmuş olup, fırtınalı günün Dst indisi -147 olarak verilmektedir. Kaynağın konumu Ankara, frekans 6 MHz, dalganın yayılım yönünün yanca açısı  $90^{\circ}$ , yükseliş açısı  $30^{\circ}$  olarak atanmıştır. Bu senaryolar için yapılan ön koşulda iyonküre yükseklik adımı 2 km, enlem ve boylam adımları ise  $1^{\circ}$  olarak girilmiştir. Ön koşulda otomatik olarak TEİ verisi kullanılan ve kullanılmayan iyonküre modellerinde seçilen sakin ve fırtınalı günlerde dalga yayılım yolu hesaplanmıştır. Elde edilen grafikler sakin gün için Şekil 4.3'te, fırtınalı gün için Şekil 4.4'te verilmektedir. Sakin günler için IRI-Plas modeli iyonkürenin mevcut halini yeterince geçerli olarak hesaplayabilmektedir. TEİ verisi beslemenin etkisi az olmaktadır. TEİ



verisi ile beslenen ve beslenmeyen iyonküre modellerinde elde edilen dalga yayılım yolu grafikleri birbirine yakın çıkmaktadır. Şekil 4.3'te TEİ beslemesinin yapıldığı ve yapılmadığı koşulda dalganın yeryüzüne ulaştığı konumlar arasındaki fark sıradan dalga için yaklaşık 11,92 km, sıradışı dalga için yaklaşık 34,15km hesaplanmaktadır. Fırtınalı günlerde ise ölçümlerin aylık ve günlük ortanca değerlerine dayanan IRI-Plas modeli mevcut iyonküreyi yeterince iyi yansıtamayabilmektedir. Bu durumda mevcut iyonkürenin TEİ ölçüm verileri ile IRI-Plas modelinin beslenmesi ile iyonküre güncellenebilmektedir. Fırtınalı günlerde TEİ beslemesi yapılan ve yapılmayan iyonküre modelleri ile elde edilen dalga yayılım yolu grafikleri birbirinden farklılık göstermektedir. Şekil 4.4'te verilen örnekte dalganın yeryüzüne ulaştığı konumlar arasındaki fark sıradan dalga için yaklaşık 98,33 km, sıradışı dalga için yaklaşık 140,48 km hesaplanmaktadır. Bu fark sakin günde hesaplanan konum farklarından 10 kata yakın fazladır.



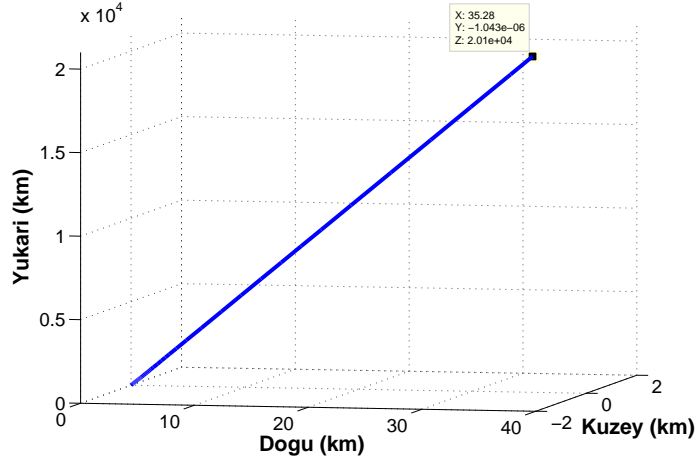
Şekil 4.3. Sakin günde TEİ beslemesinin etkisi, 17 Nisan 2011, 02:00, Ankara, 6 MHz, yanca açısı 90°, yükseliş açısı 30°.



Şekil 4.4. Firtinalı günde TEİ beslemesinin etkisi, 25 Ekim 2011, 02:00, Ankara, 6 MHz, yanca açısı  $90^\circ$ , yükseliş açısı  $30^\circ$ .

#### 4.2.2 IRI-Plas üst limitine kadar dalga yayılım yolu

IRI-Plas modeli ionküreyi ve sonrasında gelen plazmaküreyi yeryüzünden 20.200 km'ye kadar modelleyebilmektedir. IRI-Plas'ın bu ve diğer özellikleri Bölüm 2.3'de özetlenmektedir. IRI-Plas'ın bu özelliğini incelemek üzere 20.200 km'ye dalga yayılım yolunun gözlenebildiği örnek bir senaryo IONOLAB-RAY algoritması ile koşturulmuş olup çıktısı Şekil 4.5'te sunulmaktadır. Örnek senaryoda tarih 21 Mart 2015, saat 12:00 GS, frekans 20 MHz, kaynağın konumu Ankara, yanca açısı  $90^\circ$ , yükseliş açısı  $89.9^\circ$  olarak seçilmiştir. Dalganın yayılım yolu, kaynağın konumunu merkez kabul eden yerel Doğu-Kuzey-Yukarı koordinatlarda çizilmektedir. Bu nedenle dalganın 20.200 km ile sınırlandırılmış 3B küresel hücre modelinden çıktığı nokta, kaynağı merkez kabul eden yerel koordinatlarda yaklaşık olarak 20.100 km olarak hesaplanmakta ve şekil üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 4.5. İyonküre ve Plazmakürenin 20.200 km yüksekliğe kadar modellenmesi, 21 Mart 2015, 12:00 GS, 20 MHz, Ankara, yanca açısı  $90^\circ$ , yükseliş açısı  $89.9^\circ$ .

### 4.3 Yerkürenin Manyetik Alan Modeli

İyonkürenin yönbağımlı olması yerkürenin manyetik alanından kaynaklanmaktadır. Durgun bir plazmaya bir alan uygulandığında elektronlar hareket etmeye başlamaktadır [1]. Buna iyonküredeki elektronlar üzerinde yerkürenin manyetik alanı dönme etkisi yaratmaktadır. Bu etki ile iyonküre yönbağımlı bir yapı göstermektedir. Bu tez kapsamında geliştirilen dalga yayılım modeli iyonkürenin yön bağımlı olma özelliğini kapsamaktadır. Bu nedenle yerkürenin manyetik alanı geliştirilen modelin bir parçası olup hesaplanmasında 'International Geomagnetic Reference Field' (IGRF) modeli kullanılmaktadır. IGRF modeli ile iyonkürenin 3B hücre modelinde her bir hücre için yerkürenin manyetik alanının büyüklüğü ve yönü hesaplanmaktadır. Bu parametreler daha sonra dalganın kırılma indisinin hesaplanmasında kullanılan Appleton-Hartree formüle girdi olmaktadır.

IGRF modeli yerkürenin manyetik alanının standart matematiksel gösterimidir. Yerküresel potansiyelin küresel harmonik açılımını tanımlayan Gauss katsayılarından oluşmaktadır. Yerküresel potansiyel,  $V(r, \theta, \phi, t)$  Eş. 4.1'de verilen ifade ile modellenmektedir [80]. Bu ifadede yerkürenin merkezinden yarıçapsal

uzaklık  $r$ , doğuya göre boylam  $\phi$ , kutba göre enlem  $\theta$ , yerkürenin yarıçapı  $a$ , zaman  $t$  Gauss katsayıları  $g_l^m$  ve  $h_l^m$  açılımının en büyük mertebesi  $L$ , Schmidt normalize Legendre fonksiyonu  $P_l^m(\cos \theta)$  ile gösterilmektedir [81]. Yerkürenin manyetik alanının değişiminin yavaş olduğu kabul edildiğinden, IGRF modelinde 5 yıllık dönemler için verilmektedir. Her 5 yıllık dönemin arasındaki bir zamana denk gelen yıl için aradeğerleme yapılmaktadır.

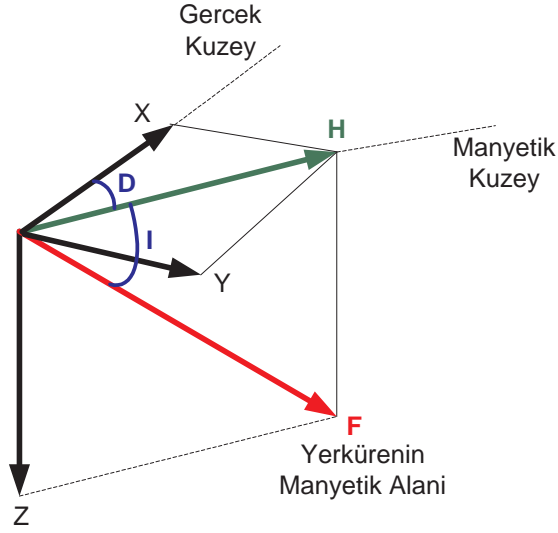
$$V(r, \phi, \theta, t) = a \sum_{l=1}^L \sum_{m=0}^l \left(\frac{a}{r}\right)^{l+1} (g_l^m(t) \cos m\phi + h_l^m(t) \sin m\phi) P_l^m(\cos \theta) \quad (4.1)$$

Manyetik alan  $\vec{B}$

$$\vec{B}(r, \phi, \theta, t) = -\nabla V(r, \phi, \theta, t) \quad (4.2)$$

ile hesaplanmaktadır.

IGRF modülünün çıktıları nT (nano Tesla) birimiyle yerkürenin manyetik alanının kuzey, doğu ve aşağı koordinatlarındaki X, Y, Z bileşenleri, yatay eksenindeki büyüklüğü H ve toplam yerküre manyetik alanı büyüklüğü F olarak verilmektedir. Bunların yanı sıra eğim ve sapma açıları çıktı olarak sunulmaktadır. Sapma açısı D, yerkürenin manyetik alanının kuzey-doğu yatay eksenine olan izdüşüm vektörü ile kuzey arasındaki açıdır. Eğim açısı I, ise yerkürenin manyetik alan vektörü ile bu vektörün kuzey-doğu yatay eksenine olan izdüşüm vektörü arasındaki açıdır. Çıktı parametrelerinin koordinat sistemi üzerindeki gösterimi Şekil 4.6'da verilmektedir. IGRF modülü ile yerkürenin manyetik alanının tüm bileşenleri kullanıcı tarafından tanımlanan ilgi alanı bölgede oluşturulan iyonkürenin 3B küresel hücre modelinin her bir hücresi için ayrı ayrı hesaplanmaktadır.



Şekil 4.6. Yerkürenin manyetik alanının IGRF modülü ile hesaplanan bileşenleri

#### 4.4 Nötr Havaküre Amprik Modeli

Nötr havaküre amprik modeli 2001 ABD Naval Research Laboratory Mass Spectrometer and Incoherent Scatter Radar Exosphere (NRLMSISE-00) modelinin uygulamasıdır. Model yeryüzünden uzaya kadar havaküredeki sıcaklıkları ve parçacıkların yoğunlukları hesaplamaktadır. Bu model ile hesaplanan parametreler IONOLAB-RAY algoritmasında, 3.51'de verilen çarpışma frekansının hesaplanmasında ihtiyaç duyulan parametreleri sağlamaktadır.

Bir sonraki bölümde IONOLAB-RAY algoritmasının yapısı, özellikleri, algoritma ile çeşitli senaryolar üzerinden elde edilen bulgular ve literatürdeki benzer algoritmalar ile karşılaştırmalar anlatılmaktadır.

## 5. IONOLAB-RAY ALGORİTMASI

Bu tez kapsamında geliştirilen dalga yayılım modelinin uygulanması amacıyla IONOLAB-RAY adı verilen bir algoritma tasarlanmış ve MATLAB ortamında kodlanmıştır. IONOLAB-RAY algoritması 3 boyutlu küresel hücre yapısıyla modellenmiş iyonkürede, Snell yasasına dayanan ışın izleme yapmaktadır. Dalganın yayılım yolununun yanı sıra, zayıflama katsayısı, zaman gecikmesi, grup hızı, faz hızı ve Faraday dönmesi parametrelerini de hesaplamaktadır.

IONOLAB-RAY akademik araştırma amacı doğrultusunda geliştirilmiş olup gelecek çalışmalarda yazılım aracı olacak şekilde düzenlenmeye uygundur. IONOLAB-RAY algoritması kullanıcıya kolaylık sağlayan bir yapıya sahiptir. İyonkürenin fiziksel parametrelerinin çoğu algoritmada gömülü olarak bulunan IRI-Plas yazılım aracı ile hesaplanmaktadır. IRI-Plas'a beslenebilen TE<sub>1</sub> ölçüm verileri de algoritma tarafından internet aracılığı ile otomatik olarak sağlanmaktadır. Algoritma kullanıcı tarafından komut satırından belirli komutlarla çalıştırılmaktadır.

IONOLAB-RAY algoritması modüler yapıya sahiptir. IRI-Plas'ın yanı sıra iyonkürenin yapısı gereği ihtiyaç duyulan parametreler modüller aracılığı ile hesaplanmaktadır. Böylece ihtiyaç halinde algoritma, tamamına müdehale etmeye gerek kalmadan, modüller üzerinden yenilenebilmekte ve iyileştirilebilmektedir. Tez kapsamında modellerin geliştirilmesi sürecinde de modüllerde yenileme ve iyileştirmeler yapılmıştır.

IONOLAB-RAY araştırma geliştirme çalışmalarına katkı sağlamak için uygundur. Algoritmanın koşumu sırasında hesaplanan kritik parametreler kayıt edilmekte ve MATLAB'ın fonksiyonları sayesinde grafikleri çizdirilebilmektedir. Farklı senaryoların çıktıları grafikler üzerinden karşılaştırılabilmekte ve kayıt edilen parametreler üzerinden analiz edilebilmektedir.

IONOLAB-RAY algoritması koşum süresi ve işlem yükü açısından ekonomiktir. Algoritmada işlem yükünü artıran etki iyonküre parametrelerinin hesaplanmasından kaynaklanmaktadır. Koşum süresi ve işlem yükü ilgi alanı bölgenin çö-

zünürlüğü ile orantılıdır. Bu konuda avantaj sağlamak için algoritma ön işlem ve ana işlem olmak üzere iki parça olarak tasarlanmıştır. Senaryodan bağımsız olan hesaplamalar ön işlem fazında önceden yapılmakta ve kaydedilmektedir. Ayrıca yerküre üzerinde çok geniş bir bölge üzerinde bir çalışma yapılmak istendiğinde enlem ve boylamda çözünürlüğün yüksek tutulması işlem yükünü artırmaktadır. Bu duruma alternatif olarak enlem ve boylamda aradeğerleme imkanı sağlanmaktadır. Böyle bir durumda kullanıcı ilgi alanı bölgede enlem ve boylam çözünürlüğünü düşük tutabilmekte ve detay seviyesini halen yüksek tutabilmek için büyüyen hücre içerisinde aradeğerleme uygulamayı seçebilmektedir. Intel(R) Core(TM) i5-2400 CPU @3.10 GHz, 4 GB bellek özelliklerinde bir bilgisayar kullanılarak, 10 enlem, 10 boylam ve 90 yükseklik adımından oluşan 3B küresel hücre yapısı ile verilen tarih ve zamana karşılık ön koşum süresi 15 saniyeden kısa sürmektedir. Sıradan ve sıradışı dalganın dalga yayılım yollarının hesaplandığı ana koşum süresi ise 1 saniyeden kısa sürmektedir.

IONOLAB-RAY kullanıcıya çoklu koşum imkanı sağlamaktadır. Birden fazla tarih ve saat için, girdi parametrelerinin birden fazla değeri için tek seferde algoritma çalıştırılabilmektedir. Çıktılar belli bir düzen içinde kullanıcıya sunulmaktadır.

Bu bölümde IONOLAB-RAY ile koşturulan ve çıktıları grafikler ile sunulan senaryolarda, kaynak konumu olarak Ankara, İzmir, Kampala ve Saint Petersburg seçilmiştir. Bu şehirler için girilen enlem boylam bilgileri Çizelge 5.1'de verilmektedir.

Bölüm 5.1'de IONOLAB-RAY algoritmasının yapısı ve akışı anlatılmaktadır. Algoritmanın girdi ve çıktı parametreleri ile formatları verilmektedir. IONOLAB-RAY algoritmasının kullanım konsepti Bölüm 5.2'de anlatılmaktadır. Bölüm 5.3'de girdilerin değişimine karşılık elde edilen bulgular değerlendirilmektedir. Bölüm 5.4'de ise IONOLAB-RAY ile literatürdeki benzer amaçlar ile yapılan çalışmalar karşılaştırılmaktadır. IONOLAB-RAY'in dalga parametrelerinin hesaplanması amacıyla geliştirilen modülleri ile ilgili bilgiler Bölüm 6'de sunulmaktadır.

Çizelge 5.1. Senaryolarda kaynak konumları.

Şehir	Enlem	Boylam
Ankara	39,93°K	32,87°D
İzmir	38,42°K	27,13°D
Kampala	0,31°K	32,60°D
Saint Petersburg	59,93°K	30,30°D

### 5.1 IONOLAB-RAY Algoritmasının Yapısı

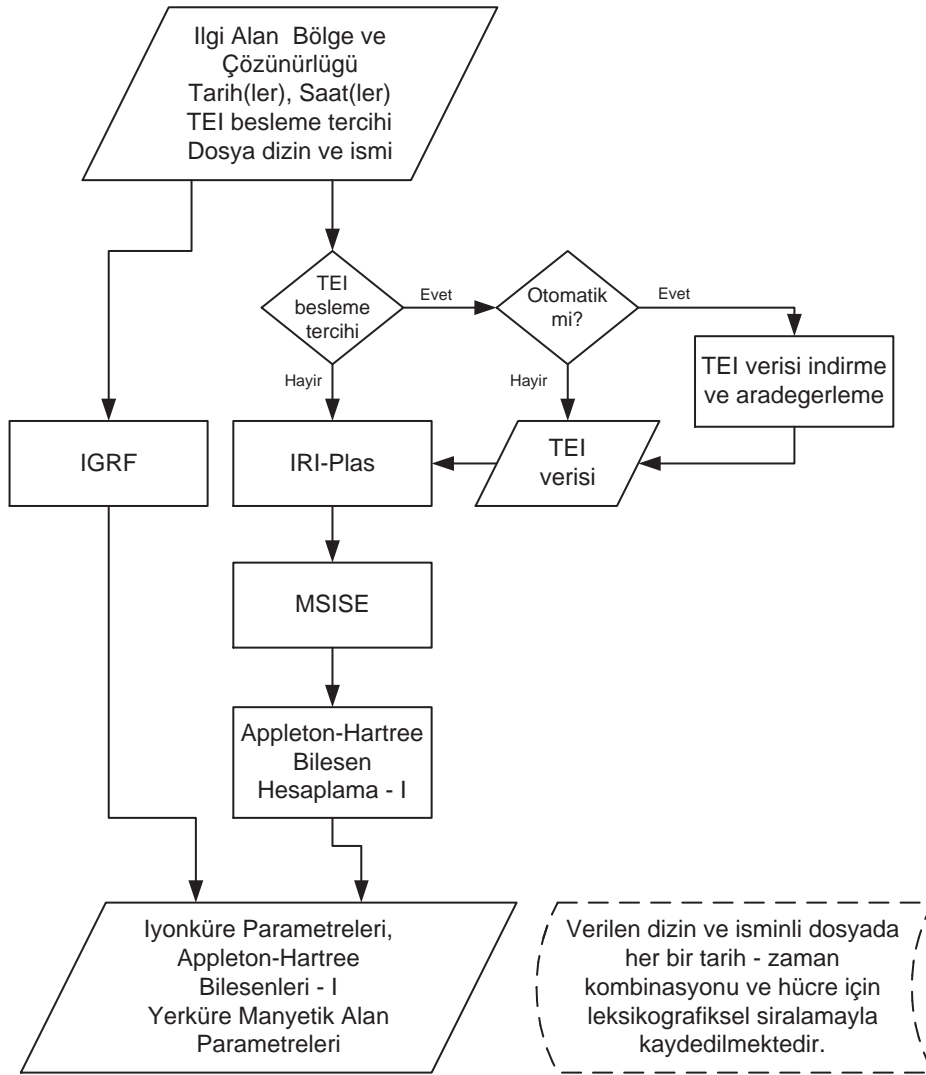
IONOLAB-RAY algoritması, iyonkürede dalga yayılım yolunu hesaplamak üzere iki temel bileşen ve dalga parametrelerini hesaplamak üzere beş ek modülden oluşmaktadır. Bu bölümde IONOLAB-RAY'ın iki ana bileşeninin yapısı ve işleyisi anlatılmaktadır.

IONOLAB-RAY, ön işlem ve ana işlem olmak üzere iki temel bileşenden oluşmaktadır. Ön işlem ile bir anlamda iyonküre modeli oluşturulmakta, ana işlem ile de ışın izleme uygulanmaktadır. Ön işlem kullanıcı tarafından belirlenmiş konum ve zaman verilerine karşılık iyonküreyi yapılandırmakta ve gereken verileri bir dosyaya kaydetmektedir. Ana işlem tarafından bu dosya çağırılarak yapılandırılan iyonküre üzerinden senaryo koşumları sağlanmaktadır.

Akış şeması Şekil 5.1'de verilen ön işlem fazında kullanıcı tarafından öncelikle yerküre üzerinde ilgi alanı bir bölge belirlenmektedir. İlgi alanı bölge enlem, boylam ve yükseklik sınırları ile tanımlanmaktadır. Kullanıcı tarafından bu bölgede 3 boyutlu küresel hücre yapısı oluşturmak üzere enlem, boylam ve yükseklik sınırlarının arasının nasıl adımlar ile bölüneceği girilmektedir. Adım boyutları eşit ya da farklı olabilmekte ve kullanıcının amacına göre, ilgi alanı bölgenin bazı kısımlarında çözünürlük yüksek, bazı kısımlarda ise düşük tutulabilmektedir. İyonkürenin yapılandırılması için tarih ve saat girilmektedir. Birden fazla tarih ve saat girilebilmektedir. Kullanıcı tarafından ayrıca IRI-Plas'a



TEİ verisi besleme tercihi belirtilmektedir. Ön işlem sonucunda girilen çözünürlükteki ilgi alanı bölgenin her bir tarih - saat eşleşmesine karşılık iyonkürenin 3 boyutlu küresel hücre modeli oluşturulmaktadır. Ön işlem aşamasında ana işlemde ihtiyaç du IGRF ve MS Her bir hücre için iyonküre parametreleri ve diğer önceden hesaplanabilecek parametreler hesaplanmakta ve kullanıcı tarafından verilen isim ile dosyaya kaydedilmektedir.



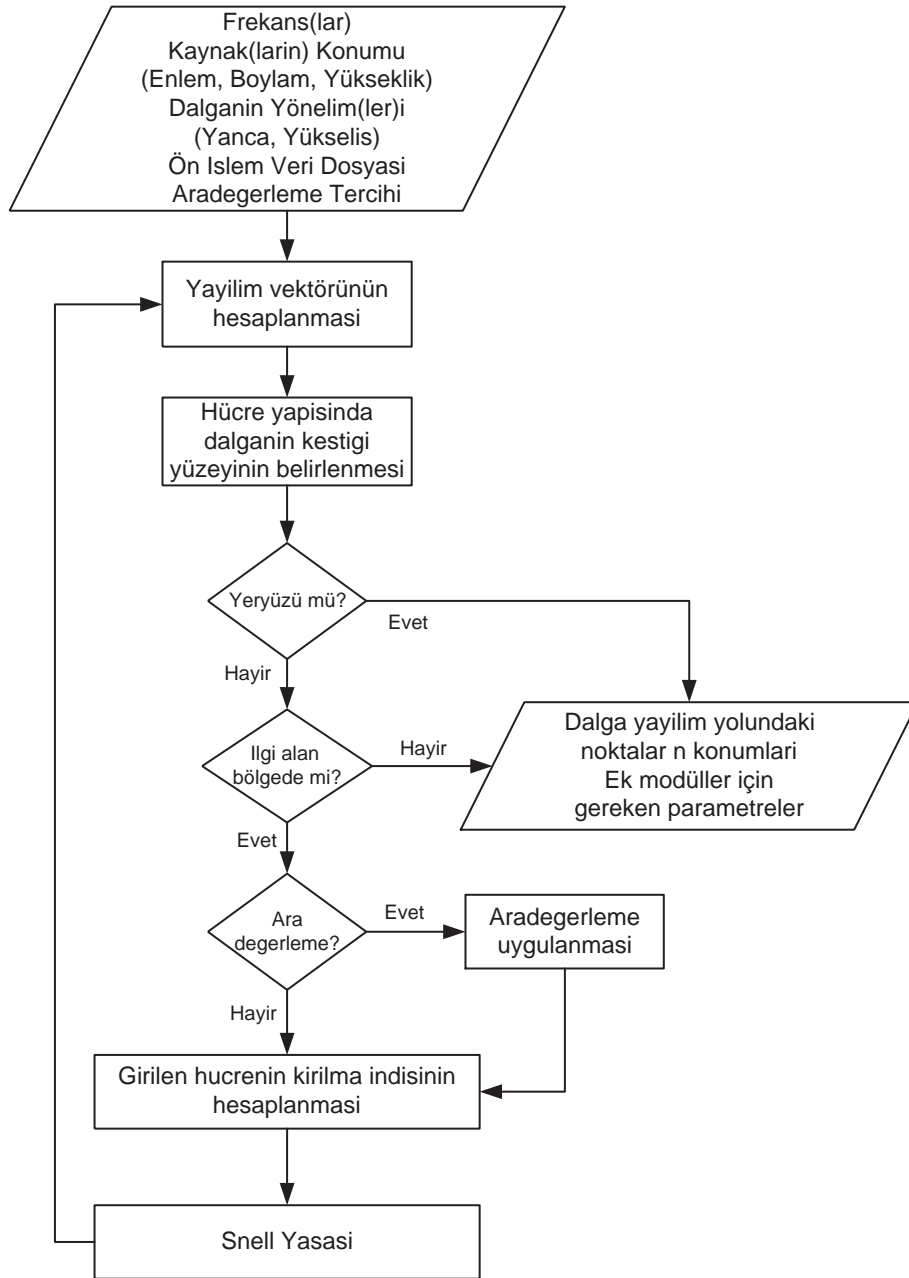
Şekil 5.1. Ön İşlem Akış Şeması.

Ön işlem aşamasında hesaplanan parametreler, sonrasında istenilen senaryo koşullarında ana işlem aşamasında kullanılmak üzere belli bir sıralama ile dizilmektedir. Bu sıralama için leksikografiksel sıralama yöntemi kullanılmıştır.

Tarih, saat, enlem, boylam ve yükseklik değişkenleri üzerinden sıralama yapılmaktadır. Her bir tarih, saat, enlem, boylam ve yüksekliğe karşılık elde edilecek parametre değerleri kadar leksikografiksel indisleme kuralına göre birer birer yerleştirilmektedir [82]. Ana işlem aşamasında herhangi bir girdi setine karşılık verinin kaç numaralı sıraya yazıldığı yani leksikografiksel indise sahip olduğu bilindiğinden ilgili değer çekilerek kullanılabilir.

Ana işlemde kullanıcı daha önce çalıştırılmış ve çıktı dosyası kaydedilmiş ön işlemde belirlenen ilgi alanı bölge dahilinde, girilen tarih ve zaman için dalga yayılım senaryolarını koşturabilmektedir. Dalga yayılım senaryosu dalganın frekansı, kaynağın enlem, boylam ve yükseklik cinsinden konumu, kaynaktan çıkan dalganın yükseliş ve yanca yönelim açıları girilmektedir. Bu girdilere ek olarak ana işlemde, ön işlem safhasında oluşturulan 3 boyutlu küresel hücre modelinin enlem ve boylamdaki sınırlarında, kullanıcı tarafından girilen orandaki komşuluklarında kırılma indisi parametreleri için aradeğerleme olanağı sunulmaktadır.

Akış şeması Şekil 5.2'de verilen ana işlem, sıradan ve sıradışı dalga yayılımını hesaplamak üzere iki fonksiyondan oluşmaktadır. Sıradan ve sıradışı için kaynaktan çıkan dalganın iyonküreye girdiği nokta tespit edilmekte ve bu noktadan itibaren dalga 3B küresel hücre yapısında adım adım ilerletilmektedir. Dalganın içinde yol aldığı tüm hücreler için adım adım Eş. 3.46 ve 3.47 ile verilen kırılma indisi hesaplanmaktadır. Her bir adımda dalganın keşiştiği yanal ya da radyal eksendeki teğet yüzeyde Snell yasası uygulanmaktadır. Bu işlemler sıradan ve sıradışı dalga için dalga yeryüzüne ulaşana ya da ilgi alanı bölgenin dışına çıkana kadar devam etmektedir.



Şekil 5.2. Ana İşlem Akış Şeması.

### 5.1.1 IGRF Modülü

## 5.2 IONOLAB-RAY Algoritmasının Kullanımı

Bu bölümde IONOLAB-RAY algoritmasının ve fonksiyonlarının kullanımı için girilmesi gereken komutların yapısı, girdi ve çıktı parametrelerinin veri tipleri

ve değer sınırları anlatılmaktadır. IONOLAB-RAY, ön işlem ve ana işlem olmak üzere iki temel bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler sırasıyla '*fpreprocess*' ve '*fmainprocess*' fonksiyonları ile koşturulabilmektedir. Ana işlem sonrasında senaryoya karşılık elde edilen çıktılar kullanılarak '*fraypathplot*' isimli grafik çizdirme fonksiyonu ile dalga yayılım yolu izdirilebilmektedir. Bu fonksiyonun çoklu kullanımı ile karşılaştırma amaçlı çok sayıda senaryo çıktısı aynı grafik üzerinde üst üste izdirilebilmektedir. Ana işlem sonrası elde edilen veriler ile zayıflama katsayısı, faz hızı, grup hızı, zaman gecikmesi ve Faraday dönmesi dalga parametrelerinin hesaplanması için geliştirilen fonksiyonların kullanım bilgileri Bölüm 6'de anlatılmaktadır.

### 5.2.1 n işlem fonksiyonunun kullanımı

Bu fonksiyon ile istenilen çözünürlükte tanımlanmış ilgi alanı coğrafi bölgede (region of interest), istenilen tarih ve saat için iyonküre parametreleri ve senaryoya göre değişim göstermeyen parametreler hesaplanarak kaydedilmektedir. Bu fonksiyonun kullanımı için girdi komutu

*fpreprocess(lat, lon, height, date\_char, time\_char, TEC\_data, file\_pre\_data)*

olarak verilmektedir. *fpreprocess* fonksiyonunu kullanmak için komut satırına girilecek parametreler ile ilgili bilgiler izelge 5.2'de verilmektedir.

Enlem, boylam ve yükseklik dizileri küçükten büyüğe sıralı olarak girilmelidir. Kullanıcı tanımlı TEİ verisi besleme için dosya eğer algoritmanın koşacağı dizinde değil ise dosyanın bulunduğu dizin dosya adının başına eklenmelidir. Benzer şekilde ön işlem sonra parametrelerin kaydedileceği dosya algoritmanın çalıştığı dizine kaydedilmek isteniyor ise yalnız dosya adı, farklı bir dizine kaydedilmek isteniyor ise dizin adresi ve dosya adı birlikte yazılmalıdır. Ana işlem fonksiyonunun koşturulabilmesi için gereken tüm parametreler komut satırında belirtilen dosyaya kaydedilmektedir. Bu parametreler, iyonkürenin 3B küresel hücre modelindeki her bir hücre, tarih ve saat için leksikografiksel sıralama ile, elektron yoğunluğu, sıcaklık, nötr moleköl yoğunluğu, leksikografiksel

Çizelge 5.2. Ön işlem fonksiyonunun girdi parametreleri.

Parametre	Açıklama	Birim	Format
<i>lat</i>	Enlem dizisi, ilgi alanı bölgenin enlem sınırlarını ve çözünürlüğünü tanımlar.	°	$[-90, 90] \in \mathfrak{R}$ 0°: Ekvator 90°: Kuzey kutbu -90°: Güney kutbu
<i>lon</i>	Boylam dizisi, ilgi alanı bölgenin boylam sınırlarını ve çözünürlüğünü tanımlar.	°	$[0, 360) \in \mathfrak{R}$ 0°: Greenwich Doğuya doğru artan
<i>height</i>	Yükseklik dizisi, ilgi alanı bölgenin yükseklik sınırlarını ve çözünürlüğünü tanımlar.	km	$[80, 20200] \in \mathfrak{R}$
<i>date_char</i>	Tarih veya çoklu koşumlar için tarih dizisi	-	<i>gg - aaa - yyyy</i> Ay İngilizce karşılığının ilk üç harfi ile yazılmaktadır
<i>time_char</i>	Saat veya çoklu koşumlar için saat dizisi	-	<i>ss : dd</i> GS standardında verilmektedir
<i>TEC_data</i>	TEİ verisi ile besleme yapılması seçimi	-	'no': Besleme yok 'yes': Oto. besleme 'TEİveridosyasi': Kullanıcı tanımlı veri ile besleme
<i>file_pre_data</i>	Ön işlem sonrası parametrelerin kaydedileceği adres ve dosya adı	-	'kayitdosyasi'

sıralamanın parametrik değerleri, toplam iyon molekül kütle yoğunluğu, yer-kürenin manyetik alanının büyüklüğü ve vektör bileşenleri ile birlikte ön işlem girdi parametreleri olarak sıralanabilmektedir.

### 5.2.2 Ana İşlem fonksiyonunun kullanımı

Ana koşumda, ön koşumun yapıldığı tarih ve saatlere, çoklu olarak girilebilecek frekans, kaynak konumu, dalğanın yayılım yükseliş ve yanca açılarına karşılık dalga yayılım yolu hesaplanmaktadır. Her bir girdi seti bir senaryoyu temsil etmektedir. Çoklu koşum yapıldığında çok sayıda senaryo benzetimi gerçekleştirilmektedir. Ön işlem koşumu ile kaydedilmiş olan dosya ile önceden hesaplanmış iyonküre parametreleri girdi olarak kullanılmaktadır.

Bu fonksiyonun kullanımı için girdi komutu

$[ord, exord] = fmainprocess(tfrequency, tlatitude, tlongitude, theight, televation, tazimuth, file\_pre\_data, interp\_cond)$

olarak verilmektedir. Sıradan dalga için elde edilen çıktılar *ord*, sıradışı dalgalar için *exord* değişkeni yerine kullanıcının gireceği değişken ismi ile tutulmaktadır. *fmainprocess* fonksiyonunu kullanmak için komut satırına girilecek parametreler ile ilgili bilgiler Çizelge 5.3'de verilmektedir.

Kaynaktan çıkan dalğanın frekansı istenilen değerin girilmesi algoritmik olarak mümkündür, ancak algoritmada uygulanan geometrik optik yaklaşımının ve Appleton-Hartree formülünün geçerli olduğu frekanslar anlamlı sonuçlar vermektedir. Kısa dalga bandında 3 - 30 MHz aralığında değerler girilebilir. Dizi olarak girilen kaynağın konumunun enlem, boylam ve yüksekliği istenilen sıralama ile girilebilmektedir. Çıktılar da girdilerin sıralamasına göre dizilerek verilmektedir.

Aradeğerleme tercihi parametresi, ışın izleme uygulanırken dalğanın hücrelerin kesişim bölgelerinin yakınlarına denk gelmesi halinde, kırılma indisi hesabında dalğanın sınırınının yakınına denk geldiği hücrenin parametrelerinin ye-

Çizelge 5.3. Ana işlem fonksiyonunun girdi parametreleri.

Parametre	Açıklama	Birim	Format
<i>tfrequency</i>	Kaynaktan çıkan, dalganın frekansı, çoklu koşulda frekans dizisi	MHz	$\in \mathfrak{R}$
<i>tlatitude</i>	Kaynağın konum enlemi veya çoklu koşulda enlem dizisi	$^{\circ}$	$[-90, 90] \in \mathfrak{R}$ 0°: Ekvator 90°: Kuzey kutbu -90°: Güney kutbu
<i>tlongitude</i>	Kaynağın konum boylamı veya çoklu koşulda boylam dizisi	$^{\circ}$	$[0, 360) \in \mathfrak{R}$ 0°: Greenwich Doğuya doğru artan
<i>theight</i>	Kaynağın konum yüksekliği veya çoklu koşulda yükseklik dizisi	m	$[0, 80000) \in \mathfrak{R}$
<i>televation</i>	Dalganın kaynaktan çıkış doğrultusu yükseliş açısı veya çoklu koşulda yükseliş açısı dizisi	$^{\circ}$	$(0, 90) \in \mathfrak{R}$ yataydan başucu yönüne artan
<i>tazimuth</i>	Dalganın kaynaktan çıkış doğrultusu yanca açısı veya çoklu koşulda yanca açısı dizisi	$^{\circ}$	$[0, 360) \in \mathfrak{R}$ 0°: Kuzey 90°: Doğu Kuzeyden doğuya artan
<i>file_pre_data</i>	Ön işlem sonrası parametrelerin kaydedildiği adres ve dosya adı	-	'kayitdosyasi'
<i>interp_cond</i>	Aradeğerleme tercihi	-	$[0, 1] \in \mathfrak{R}$ 0: Uygulanmaz 1: Tüm bölgeye uygulanır.

rine o sınırın komşusu olan hücrelerin parametrelerinin aradeğerlemesinin kullanımını sağlamaktadır. Bu aradeğerleme parametrelerin katkılarını mesafeye göre ağırlıklandırılarak yapılmaktadır. Ara değerlendirme tercihi parametresinin değeri ise dalganın hücrenin sınırından ne kadar uzağına düştüğünde aradeğerleme uygulanacağını ifade etmektedir. Oransal olarak 0 tam kesişim çizgisini, 1 ise hücrenin merkezini temsil etmektedir. Örneğin parametre 0.2 girildiğinde, dalga hücrenin merkezi ile kenarı arasındaki uzunluğun % 20'sinin içine düştüğünde aradeğerleme uygulanacağı anlamına gelmektedir. Böylece ilgi alanı bölge çok geniş olduğunda ve koşum süresinden kazanmak amacı ile bölgenin enlem - boylam çözünürlüğü düşük seçildiğinde, hücrenin sınır bölgesine denk gelen dalga için kendisine uzak olan hücre merkezi için hesaplanmış değerlerin yerine komşu hücreler ile aradeğerlenmiş değerlerin kullanılması avantajı sağlanmaktadır.

Ana işlem fonksiyonu diziler halinde parametre girdilerine karşılık çoklu koşumların yapılabilmesini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Herbir girdi setine karşılık çıktıların kaydedilmesi için noktalı veri yapısı kullanılmaktadır. Bu yapı

```
ord.freq(freq_i).trans_lat(tlat_i).trans_long(tlong_i).trans_height(theight_i).  
trans_elev(telev_i).trans_azi(tazi_i).output_parameter
```

```
exord.freq(freq_i).trans_lat(tlat_i).trans_long(tlong_i).trans_height(theight_i).  
trans_elev(telev_i).trans_azi(tazi_i).output_parameter
```

olarak tasarlanmıştır. Çıktıların hangi senaryo girdilerine karşılık elde edildiğinin kolaylıkla anlaşılabilmesi için, girdi seti de çıktı olarak verilmektedir. Bu parametreler Çizelge 5.4'de verilmektedir. Sıradan ve sıradışı dalga yayılımına karşılık '*output\_parameter*' olarak sunulan çıktı parametre seti Çizelge 5.5'de verilmektedir.

Dalganın yeryüzüne geri dönüp dönmemesi durumunun belirteci 0 değerini aldığı dalganın yeryüzüne döndüğü ifade edilmektedir. Belirtecini farklı bir değer alması dalganın yeryüzüne dönmeden ilgi alanı bölgenin dışına çıktığı



Çizelge 5.4. Ana işlem fonksiyonunun girdi parametrelerinin çıktı olarak kaydedilmesi.

Sıradan Dalga Parametre	Sıradışı Dalga Parametre	Açıklama
<i>ord.tfrequency</i>	<i>exord.tfrequency</i>	Dalganın frekans girdileri
<i>ord.tlatitude</i>	<i>exord.tlatitude</i>	Kaynak konumu enlem girdileri
<i>ord.tlongitude</i>	<i>exord.tlongitude</i>	Kaynak konumu boylam girdileri
<i>ord.theight</i>	<i>exord.theight</i>	Kaynak konumu yükseklik girdileri
<i>ord.televation</i>	<i>exord.televation</i>	Dalganın yükseliş açısı girdileri
<i>ord.tazimuth</i>	<i>exord.tazimuth</i>	Dalganın yanca açısı girdileri
<i>ord.daytime</i>	<i>exord.daytime</i>	Senaryoların sıralı tarih ve saatleri
<i>ord.type</i>	<i>exord.type</i>	Çıktı verisinin hangi tip dalgaya karşılık geldiği

ve çıkarken hangi yükseklik adımı olduğu verilmektedir.

Ana işlem fonksiyonunun çıktıları ışın yayılım yolunun çizdirilmesinde ve zayıflama, faz hızı, grup hızı, zaman gecikmesi ve Faraday dönmesi parametrelerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır.

### 5.2.3 Dalga Yayılım Yolu Grafiği Çizdirme Fonksiyonu

Ana işlem aşamasında oluşturulan senaryolar için dalga yayılım yolu grafiklerinin otomatik olarak çizdirilebilmesi için '*fraypathplot*' fonksiyonu geliştirilmiştir. Bu fonksiyon ile dalga yayılım yolu kaynağın konumunu merkez kabul eden DKY yerel koordinat sisteminde çizdirilmektedir. Fonksiyon

```
fraypathplot(data, freq_i, tlat_i, tlong_i, theight_i, telev_i, tazi_i,
datetime_i, formcolor, width, titletext)
```

komutu ile oluşturulabilmektedir. Bu komutta gereken girdi parametreleri Çi-

Çizelge 5.5. Ana işlem fonksiyonunun çıktı parametreleri.

Parametre	Açıklama	Birim
$p_{LLA}$	EBY koordinatlarda, dalga ile hücrelerin sınır yüzeylerinin kesiştiği noktalar	(E, B, Y): (°, °, m)
$p_{ECEF}$	YMYS koordinatlarda, dalga ile hücrelerin sınır yüzeylerinin kesiştiği noktalar	(x, y, z): (m, m, m)
$p_{ENU}$	DKY koordinatlarda, dalga ile hücrelerin sınır yüzeylerinin kesiştiği noktalar	(x, y, z): (m, m, m)
$n_{full}$	Dalganın geçtiği her bir hücrenin kırılma indisi	-
$n_{real}$	Dalganın geçtiği her bir hücrenin kırılma indisinin gerçel kısmı	-
$n_{img}$	Dalganın geçtiği her bir hücrenin kırılma indisinin sanal kısmı	-
$appleton_X$	Dalganın geçtiği her bir hücre için Appleton-Hartree formülünün X bileşeni	-
$appleton_Y$	Dalganın geçtiği her bir hücre için Appleton-Hartree formülünün Y bileşeni	-
$appleton_Z$	Dalganın geçtiği her bir hücre için Appleton-Hartree formülünün Z bileşeni	-
$theta_{BK}$	Dalganın, geçtiği hücrelerin sınır yüzeyleri ile kesiştiği noktalarda, yerkürenin manyetik alan vektörü ile arasındaki açı	rad
$n_{points}$	$n_{points}(1,1)$ : Dalganın, sınır yüzeyleri ile kesiştiği noktaların sayısı $n_{points}(1,2)$ : Dalganın yeryüzüne geri dönüp dönmemesi durumunun belirteci, yükseklik indisi	-

zelge 5.6'de verilmektedir. Girdi parametreleri yayılım yolu çizdirilmek istenen senaryonun parametrik indisleri üzerinden girilmektedir. Çizelgede '*boyut(parametre)*' ifadesi dizi olarak tanımlanan değişken parametrenin eleman sayısını ifade etmektedir.  $\mathbb{N}$  ise doğal sayılar kümesini göstermektedir.

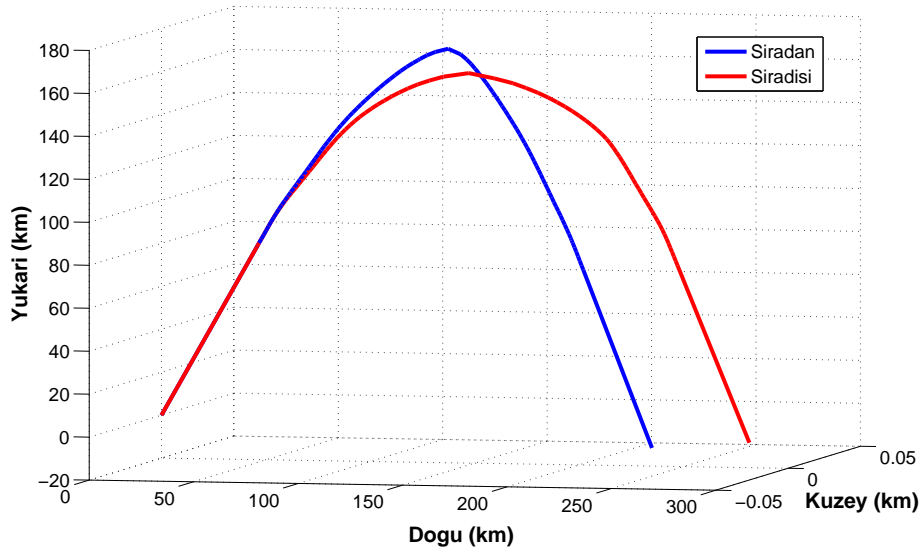
### **5.3 IONOLAB-RAY Algoritması ile Elde Edilen Bulgular**

IONOLAB-RAY algoritması kullanılarak girdi parametrelerindeki değişime karşılık sıradan ve sıradışı dalganın yayılım yolu çıktıları elde edilmektedir. Bu bölümde önemli girdi parametrelerinin değişiminin dalga yayılım yolu üzerindeki etkileri gözlenmektedir. İyonkürenin yapısı gereği senaryo girdi parametrelerinin değişimine karşılık dalga yayılım yolunda ciddi farklılıklar meydana gelmektedir.

Grafiklerde sıradan ve sıradışı dalga için farklı dalga yayılım yolu elde edilmektedir. İyonkürenin verilen zamandaki durumuna göre sıradan ve sıradışı dalga birbirine yakın yollardan yayılabileceği gibi, çok farklı yolları da izleyebilmektedir. Bu durumun örnekleri bu bölümde verilen çeşitli grafiklerde gözlenebilmektedir. Şekil 5.3'te sıradan ve sıradışı dalga yayılım yolu grafiklerine bir örnek verilmektedir.

Çizelge 5.6. Dalga yayılım yolu grafiğini çizdiren modülün girdi parametreleri.

Parametre	Açıklama	Format
<i>data</i>	<i>fmainprocess</i> ile hesaplanan ve yayılım yolu çizdirilmek istenen dalga çıktısının adı	-
<i>freq_i</i>	Dalga'nın yayılma frekansının <i>fmainprocess</i> fonksiyonuna girdi olan <i>tfrequency</i> dizisindeki indisi	$[1, \text{boyut}(tfrequency)] \in \mathbb{N}$
<i>tlat_i</i>	Kaynak konumunun enleminin <i>fmainprocess</i> fonksiyonuna girdi olan <i>tlatitude</i> dizisindeki indisi	$[1, \text{boyut}(tlatitude)] \in \mathbb{N}$
<i>tlong_i</i>	Kaynak konumunun boylamının <i>fmainprocess</i> fonksiyonuna girdi olan <i>tlongitude</i> dizisindeki indisi	$[1, \text{boyut}(tlongitude)] \in \mathbb{N}$
<i>theight_i</i>	Kaynak konumunun yüksekliğinin <i>fmainprocess</i> fonksiyonuna girdi olan <i>theight</i> dizisindeki indisi	$[1, \text{boyut}(theight)] \in \mathbb{N}$
<i>telev_i</i>	Dalga'nın yöneliminin yükseliş açısının <i>fmainprocess</i> fonksiyonuna girdi olan <i>televation</i> dizisindeki indisi	$[1, \text{boyut}(televation)] \in \mathbb{N}$
<i>tazi_i</i>	Dalga'nın yöneliminin yanca açısının <i>fmainprocess</i> fonksiyonuna girdi olan <i>tazimuth</i> dizisindeki indisi	$[1, \text{boyut}(tazimuth)] \in \mathbb{N}$
<i>datetime_i</i>	Tarih ve saat ikilisinin sıralaması <i>fmainprocess</i> fonksiyonunun çıktısı olan <i>daytime</i> değişkeni ile verilmektedir. Bu dizide ilgili tarih ve saate karşılık gelen indis	$[1, \text{boyut}(daytime)] \in \mathbb{N}$
<i>formcolor</i>	Grafiğin çizdirileceği renk ve çizgi formu	Örneğin, kırmızı düz çizgi için '-r' girilebilir.
<i>width</i>	Grafik çizgisinin kalınlığı	$\mathbb{N}$
<i>titletext</i>	Grafiğe verilecek başlık	'Grafik başlığı'



Şekil 5.3. Sıradan ve sıradışı dalga yayılım yolu, 21 Aralık 2015, 10:00 GS, 6 MHz, İzmir, yanca  $90^\circ$ , yükseliş  $60^\circ$ .

Şekil 5.3'te verilen grafikteki senaryoda frekans 6 MHz, kaynağın konumu İzmir (38,42 K, 27,13 D), dalganın yöneliminin yanca açısı  $90^\circ$ , yükseliş açısı  $60^\circ$ , tarih 21 Aralık 2015, saat 10:00 GS olarak seçilmiştir.

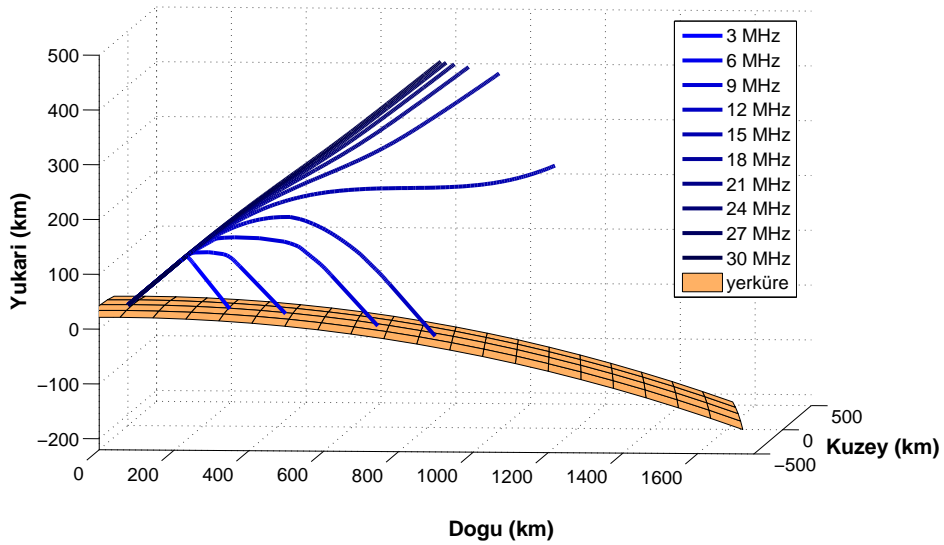
Bu bölümde IONOLAB-RAY ile elde edilen bulgularda özellikle çoklu senaryolarda, grafiklerin görsel olarak daha anlaşılır olması için sıradan ve sıradışı dalga yayılım yolları ayrı grafiklerde gösterilmektedir. Senaryoların asıl amacında sıradan ve sıradışı dalganın davranışlarının karşılaştırılması söz konusu olduğunda iki tip dalganın grafikleri farklı renklerde aynı şekil üzerinde verilmektedir. Grafiklerde yerküre olarak gösterilen yüzeyler, yerkürenin yuvarlaklığını temsili olarak göstermekte olup yeryüzüne dönen dalgaların daha iyi gözlemlenebilmesi için eklenmiştir. Grafikler kaynak konumunu merkez kabul eden yerel DKY koordinatlarda çizdirilmektedir.

### 5.3.1 Frekansın değişimine karşılık dalga yayılım yolu

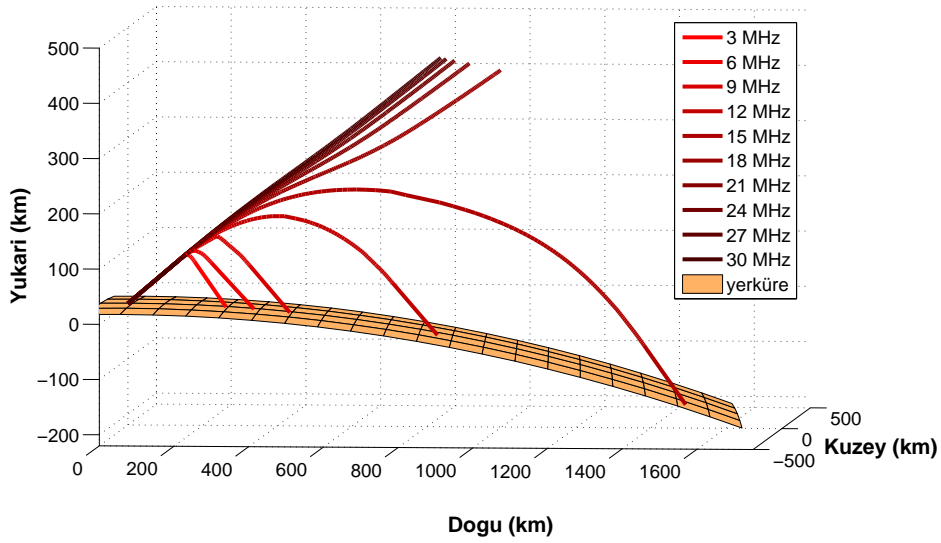
Dalganın yayılım yolu dalganın frekansına bağlıdır. İyonkürenin durumuna bağlı olarak dalganın frekansı dalganın yansımaya uğrayıp uğramayacağı ya da yan-

sıyacağı yüksekliği etkilemektedir. Dolayısıyla yansıyan dalganın yeryüzüne ulaştığı konum da frekansa göre değişmektedir. Kaynaktan gönderilen dalganın alıcıya ulaşabilmesi için iyonkürenin durumuna göre uygun frekans seçimi yapılması gerekmektedir.

Frekans değişimine karşılık dalga yayılım yolundaki değişim sıradan dalga için örnek bir senaryo üzerinden Şekil 5.4, sıradışı dalga için Şekil 5.5'de verilmektedir. Bu grafiklerin elde edilmesi için uygulanan senaryoda kaynak konumu Ankara ( $39,93^{\circ}$  K,  $32,87^{\circ}$  D), tarih 21 Haziran 2015, saat 10:00 GS, yükseliş açısı  $30^{\circ}$  yanca doğu yönünde yani  $90^{\circ}$  olarak seçilmiştir. Ön işlem aşamasında oluşturulan 3B küresel hücre iyonküre modelinde enlem ve boylam adımları  $1^{\circ}$ , yükseklik adımı 2 km olarak seçilmiştir. İyonküre modeli otomatik olarak TEİ verisi ile beslenmiştir. Frekans KD bandını kapsayacak şekilde 3 MHz'lik adımlarla 3 MHz'den 30 MHz'e kadar değişmektedir.



Şekil 5.4. Frekans değişimine karşılık sıradan dalga yayılım yolu, 21 Haziran 2015, 10:00 GS, Ankara, yükseliş  $30^{\circ}$  yanca  $90^{\circ}$ .



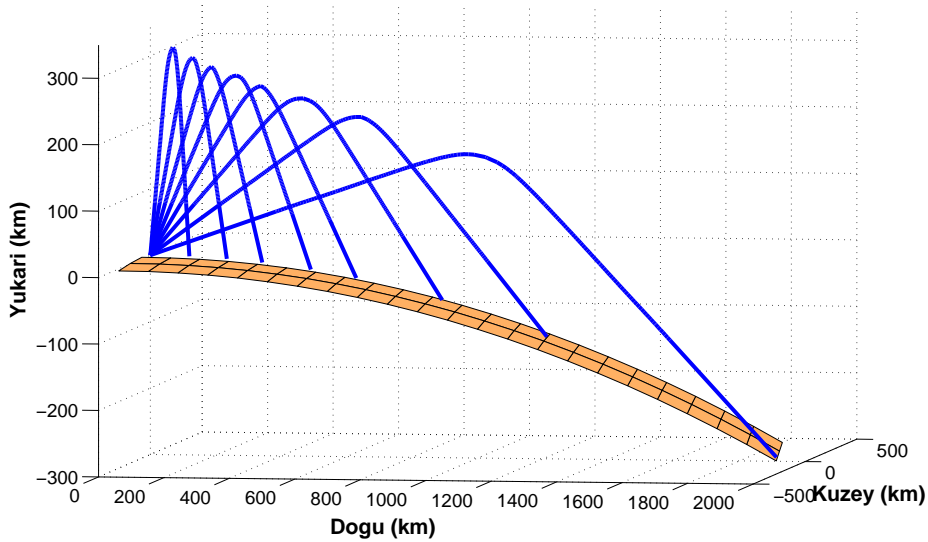
Şekil 5.5. Frekans değişimine karşılık sıradışı dalga yayılım yolu, 21 Haziran 2015, 10:00 GS, Ankara, yükseliş  $30^\circ$  yanca  $90^\circ$ .

Şekil 5.4'de verilen grafikte frekans 12 MHz'e kadar arttıkça sıradan dalga'nın iyonküreden yansıdığı yüksekliği artmakta ve yeryüzünde ulaştığı konum uzaklaşmaktadır. 15 MHz ve üzerinde sıradan dalga iyonküreden yansıma-makta ve kırılarak iyonkürenin dışına çıkmaktadır. Aynı koşullar altında elde edilen sıradışı dalga için Şekil 5.5'de verilen grafikte frekans 15 MHz'e kadar arttıkça sıradan dalga'nın iyonküreden yansıdığı yüksekliği artmakta ve yer-yüzünde ulaştığı konum uzaklaşmaktadır. Daha yüksek frekanslarda sıradışı dalga yeryüzüne dönmemektedir. Grafiklerin çizdirildiği iyonküre koşulları de-ğiştikçe dalga'nın yayıldığı yol da değişmektedir. Bununla birlikte bu bölümde verilen grafikler frekans değişimine karşılık dalga yayılım yolundaki değişim özelliğini yansıtmaktadır.

### 5.3.2 Yükseliş açısının değişimine karşılık dalga yayılım yolu

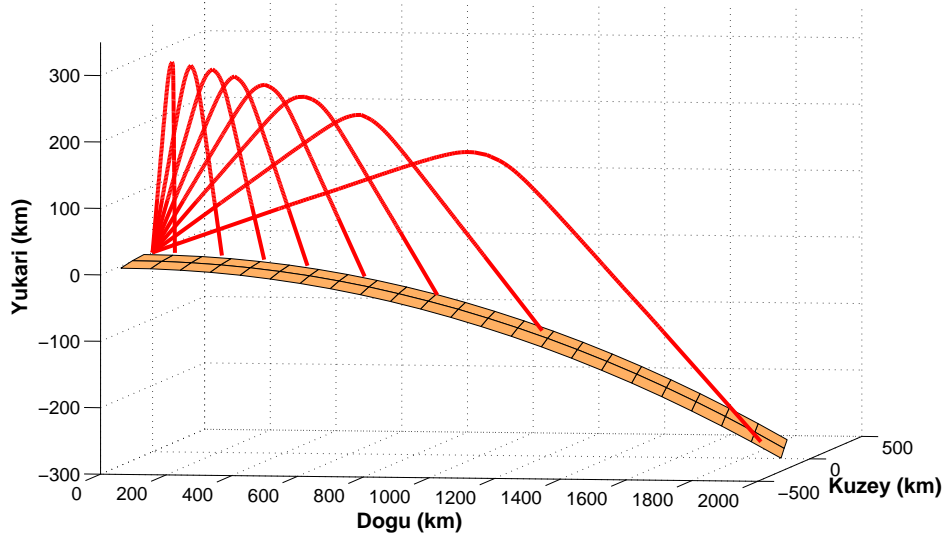
Dalga'nın kaynaktan çıkış doğrultusunun yükseliş açısı dalga'nın yayılım yolunu etkilemektedir. Bu etkiyi göstermek amacıyla örnek senaryolar üzerinden sıra-dan ve sıradışı dalgalar için yükseliş açısının değişimine karşılık dalga yayılım yolu grafikleri çizdirilmiştir. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de verilen grafiklerde sırası

ile sıradan ve sıradışı dalga için 21 Haziran 2015 tarihinde, saat 22:00 GS için elde edilen senaryo çıktıları sunulmaktadır. Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da verilen grafiklerde sırası ile sıradan ve sıradışı dalga için 21 Aralık 2015 tarihinde, saat 10:00 GS için elde edilen senaryo çıktıları sunulmaktadır. Senaryolarda frekans 6 MHz, kaynak İzmir konumunda (38,42 K, 27,13 D), dalganın yöneliminin yanca açısı doğu yönünde yani  $90^\circ$  olup; yükseliş açısı ise  $10^\circ$ 'den  $80^\circ$ 'ye  $10^\circ$ 'lik adımlarla değişim göstermektedir. Ön işlem aşamında ionküre modelinin oluşturulmasında yükseklik 2 km'lik adımlar ile bölünmüş ve TEİ verisi ile besleme yapılmamıştır. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 grafiklerinde yükseliş açısının değişimi kolaylıkla ayırt edilebildiği için dalga yolu grafikleri tüm yükseliş açılarında sıradan dalgada tek mavi renk, sıradışı dalgada tek kırmızı renk kullanılarak gösterilmiştir.

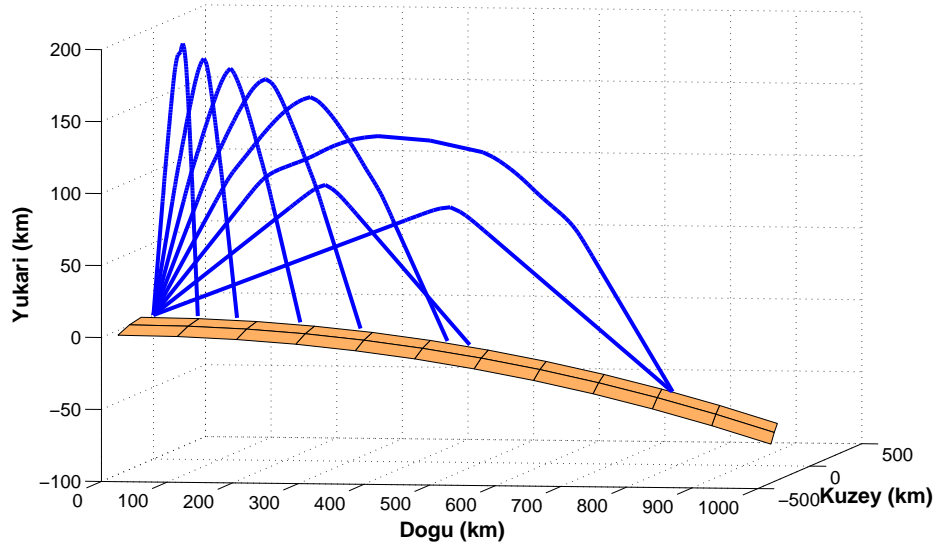


Şekil 5.6. Yükseliş açısı değişimine karşılık sıradan dalga yayılım yolu, 21 Haziran 2015, 22:00 GS, İzmir, 6 MHz, yanca  $90^\circ$ .

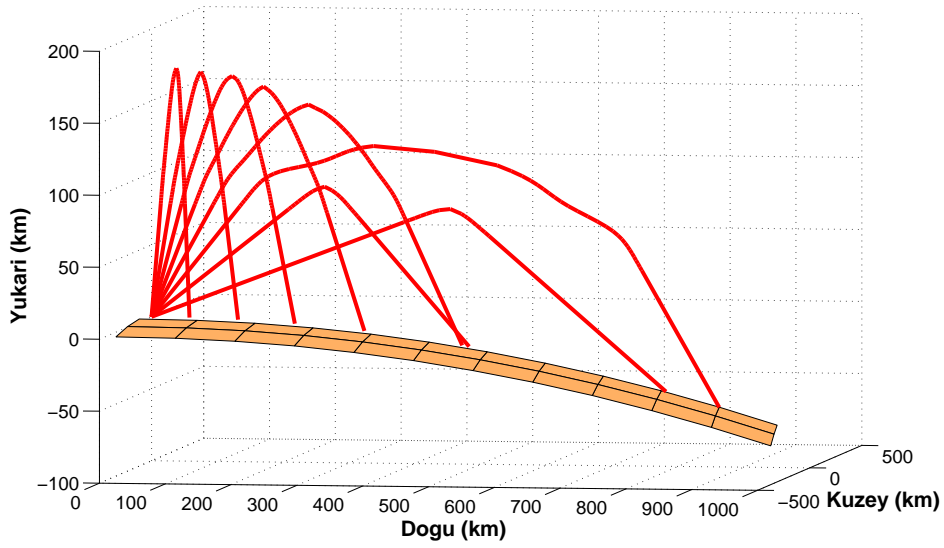




Şekil 5.7. Yükseliş açısı değişimine karşılık sıradışı dalga yayılım yolu, 21 Haziran 2015, 22:00 GS, İzmir, 6 MHz, yanca  $90^\circ$ .



Şekil 5.8. Yükseliş açısı değişimine karşılık sıradan dalga yayılım yolu, 21 Aralık 2015, 10:00 GS, İzmir, 6 MHz, yanca  $90^\circ$ .



Şekil 5.9. Yükseliş açısı değişimine karşılık sıradışı dalga yayılım yolu, 21 Aralık 2015, 10:00 GS, İzmir, 6 MHz, yanca  $90^\circ$ .

Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de verilen grafiklerde yükseliş arttıkça dalga iyonküreden daha dar açı ile yansımakta ve yeryüzünde kaynağa göre daha yakın mesafeye ulaşmaktadır. Yükseliş açısının değişimine karşılık dalga yayılım yolunun genel davranışı Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de verildiği gibi olmakla birlikte iyonkürenin durumuna göre daha farklı davranışlar da gözlenebilmektedir. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 grafiklerinde yükseliş açısı  $30^\circ$  olduğunda dalga yayılım yolu genel trendden farklı bir davranış göstermekte, iyonkürede daha geniş bir açı ile yansımaya uğramakta ve iyonküre içinde yatayda bir miktar yol aldıktan sonra kaynağa göre daha uzakta yeryüzüne ulaşmaktadır.

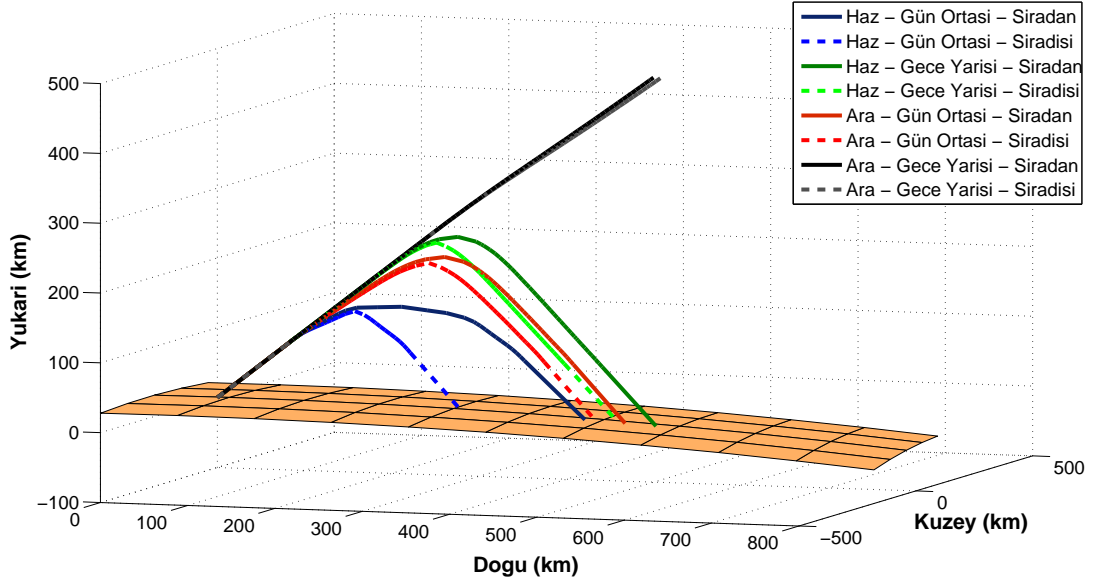
### 5.3.3 Konum tarih ve günün saatindeki değişimine karşılık dalga yayılım yolu

İyonkürenin yapısı Bölüm 2’de anlatıldığı gibi konuma, özellikle enlem farklılıklarına, mevsimlere ve günün saatine göre değişim göstermektedir. Bu değişimin dalga yayılım yolu üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla örnek senaryolar oluşturularak IONOLAB-RAY algoritması ile sıradan ve sıradışı dalga yayılım yolları hesaplanmıştır. Senaryolarda kaynağın konumu için yüksek enlem

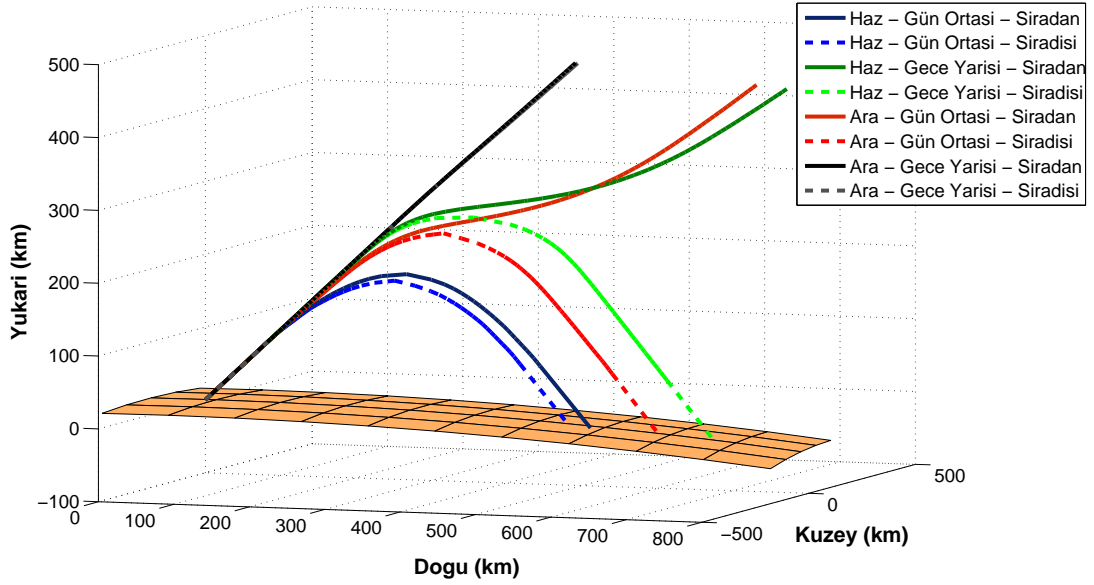
bölgesinde Rusya'nın şehri St-Petersburg ( $59,93^{\circ}$  K,  $30,30^{\circ}$  D), orta enlem bölgede Türkiye'nin başkenti Ankara ( $39,93^{\circ}$  K,  $32,87^{\circ}$  D), ekvatorial bölgede Uganda'nın başkenti Kampala ( $0,31^{\circ}$  K,  $32,60^{\circ}$  D); tarih olarak yaz ve kış gündönümü tarihleri, sırası ile 21 Haziran 2015 ve 21 Aralık 2015, saat olarak da yaklaşık olarak gün ortası ve gece ortasına denk gelen 10:00 GS ve 22:00 GS seçilmiştir. Örnek senaryolarda dalganın frekansı 6 MHz ve 8 MHz, dalganın yayılma doğrultusunun yükseliş açısı  $45^{\circ}$ , yanca açısı  $90^{\circ}$  olarak uygulanmıştır. Bu senaryoların koşturulması için yapılan ön işlem aşamasında iyonküre yükseklikte 5 km, enlem ve boylamda ise  $1^{\circ}$  adımlar ile modellenmiş ve otomatik TEI verisi ile besleme yapılmıştır. Bu örnek grafikler, konum ve zamana göre güneş ısınlarını almaları ile orantılı olarak iyonlaşma miktarı açısından değerlendirilebilmektedir. İyonlaşma yani elektron yoğunluğu fazla olduğunda dalga iyonkürenin daha alt katmanlarından yansımaktadır. İyonlaşma azaldıkça dalga iyonkürenin daha üst katmanlarından yansımaktadır. İyonlaşma daha da azaldığında dalga iyonküreden yansımayıp kırılarak iyonkürede yol almaya devam etmektedir. Bu bölümde 6 MHz ve 8 MHz olmak üzere iki frekans için çıktılar sunulması vesilesiyle frekansın etkisi de gözlenebilmektedir. Frekans arttıkça genel olarak dalga iyonkürede daha yüksek katmanlardan yansımakta ya da yansımamaktadır.

Kaynak konumunun Saint Petersburg olduğu, 6 MHz ve 8 MHz frekanslarında elde edilen çıktılar sırasıyla Şekil 5.10 ve Şekil 5.11'te verilmektedir. Bu grafiklere bakıldığında Aralık ayında gece iyonlaşma en az olduğundan siyah ve gri ile gösterilen sıradan ve sıradışı dalga her iki frekansta da iyonküreden yansımamaktadır. Her iki frekansta Haziran gün ortası senaryolarda koyu ve açık mavi ile gösterilen sıradan ve sıradışı dalga diğerlerine göre en alçak yükseklikten yansımaktadır. Aralık gün ortası ve Haziran gece yarısı için elde edilen grafiklerde 6 MHz'de her iki durumda da dalga iyonküreden yansımakta, Aralık gün ortasında daha alçak yükseklikten geri dönmektedir. 8 MHz'de ise Haziran gece yarısında ve Aralık gün ortasında sıradışı dalgalar yansımakta ancak frekansın artması etkisi ile sıradan dalgalar yansımaya iyonkürede kırılarak

yol almaya devam etmektedir.



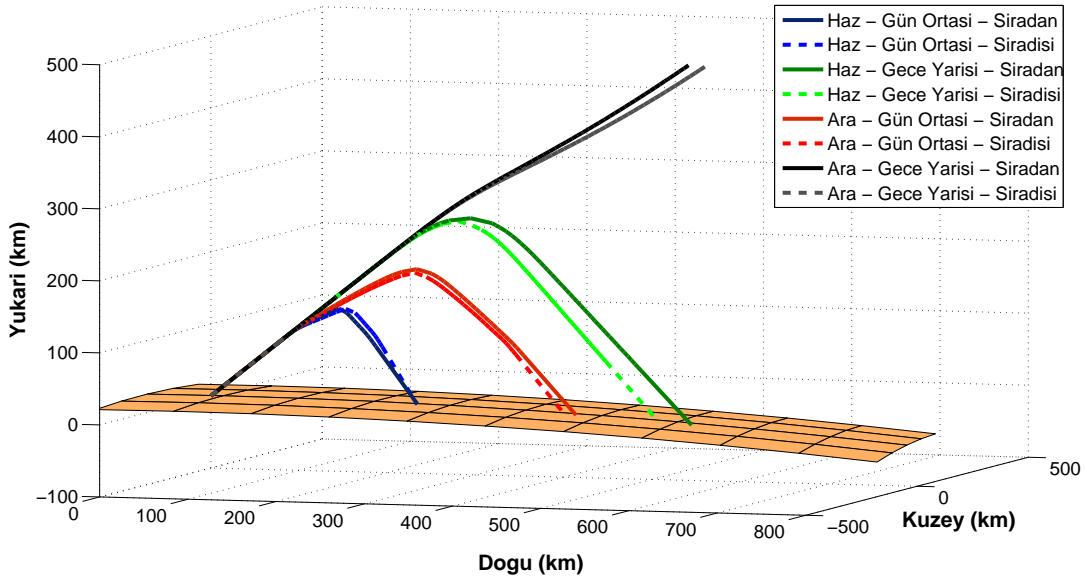
Şekil 5.10. Konum ve zaman değişiminin sıradan ve sıradışı dalga yayılım yolu üzerinde etkisi, Saint Petersburg, 6 MHz, yükseliş  $45^\circ$ , yanca  $90^\circ$ .



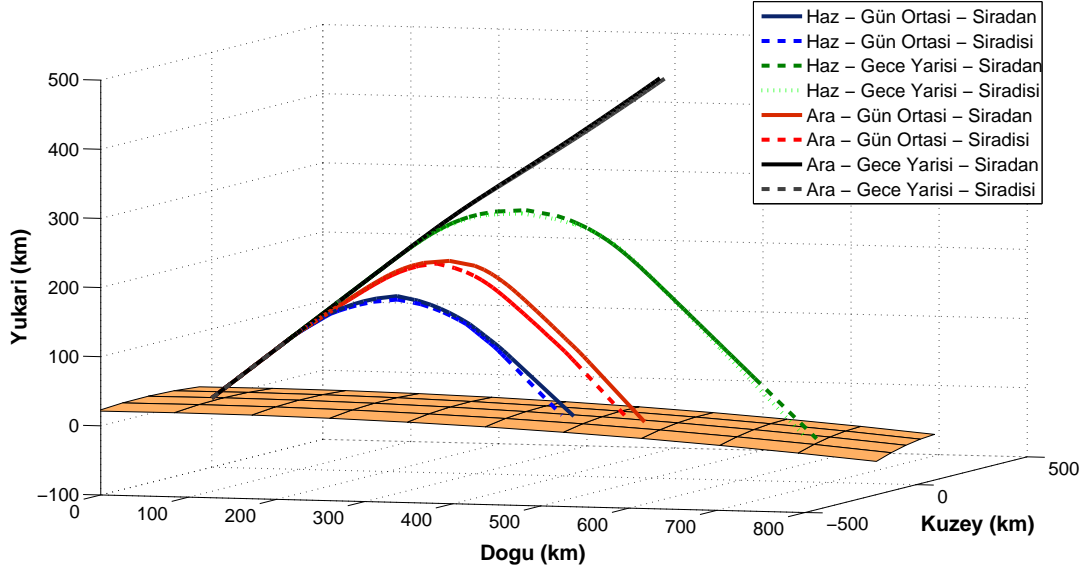
Şekil 5.11. Konum ve zaman değişiminin sıradan ve sıradışı dalga yayılım yolu üzerinde etkisi, Saint Petersburg, 8 MHz, yükseliş  $45^\circ$ , yanca  $90^\circ$ .

Kaynak konumunun Ankara olduğu, 6 MHz ve 8 MHz frekanslarında elde edilen çıktılar sırasıyla Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'de verilmektedir. Bu grafiklere ba-

kıldığında Aralık ayında gece iyonlaşma en az olduğundan siyah ve gri ile gösterilen sıradan ve sıradışı dalga her iki frekansta da iyonkürede kırılarak yoluna devam etmektedir. Her iki frekansta diğer 3 senaryoda sıradan ve sıradışı dalgalar kırılarak yeryüzüne dönmektedir. Örnekte verilen senaryolar arasında iyonlaşma en fazla Haziran gün ortasında olduğundan koyu ve açık mavi ile gösterilen sıradan ve sıradışı dalga diğerlerine göre en alçak yükseklikten yansımaktadır. Aralık gün ortası senaryosu Haziran gece yarısı senaryolarında iyonkürede yansıma olmaktadır. Haziran gece yarısında Aralık gün ortasına göre iyonlaşma daha az olduğundan yansıma yüksekliği fazladır. Frekans 6 MHz'den 8 MHz'e arttırıldığında Aralık gece yarısı senaryosunda dalganın kırılarak iyonkürede yol almaya devam ettiği, diğer üç senaryoda iyonküreden yansıma yüksekliklerinin arttığı gözlemlenmektedir.

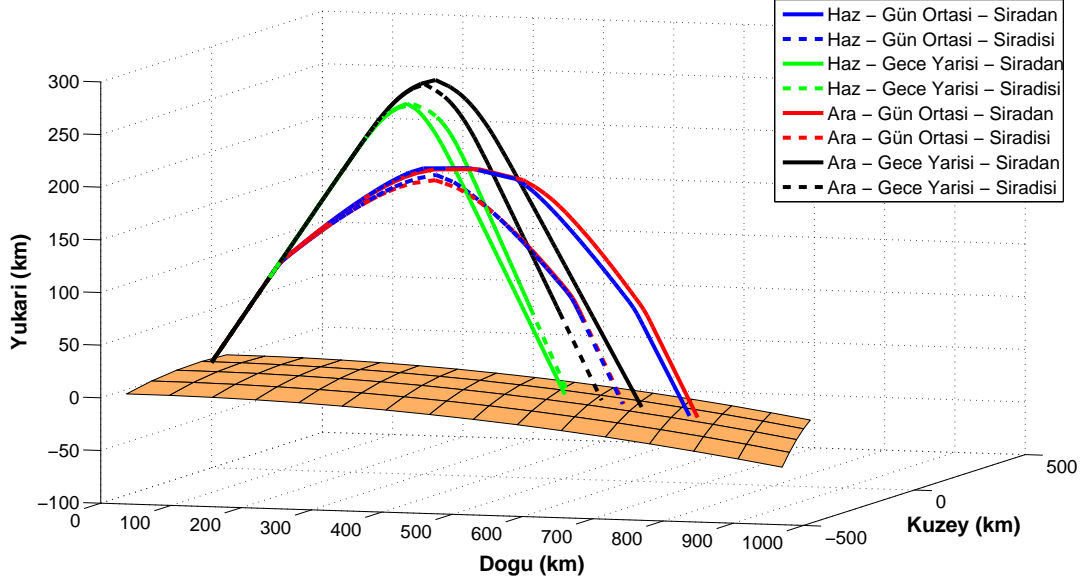


Şekil 5.12. Konum ve zaman değişiminin sıradan ve sıradışı dalga yayılım yolu üzerinde etkisi, Ankara, 6 MHz, yükseliş  $45^\circ$ , yanca  $90^\circ$ .

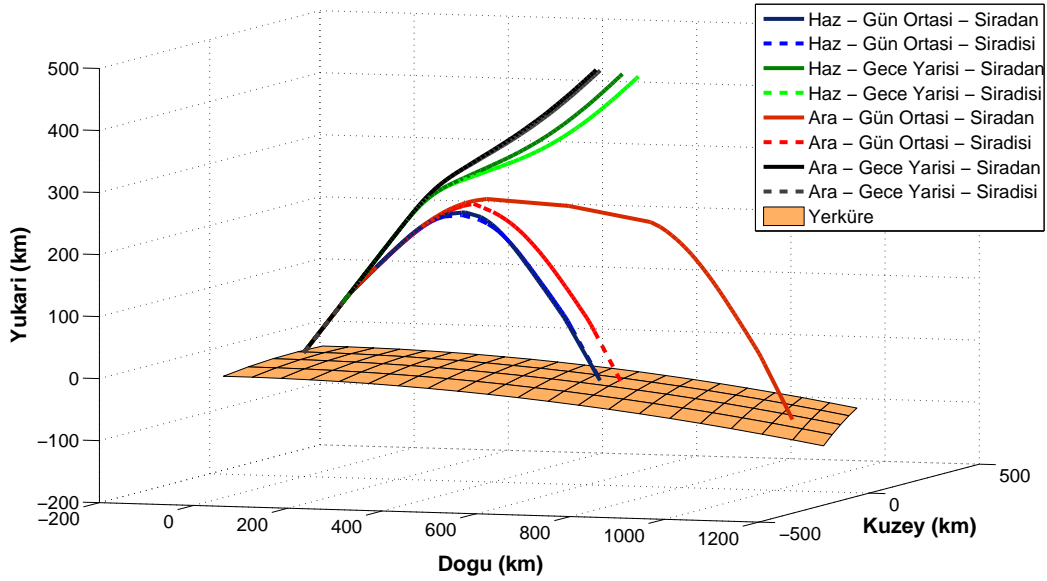


Şekil 5.13. Konum ve zaman değişiminin sıradan ve sıradışı dalga yayılım yolu üzerinde etkisi, Ankara, 8 MHz, yükseliş  $45^\circ$ , yanca  $90^\circ$ .

Kaynak konumunun Kampala olduğu, 6 MHz ve 8 MHz frekanslarında elde edilen çıktılar sırasıyla Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'de verilmektedir. Ekvatorial bölgede yıl içinde mevsimler arasında Güneş alma açısı ve miktarı birbirine yakın olmaktadır. Dolayısı ile yılın ayları arasında iyonlaşma miktarında değişim azdır. Bununla uyumlu olarak Kampala için 6 MHz'de elde edilen çıktılarda Haziran ile Aralık gün ortasında ve Haziran ile Aralık gece yarısında dalganın iyonküreden yansıdığı yüksekliklerin birbirine yakın olduğu gözlenmektedir. Frekans 8 MHz olduğunda Haziran ve Aralık gece yarısında dalga iyonkürede yansımaya uğramamaktadır. Aralık gün ortasında sıradan dalga yansırken iyonkürede bir miktar yatayda yol almaktadır. 8 MHz'de örnek verilen senaryolar arasında Haziran gün ortasında yansıma iyonkürenin daha alçak bölgesinden gerçekleşmektedir.



Şekil 5.14. Konum ve zaman değişiminin sıradan ve sıradışı dalga yayılım yolu üzerinde etkisi, Kampala, 6 MHz, yükseliş  $45^\circ$ , yanca  $90^\circ$ .

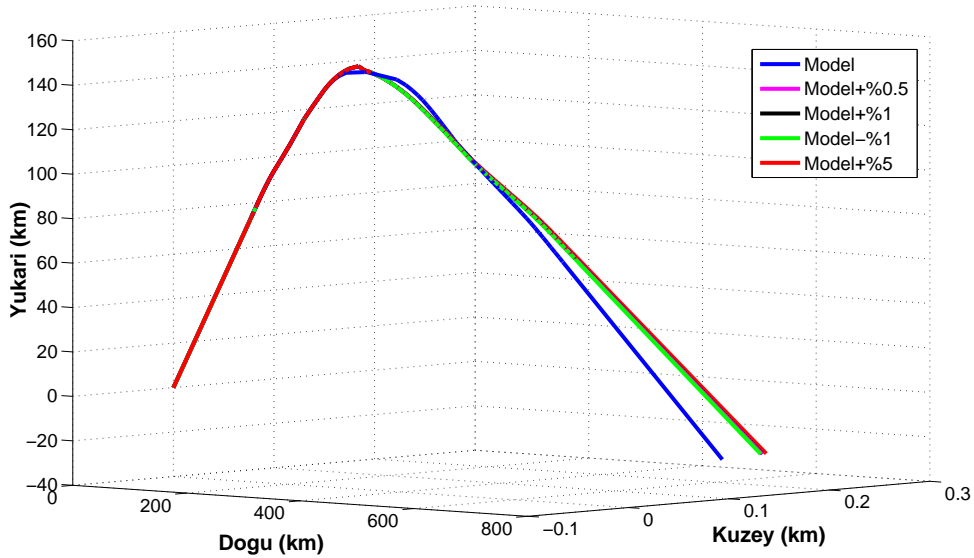


Şekil 5.15. Konum ve zaman değişiminin sıradan ve sıradışı dalga yayılım yolu üzerinde etkisi, Kampala, 8 MHz, yükseliş  $45^\circ$ , yanca  $90^\circ$ .

### 5.3.4 Yerkürenin Manyetik Alanındaki Değişimin Etkisi

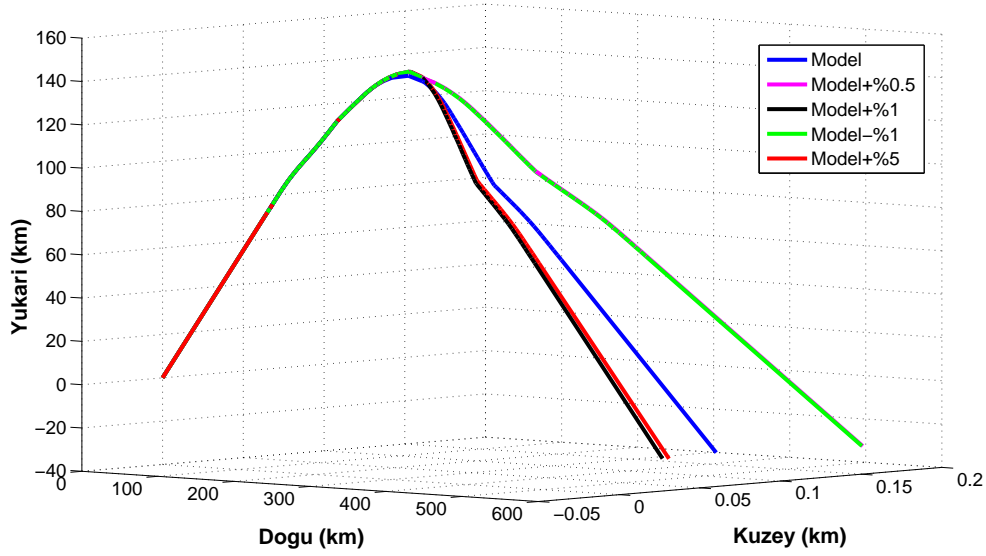
Yerkürenin manyetik alanının etkisi ile iyonkürenin yönbağımlı hale gelmektedir. Bu tez kapsamında geliştirilen dalga yayılım modelinde yerkürenin manye-

Yerkürenin manyetik alanı parametresi kırılma indisi hesabına girdi olmaktadır. Yerkürenin manyetik alanı 5 yıllık dönemlere dayanan IGRF modeli kullanılarak hesaplanmaktadır. IGRF modeli ile ilgili bilgiler Bölüm 4.3'te verilmektedir. Özellikle güneş fırtınaları olduğu zamanlarda yerküre manyetik alanı genel yönsemesinden farklı davranışlar sergileyebilmektedir. Böyle zamanlarda 5 yıllık dönemlere dayalı model tabanlı hesaplamalar ile elde edilen yerküre manyetik alanının gerçek değerinden farklı olmaktadır. Bu bölümde IGRF modeli ile hesaplanan yerküre manyetik alanı değerinde %0.5 artış, %1 artış, %1 azalış, %5 artış olduğunda dalga yayılım yolundaki değişim incelenmektedir. Bunun için algoritmada IGRF modeli ile hesaplanan yerküre manyetik alanı değerinde belirtilen değişiklikler uygulanmış ve dalga yayılım yolu bu güncellenmiş yerküre manyetik alanı değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Senaryolar 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 14:00 GS, 6MHz, yanca açısı  $90^\circ$ , yükseliş açısı  $30^\circ$  girdileri ile oluşturulmuştur. IGRF modeli ile hesaplanan yerküre manyetik alanı ve her bir güncellenmiş yerküre manyetik alanı verisi kullanılarak sıradan ve sıradışı dalga yayılım yolları hesaplanmıştır. Bu senaryo koşullarında sıradan dalga yayılım yolu Şekil 5.16'de, sıradışı dalga yayılım yolu Şekil 5.17'de verilmektedir.



Şekil 5.16. Yerkürenin manyetik alanında güncelleme yapıldığında sıradan dalga yayılım yolundaki değişim, 25 Ekim 2011, 14:00 GS, Ankara, 6 MHz, yanca açısı  $90^\circ$ , yükseliş açısı  $30^\circ$ .





Şekil 5.17. Yerkürenin manyetik alanında güncelleme yapıldığında sıradışı dalga yayılım yolundaki değişim, 25 Ekim 2011, 14:00 GS, Ankara, 6 MHz, yanca açısı  $90^\circ$ , yükseliş açısı  $30^\circ$ .

Elde edilen karşılaştırma grafikleri incelendiğinde yerkürenin manyetik alanında uygulanan değişim dalganın iyonkürede yansımaya yüksekliğini değiştirmedeği durumda dalganın yayılım yolunda ciddi bir farklılık meydana gelmemektedir. Fırtınalı gün senaryosunda yerkürenin manyetik alanı değerlerinin güncellenmesi sonucunda elde edilen ve Şekil 5.16 ile Şekil 5.17'de verilen sıradan ve sıradışı dalga yayılımı grafikleri birbirine yakın çıkmaktadır. Bu senaryo koşulunda yerkürenin manyetik alanında uygulanan değişiklik, dalganın iyonküredeki yansıma yüksekliğinde ve sonrasında dalga yayılım yolunda ciddi bir değişim yaratmamıştır.

#### 5.4 IONOLAB-RAY Algoritmasının Alternatif Çalışmalar ile Karşılaştırılması

Bu bölümde, tez kapsamında geliştirilen dalga yayılım modeli ve IONOLAB-RAY algoritması, literatürde KD bandında ışın izleme yöntemiyle dalga yayılım yolunu hesaplayan üç önemli çalışma ile kıyaslanmaktadır. Bu kıyaslamada Çin'in coğrafi sınırlarına yönelik geliştirilmiş iyonküre modeline dayanan ça-

Çizelge 5.7. Çin ve yakın çevresi için geliştirilen dalga yayılım modeli ile IONOLAB-RAY'in kıyaslanması.

	<b>Çin ve yakın çevresi için geliştirilen model</b>	<b>IONOLAB-RAY</b>
<b>3B Işın izleme</b>	Dalga yayılım yolunun 3B ışın izleme ile hesaplandığı belirtilmiş, uygulanan yöntem belirtilmemiştir.	Snell yasasına dayanan 3B ışın izleme uygulanmıştır.
<b>İyonküre Parametreleri</b>	IRI'nın Çin coğrafyası için güncellenmesi ile geliştirilen CRI (Chinese Reference Ionosphere) yazılımı kullanılmaktadır. Bu yazılım ile elektron yoğunluğu hesaplanmaktadır.	IRI-Plas yazılımının son sürümü kullanılmaktadır. GIM-TEI verisi ile otomatik beslenebilmektedir. Kırılma indisi için gereken tüm iyonküre parametreleri hesaplanmaktadır.
<b>Kırılma indisi</b>	Appleton-Hartree formülü kullanılmıştır. Detay seviyesi belirtilmemiştir.	Appleton-Hartree formülü kullanılmıştır. Tüm bileşenleri ile hesaplanmaktadır.
<b>Algoritma Özellikleri</b>	Öncelikli amacı KD bandı kanal modeli geliştirmektir. Algoritma açık literatürde paylaşılmadığından kullanım özellikleri ile ilgili bilgiler kısıtlıdır.	KD bandı kanal modeline girdi olabilecek parametreleri hesaplamaktadır. Kullanıcı dostu, modüler, esnek ve kendi içinde bütün bir algoritmadır.

Işıma [55], IONORT yazılımı [51] ve PHARLAP yazılımı [53] ile yapılmaktadır.

#### **5.4.1 Çin coğrafi bölgesi için geliştirilmiş model ile IONOLAB-RAY'in karşılaştırılması**

Çin ve yakın çevresi için geliştirilen iyonküre modeline dayanan bu çalışmanın amacı KD bandında haberleşme için kanal karakteristiklerin 3B ışın izleme ile hesaplanmasıdır. Bu çalışma ile IONOLAB-RAY'in farklı ve benzer yönleri Çizelge 5.7'de verilmektedir.

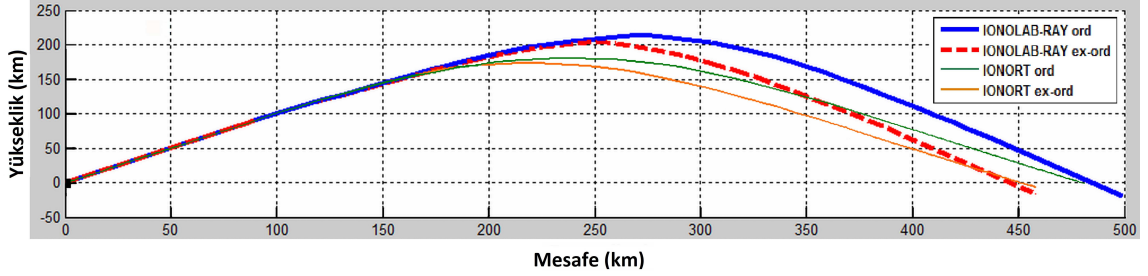
#### 5.4.2 IONORT ile IONOLAB-RAY'in karşılaştırılması

IONORT, iyonküre ortamında ışın izleme yöntemi ile KD bandında dalga yayılımını hesaplayan bir yazılımdır [51]. Literatürde açık olarak paylaşılan IONORT 0.7.2 sürümü ile IONOLAB-RAY algoritması karşılaştırılmış ve iki çalışmanın farklılıkları ve kısıtları çerçevesinde uyumlu sonuçlar verdikleri görülmüştür. Her iki çalışmada da iyonküre 3B hücresel yapıda modellenmiş ve ışın izleme bu hücre yapısı üzerinden uygulanmıştır. IONORT yazılımında Eş. 3.24 - 3.29'de verilen Haselgrove denklemlerinin çözümüne dayanan ışın izleme uygulanmaktadır [37, 38]. Haselgrove denklemlerini belli kabuller altında hesaplayan Jones ve Stephenson'ın FORTRAN ile geliştirilmiş kodu doğrudan kullanılmaktadır [39]. IONORT yazılımı bir anlamda Jones ve Stephenson koduna bir kabuk gibi tasarlanmıştır. Kullanıcı arayüzü aracılığıyla girilen parametrelere karşılık Jones ve Stephenson kodunu koşturmaktadır. IONORT'da iyonküre parametrelerini hesaplamak üzere dahili bir araç bulunmamaktadır. Ancak kullanıcı, elektron profilini harici bir dosya aracılığı ile girmeyi ya da yüksekliğe göre elektron yoğunluğunu fonksiyon üzerinden ifade eden Chapman modeli ile hesaplamayı seçebilmektedir. Buna karşılık IONOLAB-RAY algoritmasında iyonküre parametreleri, IRI-Plas aracı ile istenilen tarih ve saat için hesaplanmakta ve IRI-Plas modeli otomatik olarak TEİ verileri ile beslenerek iyonküre daha iyi temsil edilebilmektedir. IONOLAB-RAY ile IONORT arasındaki farklılık ve benzerlikler Çizelge 5.8'de özetlenmektedir. IONORT yazılımında Chapman modelinin kullanılmadığı durumda kullanıcının bir girdi dosyası ile benzetimin yapılacağı tarih ve zamana uygun, hücre yapısının her bir bileşeni için iyonküre parametrelerinin girilmesi gerekmektedir. Yazılımın internette paylaşılan 0.7.2 sürümünde onaltı örnek girdi dosyası verilmiştir. Bu girdi dosyalarından seçilen bir tanesi için IONORT ve IONOLAB-RAY ile elde edilen karşılaştırma grafiği Şekil 5.18'de verilmektedir. Seçilen IONORT girdi dosyası 21 Ekim 2010 tarih, saat 12:00 GS,  $31^{\circ}$  -  $49^{\circ}$  enlem,  $-9^{\circ}$  -  $39^{\circ}$  boylam arasında kalan bölge ilgi alanı için verilmektedir. Bu özelliklerde iyonküre modeli IONOLAB-RAY ile oluşturulmuştur. Sonrasında her iki yazılım ile 9 MHz operasyon frekansında,

Çizelge 5.8. IONORT ile IONOLAB-RAY'in kıyaslanması.

	<b>IONORT</b>	<b>IONOLAB-RAY</b>
<b>3B Işın izleme</b>	Jones ve Stephenson kodu ile Haselgrove denklem seti çözülmektedir.	Snell yasasına dayanan 3B ışın izleme uygulanmıştır.
<b>İyonküre Parametreleri</b>	3B Elektron yoğunluğu standart analitik Chapman modeli ile hesaplanabilmekte ya da kullanıcı tarafından dosya ile girilebilmektedir. Arayüzde zaman girdisi yoktur.	Tüm iyonküre parametreleri istenilen çözünürlükte yerküredeki herhangi bir konum ve zaman için IRI-Plas ile hesaplanmaktadır. IRI-Plas, TEİ verisi ile beslenebilmektedir.
<b>Kırılma indisi</b>	İlgili kaynaklarda nasıl hesaplandığı paylaşılmamıştır.	Appleton-Hartree formülü kullanılmıştır. Tüm bileşenleri ile hesaplanmaktadır.
<b>Yazılım Özellikleri</b>	Arayüz bulunmaktadır. Çoklu koşum ve çıktıların grafiksel gösterimleri kısıtlıdır. Dalganın yalnız yayılım yolu hesaplanmaktadır.	Komutlar aracılığı ile tekli ya da çoklu koşum yapılmaktadır. Kullanıcı dostu, modüler, esnek ve kendi içinde bütün bir algoritmadır. Dalganın çeşitli parametreleri hesaplanır. Grafik özellikleri analize uygundur.

45° başucu ve 0° yanca açıları yönünde yayın yapan kaynağın 41° N, 12° E konumunda olduğu senaryolar koşturulmuş ve Şekil 5.18'de verilen grafik elde edilmiştir.



Şekil 5.18. IONORT ile IONOLAB-RAY karşılaştırma, 21 Ekim 2010, 12:00 GS, 41° N, 12° E, 9 MHz, 45° başucu ve 0° yanca açısı.

#### 5.4.3 PHARLAP ile IONOLAB-RAY'in karşılaştırılması

IONOLAB-RAY çıktıları, Avustralya'nın araştırma kurumu olan Defence Science and Technology Organisation (DSTO) tarafından geliştirilen KD bandında radyo dalgası ışın izleme aracı PHARLAP yazılımının çıktıları ile karşılaştırılmıştır [53]. PHARLAP yazılımı Avustralya'nın araştırma kurumu olan Defence Science and Technology Organisation (DSTO) tarafından geliştirilmiştir. İyonkürede dalga yayılımını modellemektedir. 2B ışın izlemeden, 3B yerkürenin manyetik alanının hesaba dahil edildiği ışın izlemeye kadar çeşitli detay seviyelerinde çözümler sunmaktadır. 2B ışın izlemede Coleman denklemleri kullanılmaktadır [9]. 3B ışın izleme Haselgrove denklem setinin çözülmesi ile uygulanmaktadır. Haselgrove denklemlerini küresel koordinatlarda çözen Johns and Stephenson kodu yerine işlem karmaşıklığını azaltmak amacıyla denklem setinin orijinal kartezyen koordinatlarındaki halini çözen kod kullanılmıştır. İyonküre modeli yarı-parabolik katmanlar ile oluşturulmaktadır. Kırılma indisi için Appleton Hartree formülü kullanılmaktadır. IONOLAB-RAY ile PHARLAP arasındaki farklılık ve benzerlikler Çizelge 5.9'da özetlenmektedir. Bu çalışma kapsamında talep üzerine paylaşılan PHARLAP 3.7.1 kullanılarak elde edilen çıktılar ile IONOLAB-RAY çıktıları örnek bir senaryo üzerinden karşılaştırılmak-

Çizelge 5.9. PHARLAP ile IONOLAB-RAY'in kıyaslanması.

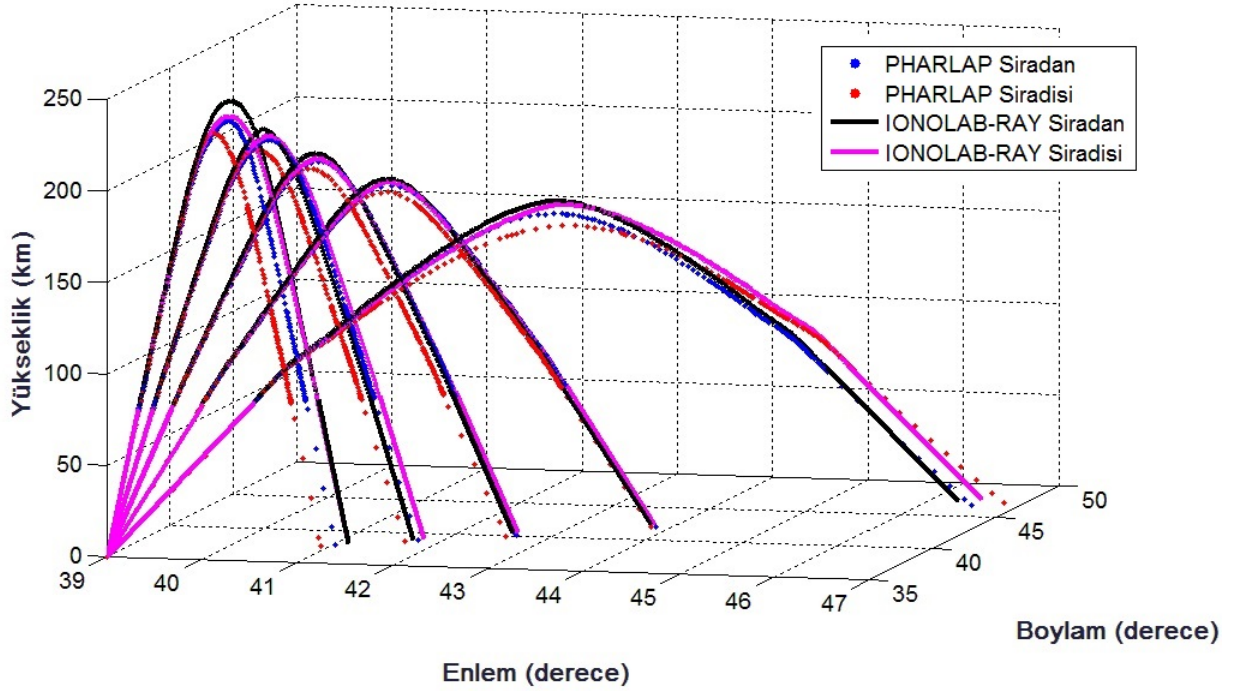
	<b>PHARLAP</b>	<b>IONOLAB-RAY</b>
<b>3B Işın izleme</b>	Kartezyen koordinatlarda verilen Haselgrove denklem seti çözülmektedir. İşlem yükü ve süresi çok fazladır.	Snell yasasına dayanan 3B ışın izleme uygulanmıştır. Ön işlem ve ana işlem fazları ve Snell yasası uygulaması ile hızlıdır.
<b>İyonküre Modeli</b>	İyonküre modeli quasi-parabolik katmanlar ile oluşturulmaktadır. Yükseklik adımı sayısı için 201 limiti bulunmaktadır.	Küresel 3 boyutlu hücre yapısı kullanılmaktadır. Enlem, boylam ve yükseklik çözünürlüğünü ve dağılımını kullanıcı belirler. Adım sayısı limiti yoktur.
<b>İyonküre Parametreleri</b>	IRI kullanılmaktadır.	TEİ ile beslenebilen IRI-Plas kullanılmaktadır.
<b>Kırılma indisi</b>	Appleton-Hartree Formülü Haselgrove denklemlerinde türev/integral işlemlerinde parametrik olarak girmektedir.	Appleton-Hartree formülü kullanılmaktadır. Tüm bileşenleri ile hesaplanmaktadır.
<b>Yazılım Özellikleri</b>	Girdiler kodun içine doğrudan girilmektedir. Belli formatlarda çıktı grafikleri sağlamaktadır. Kısıtlı çoklu koşum imkanı bulunmaktadır.	Komutlar aracılığı ile tekli ya da çoklu koşum yapılmaktadır. Kullanıcı dostu, modüler, esnek ve kendi içinde bütün bir algoritmadır. Grafik özellikleri analize uygundur.

tadır. Yapılan karşılaştırmalarda çıktılar uyumlu çıkmaktadır. Gözlenen küçük farklar temel olarak iki sebepten kaynaklanmaktadır. Bunlardan birincisi kullanılan iyonküre parametresi hesaplama araçlarıdır. İkincisi ise uygulanan ışın izleme yöntemlerindeki farklılıklardır. Ayrıca iyonkürenin hücrelere ayrılmasındaki uygulamadan dolayı da iki model arasında ayrışma söz konusu olmaktadır.

PHARLAP ile IONOLAB-RAY'in karşılaştırılması için seçilen örnek senaryoda kaynağın konumu  $39^{\circ}$  K,  $35^{\circ}$  D, tarih 01 Ocak 2014 saat 12:00 GS olarak belirlenmiştir. Yayınlanan dalga'nın frekansı 9 MHz, yanca açısı  $45^{\circ}$ , yükseliş açısı ise  $20^{\circ}$ 'den  $60^{\circ}$ 'ye  $10^{\circ}$ 'lik adımlarla değişecek şekilde atanmıştır. İlgili alanın bölgenin oluşturulmasında yükseklik çözünürlüğü 2 km olarak belirlenmiştir.

PHARLAP dalga yayılım yolu çıktı grafiklerini enlem, boylam, yükseklik (EBY) koordinat sisteminde vermektedir. Karşılaştırmalarda grafiklerin üst üste çizdirilebilmesi için IONOLAB-RAY algoritmasının çıktıları da EBY koordinatlarında çizdirilmiştir.

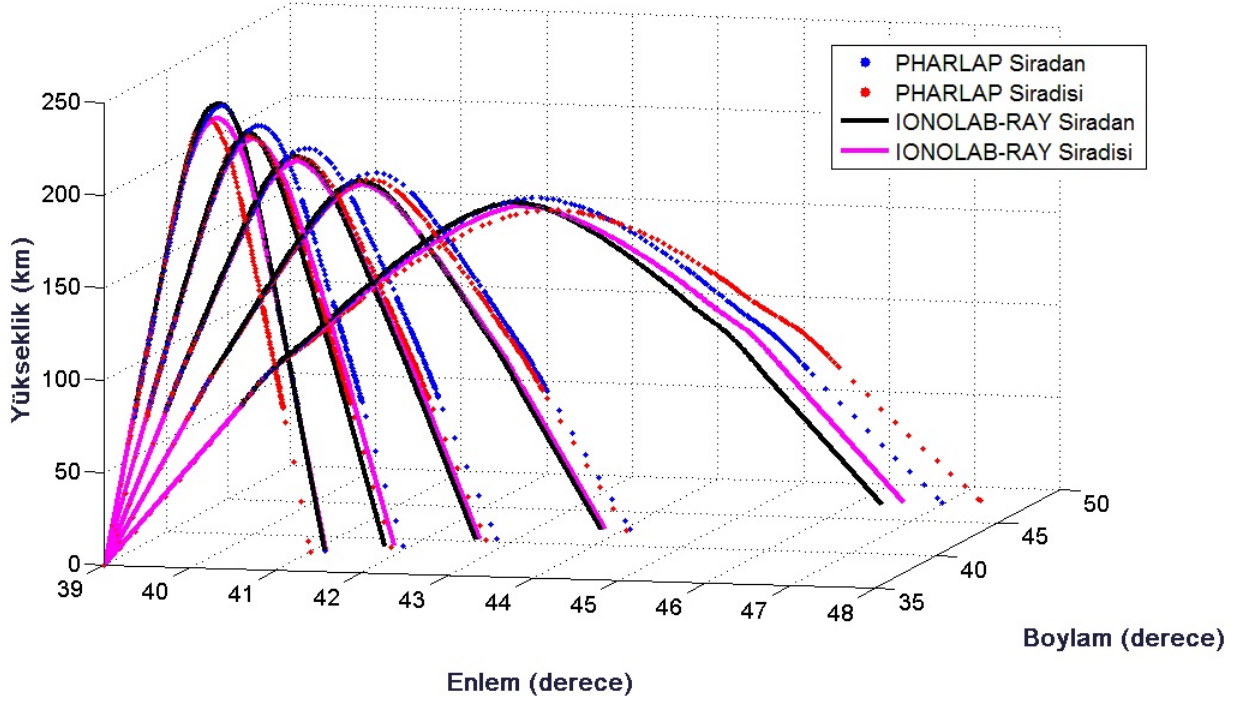
Karşılaştırmalarda öncelikle PHARLAP'da IRI, IONOLAB-RAY'de IRI-Plas kullanıldığı durum değerlendirilmektedir. Bu karşılaştırma Şekil 5.19'de verilmekte ve çıktıların uyumlu olduğu görülmektedir. Şekilde IONOLAB-RAY ile elde edilen dalga yayılım yolu iyonkürede PHARLAP ile elde edilen çıktılarına göre daha yüksekte yansımaktadır. Yansıma yüksekliğindeki farklılık yükseliş açısının artması ile artmaktadır. Bununla birlikte özellikle  $30^{\circ}$ ,  $40^{\circ}$  ve  $50^{\circ}$  olduğu senaryolarda dalga'nın yeryüzüne ulaştığı konumlar IONOLAB-RAY ve PHARLAP ile elde edilen çıktılarda birbirine son derece yakındır.



Şekil 5.19. PHARLAP ile IONOLAB-RAY karşılaştırma, 01 Ocak 2014, 12:00 GS, 39° K, 35° D, 9 MHz, 20°'den 60°'ye 10°'lik adımlarla değişen yükseliş ve 45° yanca açısı.

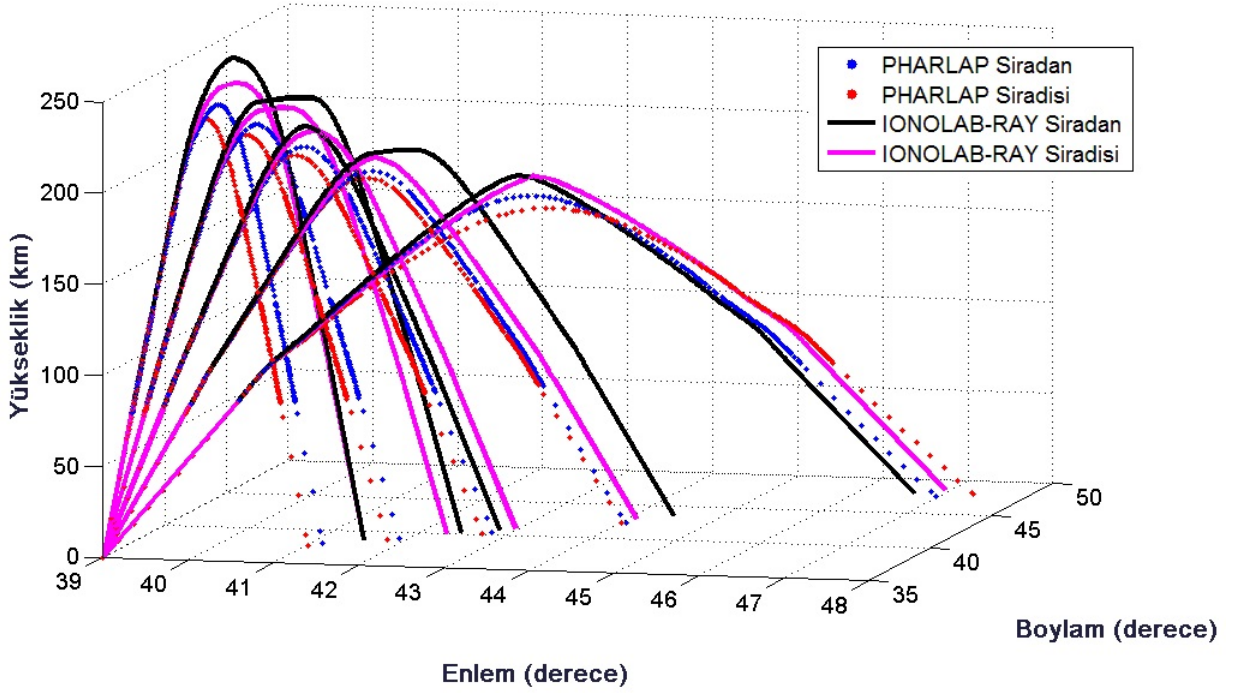
Sonrasında PHARLAP'ın kaynak koduna müdahale ile IRI yerine IRI-Plas kullanılması sağlanmış ve her iki yazılımda da IRI-Plas kullanıldığı durum karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırma sonucunda elde edilen grafik Şekil 5.20'de verilmektedir. PHARLAP'da IRI yerine IRI-Plas kullanıldığı durumda dalga yayılım yolunun iyonküreden yansıma yükseklikleri IONOLAB-RAY ile elde edilen çıktılar ile daha uyumlu hale gelmektedir. Yükseliş açısının 50° ve özellikle 60° olduğu durumda PHARLAP'da IRI kullanıldığı duruma göre IRI-Plas kullanıldığı durumda, IONOLAB-RAY ile daha uyumlu çıktılar elde edilmiştir.





Şekil 5.20. IRI-Plas kullanacak şekilde güncellenmiş PHARLAP ile IONOLAB-RAY çıktılarının karşılaştırması, 01 Ocak 2014, 12:00 GS, 39° K, 35° D, 9 MHz, 20°'den 60°'ye 10°'lik adımlarla değişen yükseliş ve 45° yanca açısı.

IONOLAB-RAY algoritmasının otomatik olarak TEİ verisi ile beslenmesi yeteneği bulunmaktadır. PHARLAP orijinalinde IRI kullandığı için IRI-Plas'ın veri ile beslenmesi ve iyonküre modelini bu veriye dayalı güncellemesi avantajını sunamamaktadır. TEİ ile veri beslemesinin bu bölümde karşılaştırma amaçlı oluşturulan senaryolar ile elde edilen dalga yayılım yolu çıktıları üzerindeki etkilerinin gözlenmesi için ??'de verilen grafik sunulmaktadır.



Şekil 5.21. PHARLAP ile TEİ verisi ile beslenmiş IONOLAB-RAY çıktılarının karşılaştırması, 01 Ocak 2014, 12:00 GS, 39° K, 35° D, 9 MHz, 20°'den 60°'ye 10°'lik adımlarla değişen başucu ve 45° yanca açısı.

IONOLAB-RAY algoritmasında iyonküre modelinin TEİ verisi ile beslenmesi sonucunda hesaplanan dalga yayılım yolu, iyonkürenin standart IRI-Plas ile modellendiği durumda elde edilen dalga yayılım yoluna göre farklılık göstermektedir. Dalganın iyonküreden yansıdığı yüksekliklerin artmış olduğu ve özellikle 30° ve 50° yükseliş açılarında dalganın iyonkürede bir miktar yataya yakın şekilde yol aldığı gözlenmektedir. Bu grafik ile iyonküre modelinin TEİ verisi kullanarak güncellenebilmesi imkanının önemi anlaşılmaktadır.

Tezin bir sonraki bölümünde IONOLAB-RAY'in, dalganın zayıflama katsayısı, faz ve grup hızı, zaman gecikmesi ve Faraday dönmesi parametrelerini hesaplamak üzere geliştirilmiş modülleri anlatılmaktadır.

## 6. IONOLAB-RAY ALGORİTMASI İLE DALGA PARAMETRELERİNİN HESAPLANMASI

Bu tez kapsamında geliştirilen dalga yayılım modeli ile dalga yayılım yolunun yanı sıra dalganın zayıflama katsayısı, faz hızı, grup hızı, zaman gecikmesi ve faz dönmesi parametreleri hesaplanmaktadır. Bu parametreler, KD bandında uzak mesafe haberleşmesi, uydu haberleşmesi, yön bulma gibi iyonkürede dalga yayılımına dayanan uygulamalar için büyük önem taşımaktadır. Bu parametrelerin hesaplanması için IONOLAB-RAY algoritmasına modüller eklenmiştir. Bu modüllere girdi olacak parametreler ana işlem fazında kaydedilmektedir. Ana işlem fazında elde edilen çıktılarından ilgili parametreler çağırılarak yayılan dalganın parametreleri hesaplanmaktadır.

Bu bölümde dalganın zayıflama katsayısı, faz hızı, grup hızı, zaman gecikmesi ve faz dönmesi parametrelerinin hesaplanması için geliştirilen modüller anlatılmaktadır.

### 6.1 Zayıflama Katsayısı

Dalga kayıplı bir ortama girdiğinde zayıflamaya uğramaktadır. İyonküre kayıplı bir ortamdır. Buna bağlı olarak iyonkürede kırılma indisi karmaşık sayı değerler almaktadır. Bu tez kapsamında geliştirilen dalga yayılım modelinde zayıflama katsayısı küresel dalga üzerinden modellenmektedir. Genel olarak küresel bir dalga

$$\vec{E} = \left( \frac{\vec{E}_o}{r} \right) \exp(-\gamma \hat{a}_k \cdot \vec{r}) \quad (6.1)$$

olarak ifade edilmektedir.  $r$  Dalganın aldığı yol,  $\vec{r}$  ise konum vektörünü göstermektedir.  $\hat{a}_k$  dalga cephesine dik olan birim vektördür.  $\gamma$  ifadesi Eş. 3.2'de verilmekte olup, diğer bir ifade ile,

$$\gamma = jk_o n \quad (6.2)$$

olarak yazılabilmektedir. Eş. 6.2'de  $k_o$  serbest uzayda dalga sayısını,  $n$  kırılma indisini göstermektedir. İyonküre ortamında Eş. 3.46 ve 3.47 formülü ile hesaplanan kırılma indisi, karmaşık sayı değerler aldığından,

$$n = n_{Re} + jn_{Im} \quad (6.3)$$

olarak ifade edilebilmektedir.  $n_{Re}$  kırılma indisinin gerçel bileşenini,  $n_{Im}$  sanal bileşenini göstermektedir. Eş. 6.3'de verilen ifade Eş. 6.2'de yazıldığında,

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (6.4)$$

$$\gamma = -k_o n_{Im} + jk_o n_{Re} \quad (6.5)$$

elde edilmektedir. Eş. 6.4 ve Eş. 6.5'ye göre

$$\alpha = -k_o n_{Im} \quad (6.6)$$

$$\beta = k_o n_{Re} \quad (6.7)$$

Bu durumda Eş. 6.1'de verilen küresel dalga ifadesi

$$\vec{E} = \vec{E}_o \frac{\exp(k_o n_{Im} \hat{a}_k \cdot \vec{r})}{r} \exp(jk_o n_{Re} \hat{a}_k \cdot \vec{r}) \quad (6.8)$$

olarak yazılabilmektedir. Bu ifadeye göre zayıflama katsayısı,  $ZK$

$$ZK = \frac{\exp(k_o n_{Im}) r}{r} \quad (6.9)$$

olarak ifade edilmektedir.

IONOLAB-RAY'de dalga yayılımı ışın izleme yöntemi ile iyonkürenin 3B küresel ızgara modeli üzerinden adım adım ilerleyerek hesaplanmaktadır. Zayıflama

katsayısı için kullanılan fonksiyon 'ftimedelay' olarak isimlendirilmektedir. Ana işlem fazında dalga yayılımının her bir adımda dalganın aldığı yol ve kırılma indisinin gerçel ve sanal bileşenleri hesaplanmakta ve kaydedilmektedir. Nümerik olarak yayılan dalganın aldığı yol boyunca toplam zayıflama katsayısı, ftime delay fonksiyonu tarafından,

$$ZK = \frac{\exp \left[ k_o \sum_{s=1}^S (n_{Im_s} r_s) \right]}{r_{toplama}} \quad (6.10)$$

ifadesinin hesaplanması ile sağlanmaktadır.

IONOLAB-RAY algoritması ile zayıflama katsayısını hesaplamak için öncelikle girilen senaryolara karşılık ana koşum çalıştırılmış olmalıdır. Ana koşum aşamında kaydedilen veriler kullanılarak,

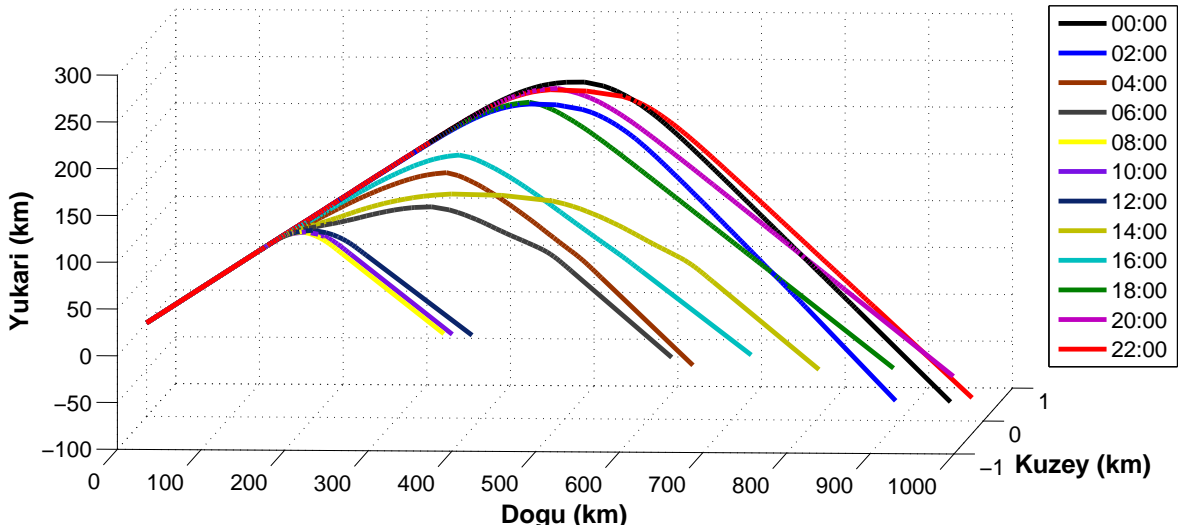
*[attenuation\_factor, attenuation\_factor\_expterm, path\_length] = fattenuation(data, freq\_i, tlat\_i, tlong\_i, theight\_i, telev\_i, tazi\_i, datetime\_i)*

komutu ile zayıflama katsayısı modülü koşturulabilmektedir. Bu modülün girdi parametreleri Çizelge 5.6'de açıklanmaktadır. Zayıflama katsayısı modülünün çıktı parametreleri ise Çizelge 6.1'de verilmektedir.

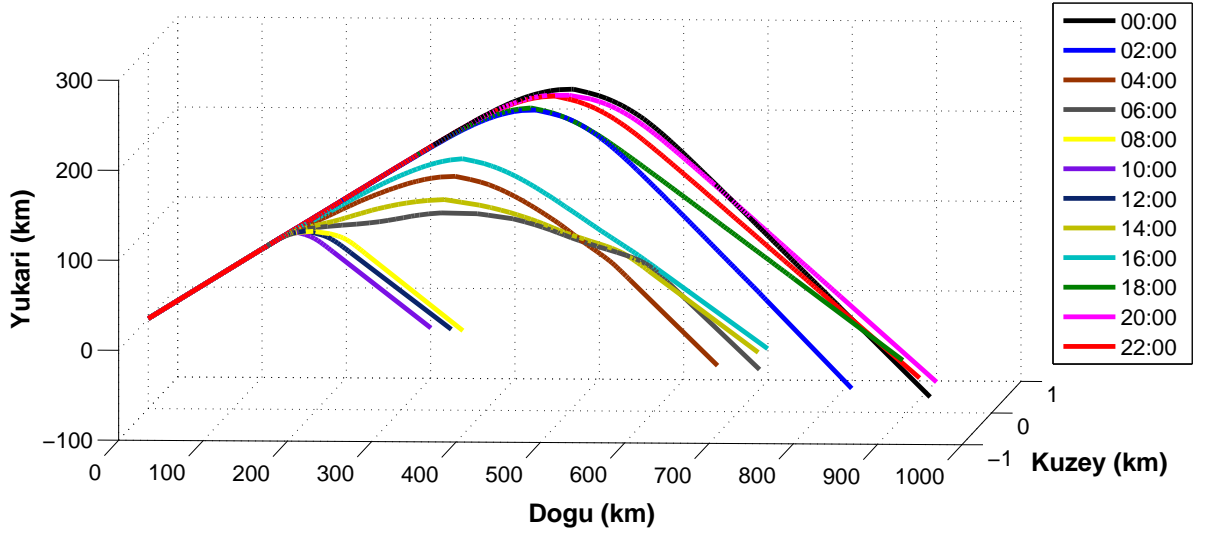
IONOLAB-RAY algoritması kullanılarak 17 Nisan 2011 tarihinde GS ile 00:00'dan 22:00'a ikişer saatlik adımlarla örnek senaryolar oluşturulmuştur. Bu senaryolarda kaynağın konumu Ankara, frekans 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90° seçilmiş ve iyonküre modeli otomatik olarak TEİ verisi ile beslenmiştir. Bu senaryolar için sıradan ve sıradışı dalga yayılım yolları hesaplanmış ve zayıflama katsayısı modülü çalıştırılmıştır. Herbir saat adımı için sıradan ve sıradışı dalga yayılım yolları sırası ile Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de verilmektedir. Zayıflama katsayısı hesaplama modülünün çıktıları olan zayıflama katsayısı, zayıflama katsayısının üstel bileşeni ve dalganın yayılım yolunun uzunluğu çıktılarının örnek senaryolarda günün saatine göre değişim grafikleri sırasıyla Şekil 6.3, Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'te verilmektedir.

Çizelge 6.1. Zayıflama katsayısı modülünün çıktı parametreleri.

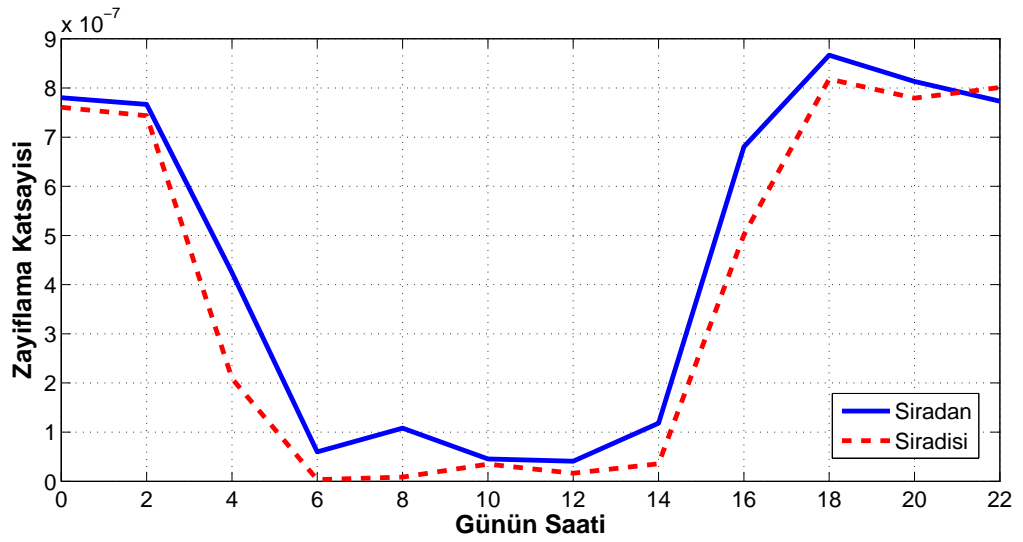
Parametre	Açıklama	Format
<i>attenuation_factor</i>	Dalganın aldığı toplam yol için toplam zayıflama katsayısı (Yeryüzü ile iyonküre arasındaki bölge dahil)	$\mathcal{R}$
<i>attenuation_factor_expterm</i>	Toplam zayıflama katsayısının üstel bileşeni (Yeryüzü ile iyonküre arasındaki bölge serbest uzay kabul edilmektedir. Bu nedenle zayıflama katsayısının üstel bileşenine katkısı yoktur.)	$\mathcal{R}$
<i>path_length</i>	Dalganın yayılım yolu boyunca aldığı toplam yol.	$\mathcal{R}$



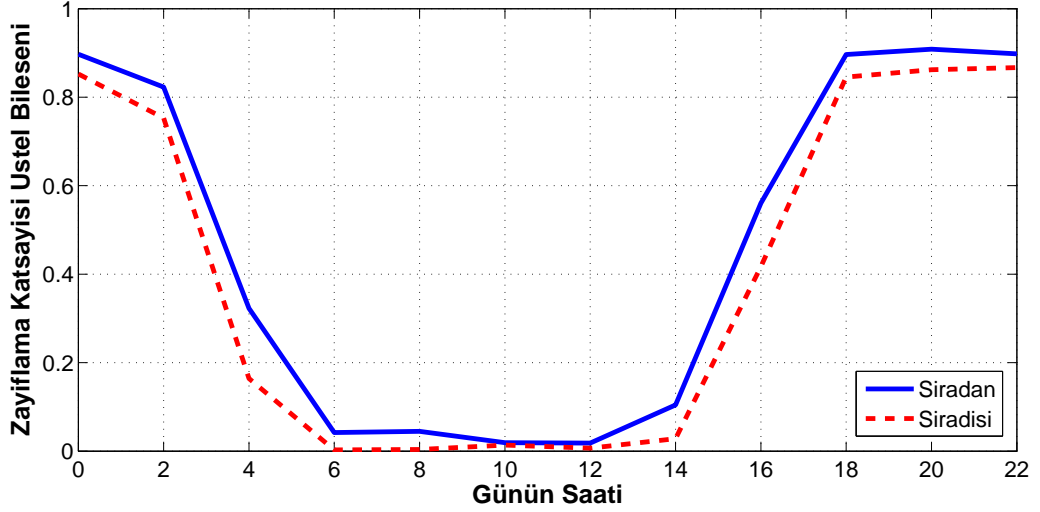
Şekil 6.1. Günün saatine göre sıradan dalga yayılım yolu, 17 Nisan 2011, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°.



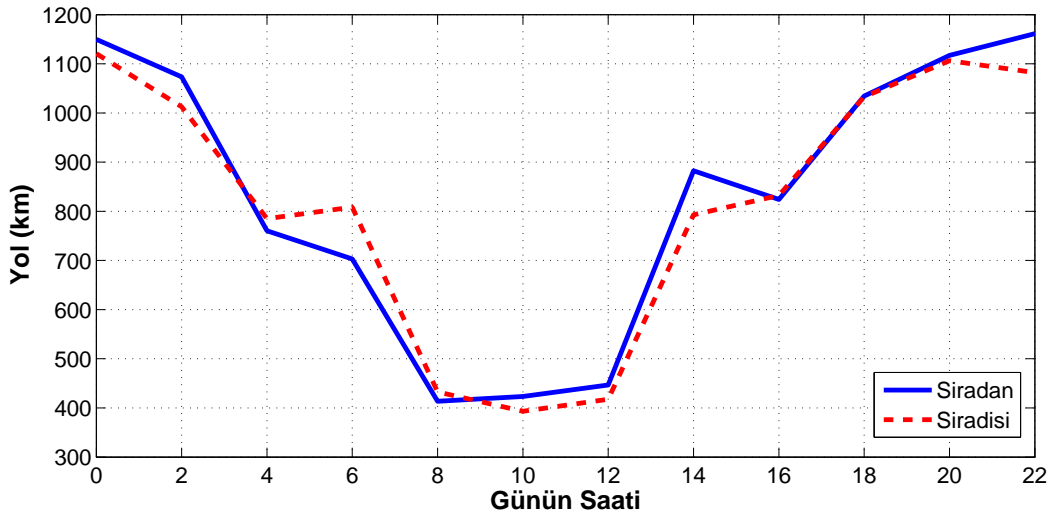
Şekil 6.2. Günün saatine göre sıradışı dalga yayılım yolu, 17 Nisan 2011, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı  $30^\circ$ , yanca açısı  $90^\circ$ .



Şekil 6.3. Günün saatine göre zayıflama katsayısı, 17 Nisan 2011, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı  $30^\circ$ , yanca açısı  $90^\circ$ .



Şekil 6.4. Günün saatine göre zayıflama katsayısının üstel bileşeni, 17 Nisan 2011, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı  $30^\circ$ , yanca açısı  $90^\circ$ .



Şekil 6.5. Günün saatine göre dalga yayılım yolu uzunluğu, 17 Nisan 2011, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı  $30^\circ$ , yanca açısı  $90^\circ$ .

Verilen grafiklerde dalga yayılım yolunun aynı senaryo koşullarında günün farklı saatlerinde farklılık göstermektedir. Dalga yayılım yolunun gece saatlerinde gündüz saatlerine göre daha uzun olduğu ve zayıflama katsayısı ile üstel bileşenin de orantılı olarak daha büyük olduğu görülmektedir.



## 6.2 Grup Hızı

Bu tez kapsamında geliştirilen dalga yayılım modelinde dalganın grup hızı hesaplanmaktadır. Bu hesaplamaların yapılabilmesi için IONOLAB-RAY algoritmasında 'fgroupvelocity' fonksiyonu geliştirilmiştir. Grup hızının hesaplanmasında [1, 4, 64] kaynaklarında verilen formül çıkarımları kullanılmıştır. Buna göre,  $v_g$  grup hızı,

$$v_g = \frac{1}{\partial k / \partial \omega} \quad (6.11)$$

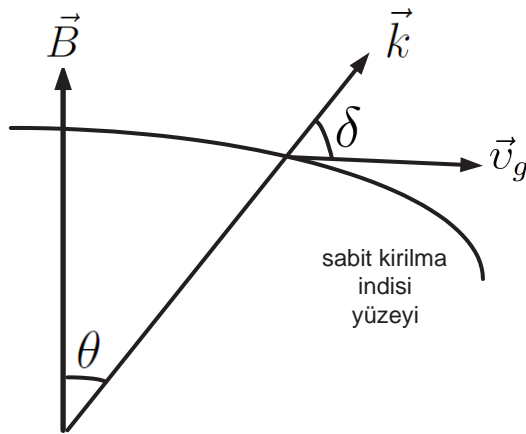
veya

$$v_g = \partial \omega / \partial k \quad (6.12)$$

olarak ifade edilmektedir. Bu ifade grup hızının sabit  $\omega$  yüzeylerine dik olduğu durumda geçerli olmaktadır.  $\beta$  ile grup hızı arasında Şekil 6.6'da verildiği gibi  $\delta$  açısı olduğu durumda grup hızı ifadesi,

$$v_g \cos \delta = \partial \omega / \partial k \quad (6.13)$$

olmaktadır. Şekil 6.6'da  $\theta$  yerkürenin manyetik alanı ile dalga cephelerine dik



Şekil 6.6. Yönbağımlı ortamda grup hızı.

yönde olan dalgasayı vektörleri arasında kalan açıdır.  $\delta$  açısı için,

$$\tan \delta = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial \theta} \quad (6.14)$$

ifadesi verilmektedir [1, 4, 64]. Bu ifade ile  $\delta$  açısını hesaplamak mümkündür. Grup hızının hesaplanması için ihtiyaç duyulan formül,

$$k = \frac{\omega}{c} n \quad (6.15)$$

eşitliğinin her iki tarafının frekansa ( $\omega$ ) göre türevinin alınması ile türetilmektedir. Bu aşamada kırılma indisi,  $n$ 'in frekansın fonksiyonu olduğuna dikkat edilmelidir. Türev alma işlemi sonrasında

$$\frac{\partial k}{\partial \omega} = \frac{1}{c} \left( n + \omega \frac{\partial n}{\partial \omega} \right) \quad (6.16)$$

elde edilmektedir. Eş. 6.16'in her iki tarafının çarpmaya göre tersi alındığında

$$\frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{c}{\left( n + \omega \frac{\partial n}{\partial \omega} \right)} \quad (6.17)$$

çıkmaktadır. Bu eşitlik 6.13'de yerleştirildiğinde,

$$v_g = \frac{c}{\cos \delta \left[ \frac{\partial(n\omega)}{\partial \omega} \right]} \quad (6.18)$$

IONOLAB-RAY algoritması ile grup hızını hesaplamak için öncelikle istenilen senaryolara karşılık ana koşul çalıştırılmış olmalıdır. Ana koşul aşamasında kaydedilen veriler kullanılarak,

```
[group_velocity_ionosphere, group_velocity] = fgroupvelocity(data, freqB, tlat_i, tlong_i, theight_i, telev_i, tazi_i, datetime_i)
```

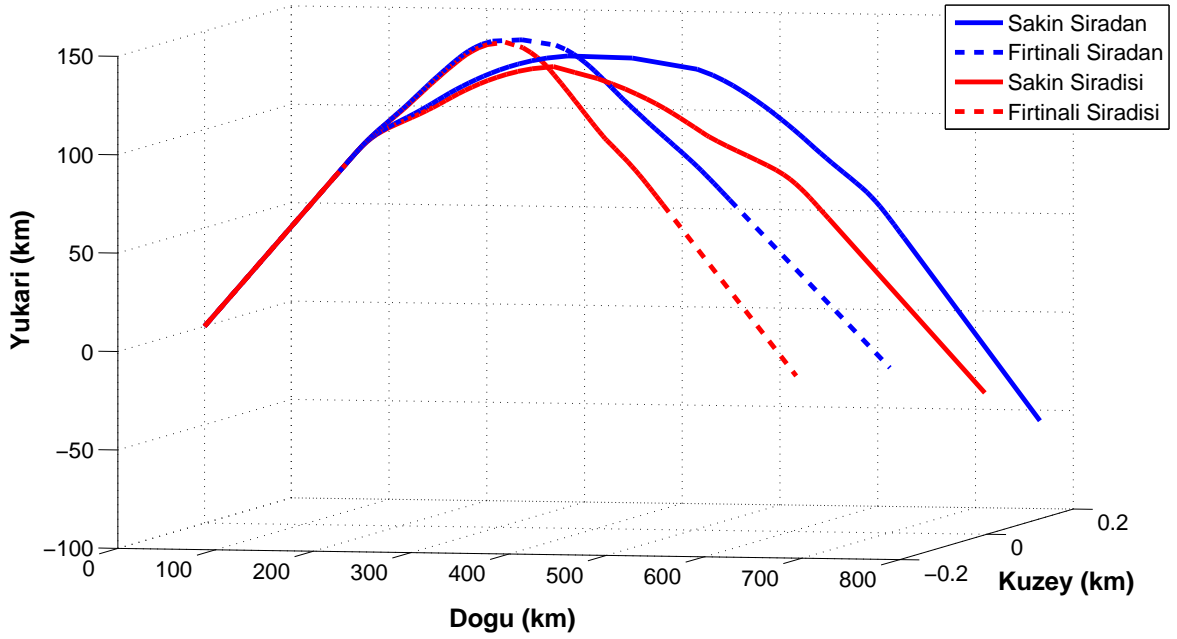
komutu ile grup hızı modülü koşturulabilmektedir. Bu modülün girdi parametreleri Çizelge 5.6'de açıklanmaktadır. Grup hızı modülünün çıktı parametreleri

Çizelge 6.2. Grup hızı modülünün çıktı parametreleri.

Parametre	Açıklama	Format
<i>group_velocity_ionosphere</i>	Yalnız iyonküre katmanında, yayılım yolu boyunca dalganın içinden geçtiği hücrelerdeki grup hızları	$\Re$ Dalga yayılımında iyonküre içindeki adım sayısı boyutunda dizi
<i>group_velocity</i>	Dalganın yayılım yolu boyunca yeryüzü-iyonküre arasındaki bölge(ler) dahil içinden geçtiği tüm hücrelerdeki grup hızları	$\Re$ Dalga yayılımındaki toplam adım sayısı boyutunda dizi

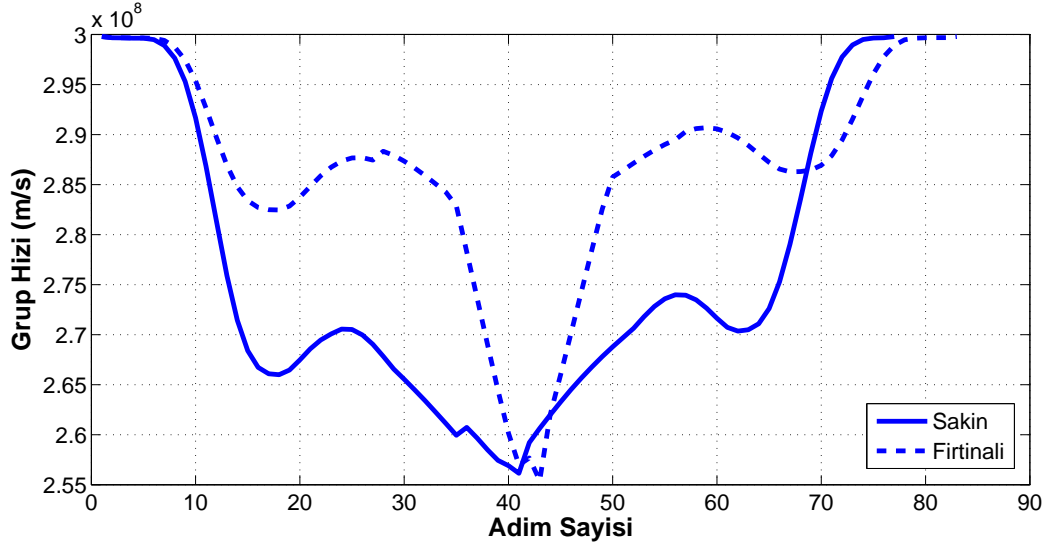
ise Çizelge 6.2'da verilmektedir.

IONOLAB-RAY algoritması kullanılarak 17 Nisan 2011 sakin gün ve 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 02:00 GS ve 14:00 GS için sıradan ve sıradışı dalga yayılımında ışın izlemenin her bir adımına karşılık grup hızı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda koşturulan senaryolarda ön işlem safhasında iyonkürenin 3B küresel hücre yapısı  $1^\circ$  enlem ve boylam çözünürlüğü ve 2 km yükseklik çözünürlüğü ile oluşturulmuştur. Kaynak konumu Ankara'dır. Saat 14:00 GS için sakin ve fırtınalı tarihlerde, 6 MHz'de, kaynaktan çıkış yükseliş açısı  $30^\circ$ , yanca açısı  $90^\circ$  olan dalganın yayılım yolu grafiği Şekil 6.7'de verilmektedir.

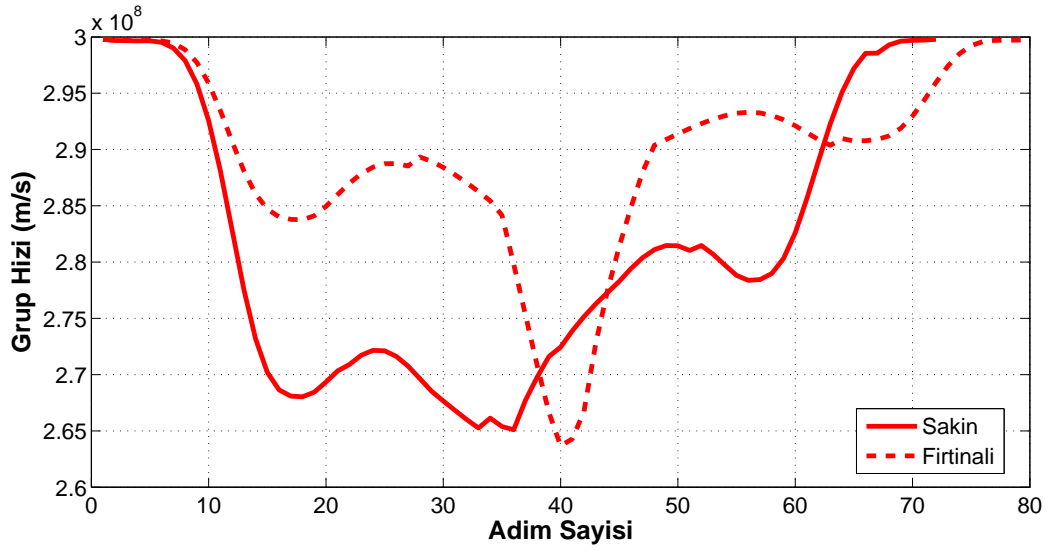


Şekil 6.7. Sakin gün 17 Nisan 2011 ve fırtınalı gün 25 Ekim 2011, sıradan ve sıradışı dalga yayılım yolu, 14:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı  $30^\circ$ , yanca açısı  $90^\circ$ .

Sakin ve fırtınalı günler için grup hızının, dalga yayılımındaki ışın izleme adımına göre grafikleri karşılaştırmalı olarak çizdirilmiştir. Saat 14:00 GS için elde edilen sıradan dalganın grup hızı grafiği Şekil 6.8'de, sıradışı dalganın grup hızı grafiği Şekil 6.9'te verilmektedir. Grafiklerde x eksenini adım sayısıdır. Bir adım dalganın yayılımında bir hücreden diğerine geçmesidir. Adım sayısı dalganın 3B küresel hücre yapısı içindeki yayılımında izlediği hücre sayısıdır. İlk adım dalganın kaynaktan iyonküre sınırına yol alması aşamasıdır. Dalga yeryüzüne geri dönüyor ise son adım dalganın iyonüreden çıkıp yeryüzüne ulaşması aşaması olmaktadır. Toplam adım sayısı ise dalganın izlediği yol boyunca geçtiği hücre sayısı ile yerküre ve iyonküre arasındaki aşamaların toplamıdır. Verilen grafiklerde sakin ve fırtınalı gün için dalga yayılım yolunun adım sayılarının eşit olmadığı göz önünde bulundurulmalıdır.

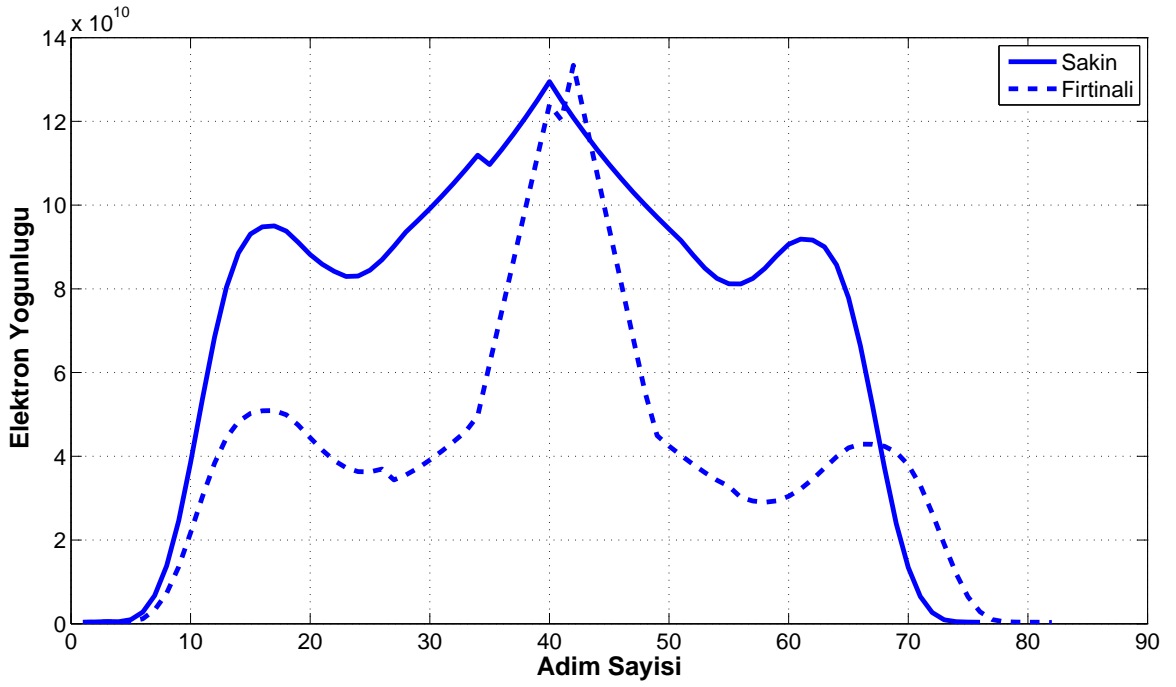


Şekil 6.8. Sakin ve fırtınalı gün sıradan dalga yayılımının grup hızı değişimi, 17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 14:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°.

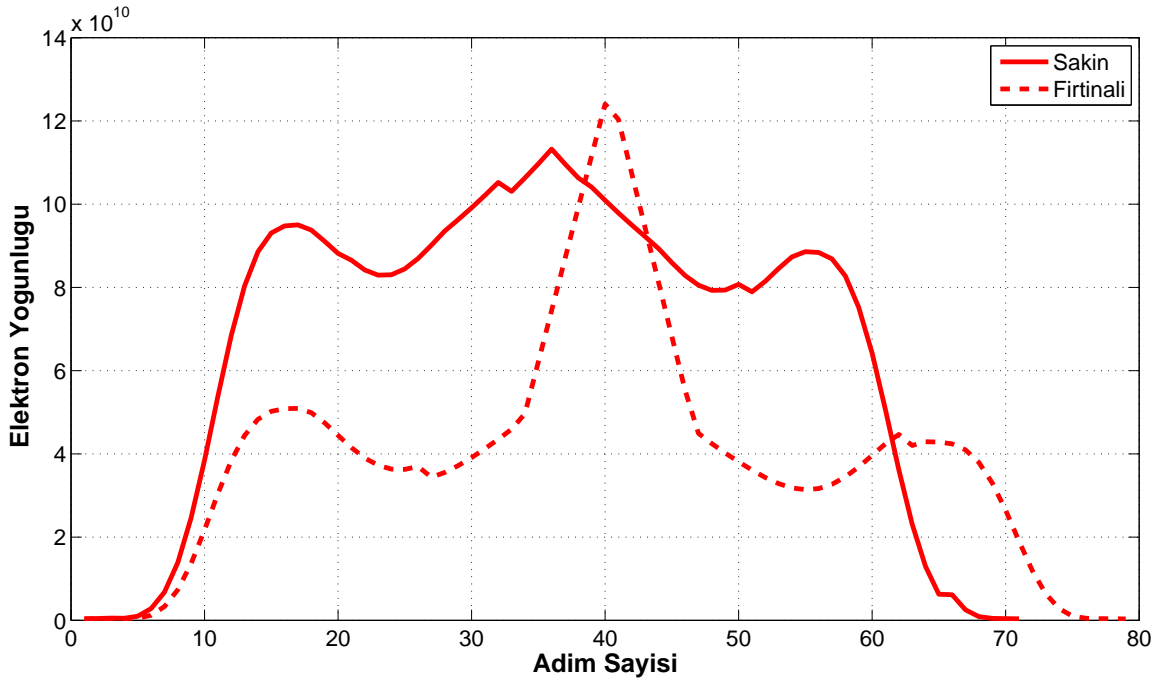


Şekil 6.9. Sakin ve fırtınalı gün sıradışı dalga yayılımının grup hızı değişimi, 17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 14:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°.

Saat 14:00 GS için sakin ve fırtınalı tarihlerde, 6 MHz'de, kaynaktan çıkış yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90° olan dalganın izlediği yol boyunca geçtiği hücrelerin elektron yoğunluklarının adım sayısına karşılık çizdirildiği grafikler sıradan dalga için Şekil 6.10'de, sıradışı dalga için Şekil 6.11'de verilmektedir.



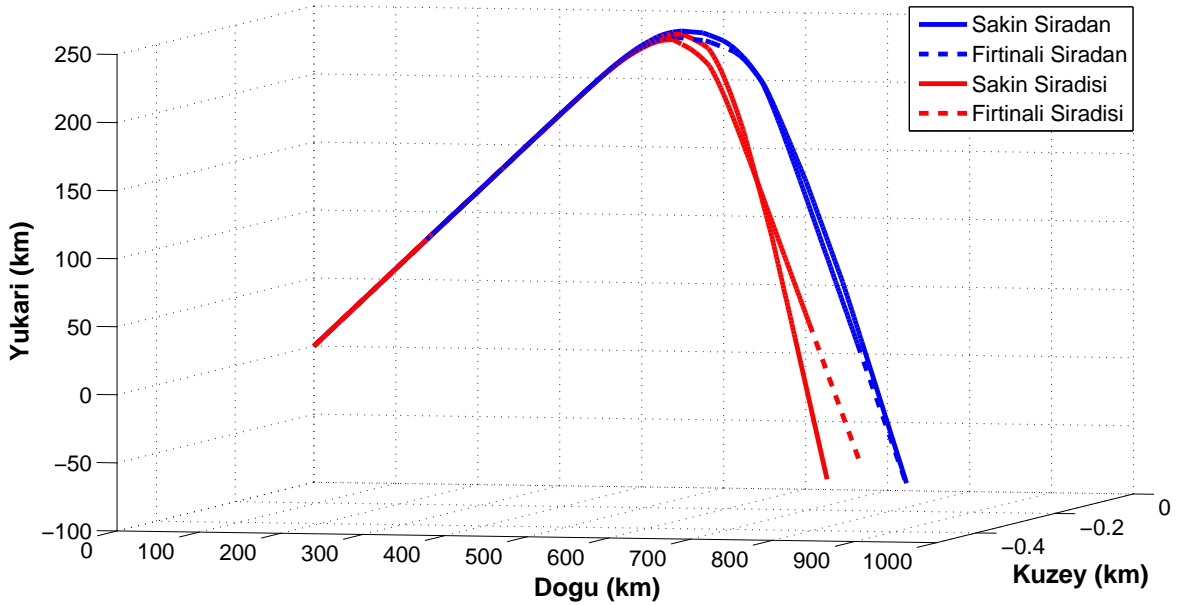
Şekil 6.10. Sıradan dalganın yayıldığı yol boyunca elektron yoğunluğu değişimi, 17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 14:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°.



Şekil 6.11. Sıradışı dalganın yayıldığı yol boyunca elektron yoğunluğu değişimi, 17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 14:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°.

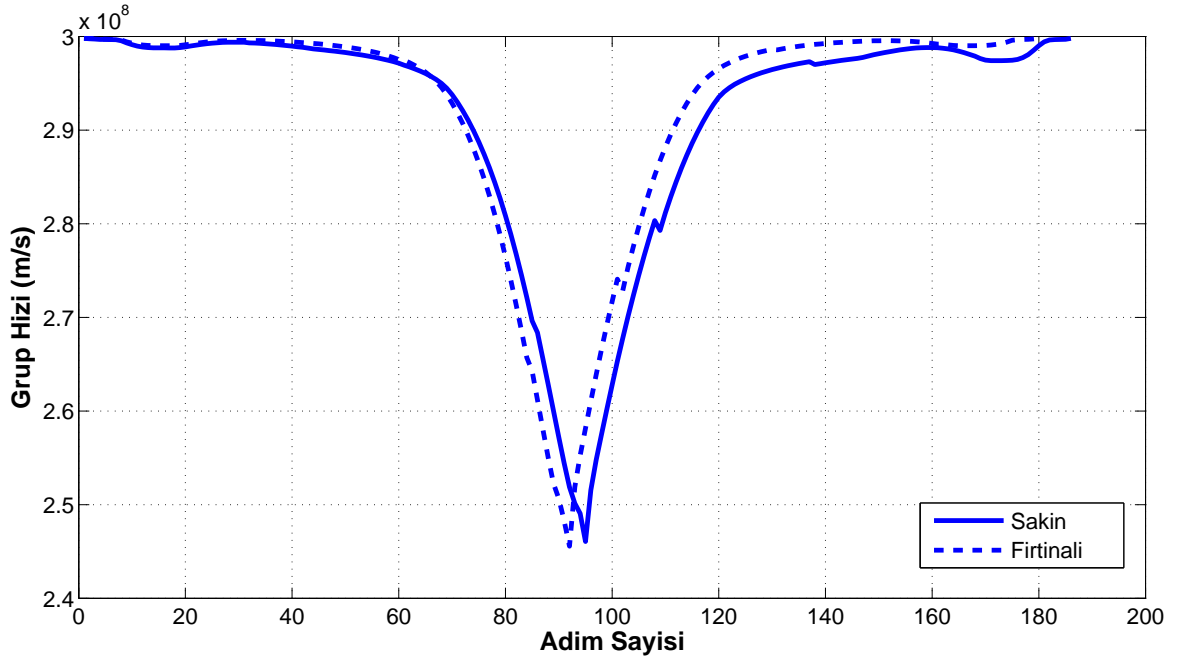
Verilen örnek senaryolar üzerinden grup hızının dalga yayılımı boyunca değişimine bakıldığında dalga iyonkürede yükselerek ilerlerken grup hızı önce azalmakta sonra bir miktar artmakta ve daha sonra tekrar azalarak iyonküreden yansıma yüksekliğine geldiğinde en küçük değerine ulaşmaktadır. Dalga iyonküreden yansıyarak geri döndüğünde, yeryüzüne doğru ilerlerken grup hızı önce artmakta, sonra bir miktar azalmakta ve daha sonra artarak dalganın serbest uzaydaki hızına gelmektedir. Hem sıradan dalga hem de sıradışı dalga yayılımında sakin günde grup hızının ulaştığı en küçük değer fırtınalı güne göre daha büyük değer almaktadır. Sıradan ve sıradışı dalganın sakin ve fırtınalı günlerde saat 14:00 GS'de izlediği yol boyunca elektron yoğunluğu değişimi ile grup hızı grafikleri karşılaştırıldığında davranış olarak aralarında ters orantı olduğu gözlenmektedir.

Benzer çalışma 17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, saat 02:00 GT için de uygulanmıştır. 6 MHz'de, kaynaktan çıkış yükseliş açısı  $30^\circ$ , yanca açısı  $90^\circ$  olan dalganın yayılım yolu grafiği Şekil 6.12'de verilmektedir.



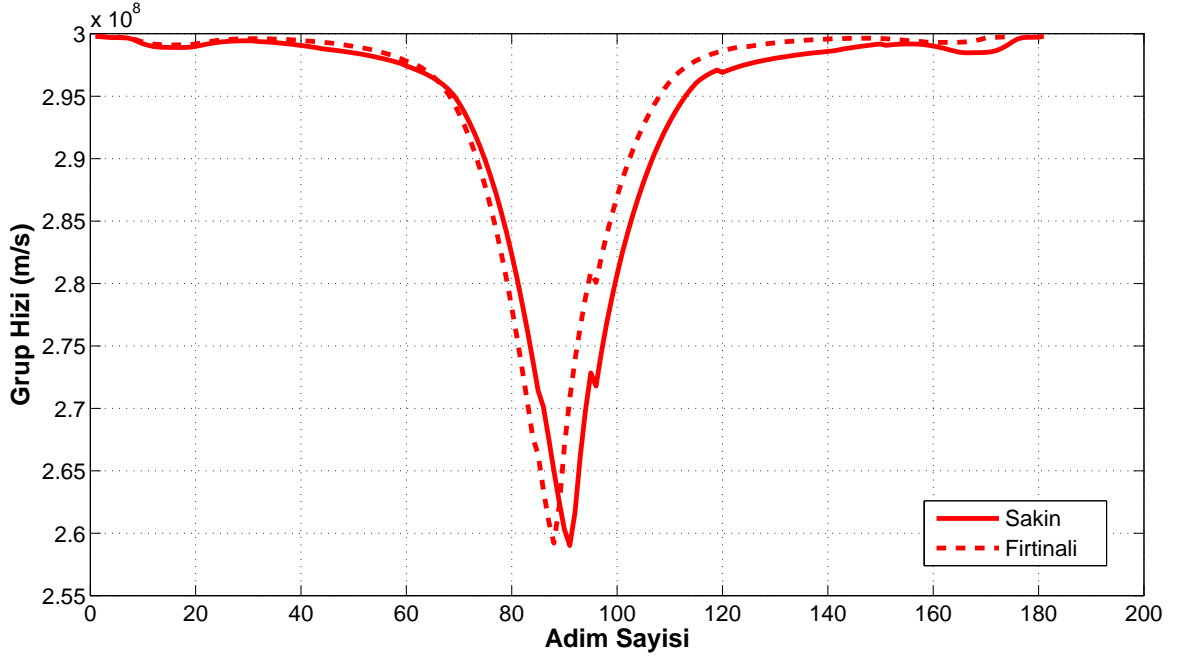
Şekil 6.12. Sakin gün 17 Nisan 2011 ve fırtınalı gün 25 Ekim 2011, sıradan ve sıradışı dalga yayılım yolu, 02:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı  $30^\circ$ , yanca açısı  $90^\circ$ .

Saat 02:00 GS için elde edilen sıradan dalganın grup hızı grafiği Şekil 6.13'de, sıradışı dalganın grup hızı grafiği Şekil 6.14'de verilmektedir.



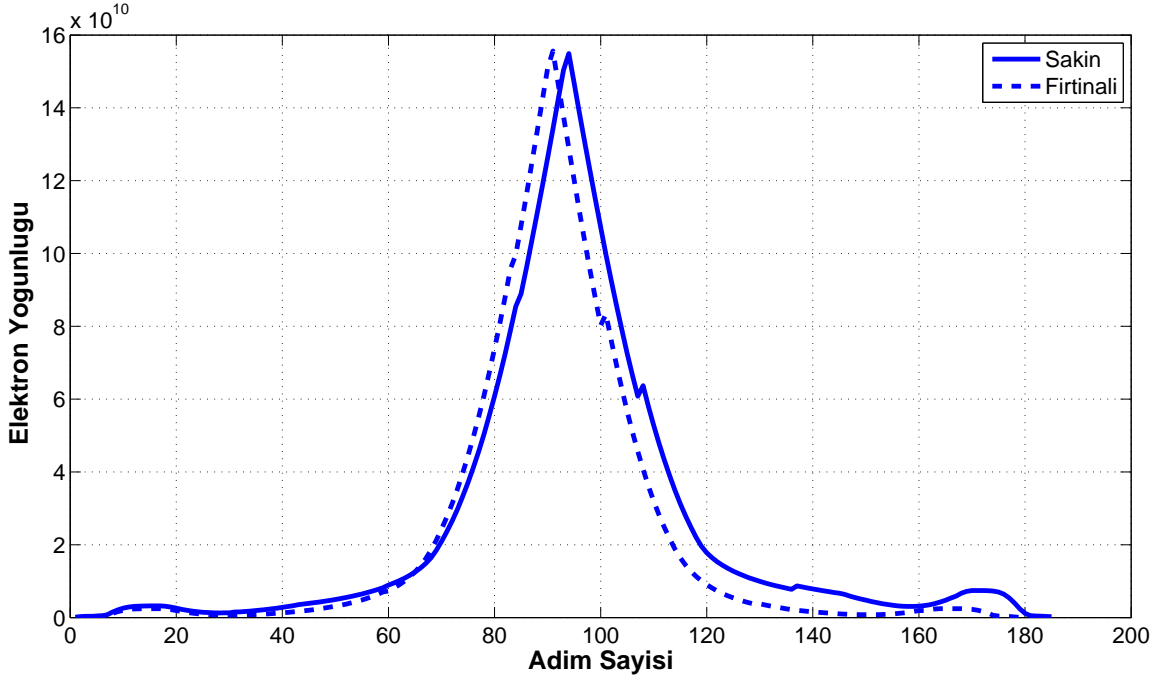
Şekil 6.13. Sakin ve fırtınalı gũn sıradan dalga yayılımının grup hızı değişimi, 17 Nisan 2011 sakin gũn, 25 Ekim 2011 fırtınalı gũn, 14:00 GS, Ankara, 6 MHz, yũkseliŐ açısı  $30^\circ$ , yanca açısı  $90^\circ$ .



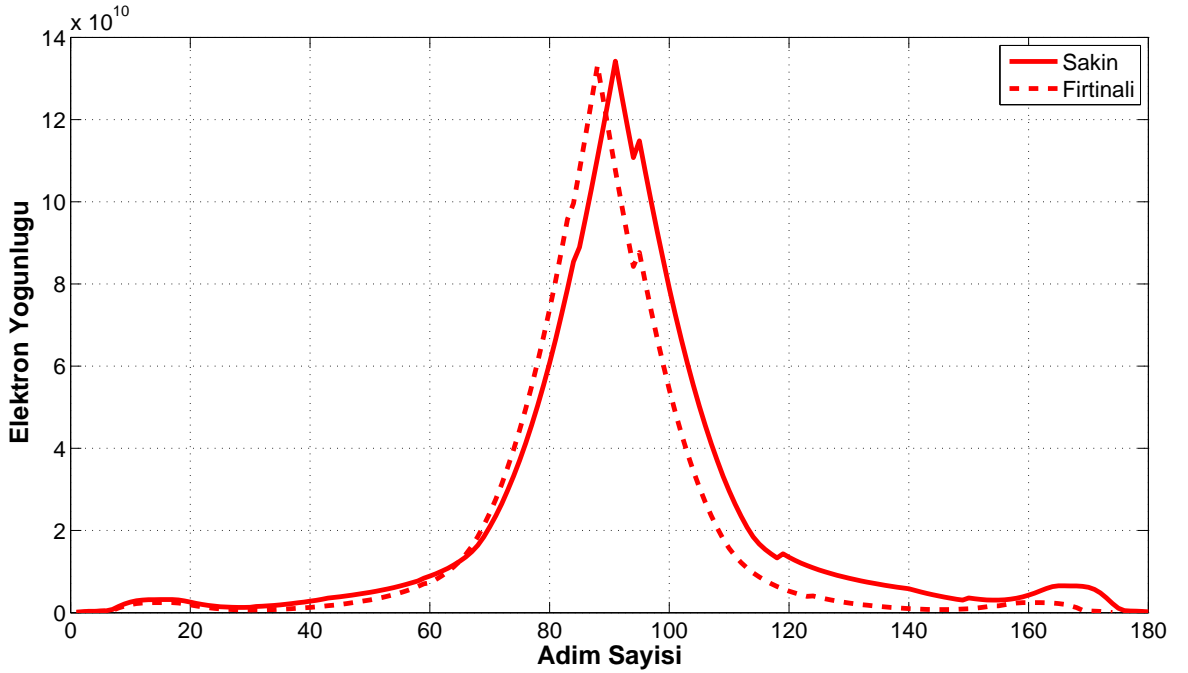


Şekil 6.14. Sakin ve fırtınalı gün sıradışı dalga yayılımının grup hızı değişimi, 17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 14:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°.

Saat 02:00 GS için sakin ve fırtınalı tarihlerde, 6 MHz'de, kaynaktan çıkış yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90° olan dalganın izlediği yol boyunca geçtiği hücrelerin elektron yoğunluklarının adım sayısına karşılık çizdirildiği grafikler sıradan dalga için Şekil 6.15'te, sıradışı dalga için Şekil 6.16'da verilmektedir.



Şekil 6.15. Sıradan dalganın yayıldığı yol boyunca elektron yoğunluğu değişimi, 17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 02:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°.



Şekil 6.16. Sıradışı dalganın yayıldığı yol boyunca elektron yoğunluğu değişimi, 17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 02:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°.

Saat 02:00 GS'de sıradan ve sıradışı dalga için elde edilen grup hızı grafiklerinde dalga iyonkürede yükselerek ilerlerken grup hızı azalmakta, dalga iyonkürede yansıma yüksekliğine ulaştığında grup hızı en küçük değerini almakta ve dalga kırılıp yerküreye doğru ilerlerken grup hızı artmaktadır. Saat 02:00 GS'de sıradan ve sıradışı dalga için elde edilen elektron yoğunluğu grafikleri incelendiğinde grup hızının elektron yoğunluğu ile ters orantı yönsemesine sahip olduğu görülmektedir. Dalganın yayılım yolu incelendiğinde 02:00 GS'de sıradan ve sıradışı dalgalar sakin ve fırtınalı günlerde yakın yollar izlemektedir. Bunun sonucu olarak elektron yoğunlukları ve grup hızları değişim grafikleri sakin ve fırtınalı günler için birbirine yakın çıkmaktadır.

### 6.3 Faz Hızı

Bu tez kapsamında geliştirilen dalga yayılım modelinde dalganın faz hızı hesaplanmaktadır. Bu hesaplamaların yapılabilmesi için IONOLAB-RAY algoritmasında 'fphasevelocity' fonksiyonu geliştirilmiştir. Dalganın faz hızı,

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} \quad (6.19)$$

olarak tanımlanmaktadır. Eş. 6.7'ye göre

$$k_o = \omega \sqrt{\epsilon_o \mu_o n_{Re}} \quad (6.20)$$

olarak ifade edilmektedir. Dalganın serbest uzaydaki hızı  $c$  ile gösterildiğinde, faz hızı için Eş. 6.19'de verilen ifade

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_o \mu_o n_{Re}}} \quad (6.21)$$

$$v_p = \frac{c}{n_{Re}} \quad (6.22)$$

haline gelmektedir.

Çizelge 6.3. Faz hızı modülünün çıktı parametreleri.

Parametre	Açıklama	Format
<i>phase_velocity_ionosphere</i>	Yalnız iyonküre katmanında, yayılım yolu boyunca dalganın içinden geçtiği hücrelerdeki faz hızları	$\mathcal{R}$ Dalga yayılımında iyonküre içindeki adım sayısı boyutunda dizi
<i>phase_velocity</i>	Dalganın yayılım yolu boyunca yeryüzü-iyonküre arasındaki bölge(ler) dahil içinden geçtiği tüm hücrelerdeki faz hızları	$\mathcal{R}$ Dalga yayılımındaki toplam adım sayısı boyutunda dizi

IONOLAB-RAY algoritması ile faz hızını hesaplamak için öncelikle istenilen senaryolara karşılık ana koşul çalıştırılmış olmalıdır. Ana koşul aşamında kaydedilen veriler kullanılarak,

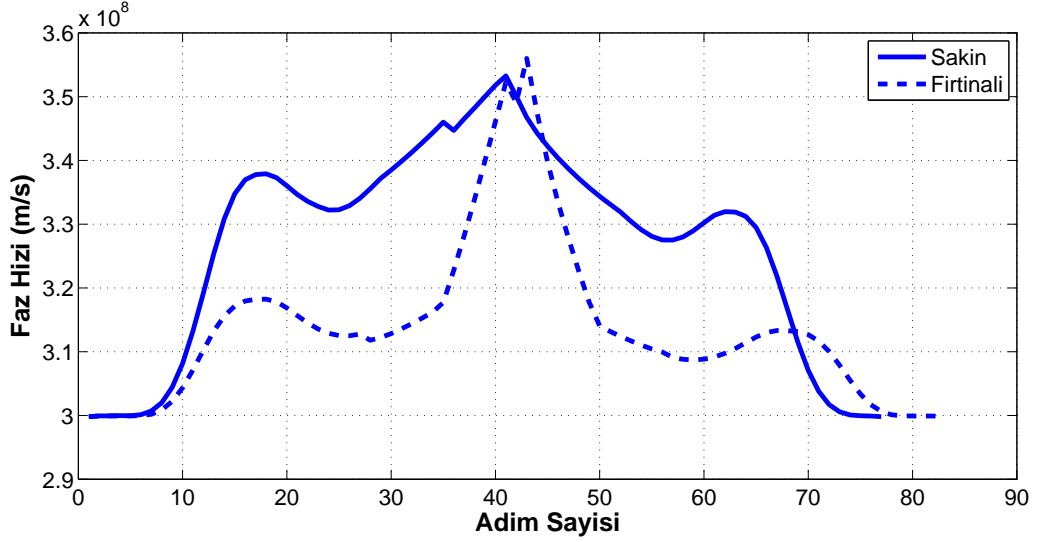
$$[phase\_velocity\_ionosphere, phase\_velocity] = fphasevelocity(data, freq\_i, tlat\_i, tlong\_i, theight\_i, telev\_i, tazi\_i, datetime\_i)$$

komutu ile faz hızı modülü koşturulabilmektedir. Bu modülün girdi parametreleri Çizelge 5.6'da açıklanmaktadır. Faz hızı modülünün çıktı parametreleri ise Çizelge 6.3'te verilmektedir.

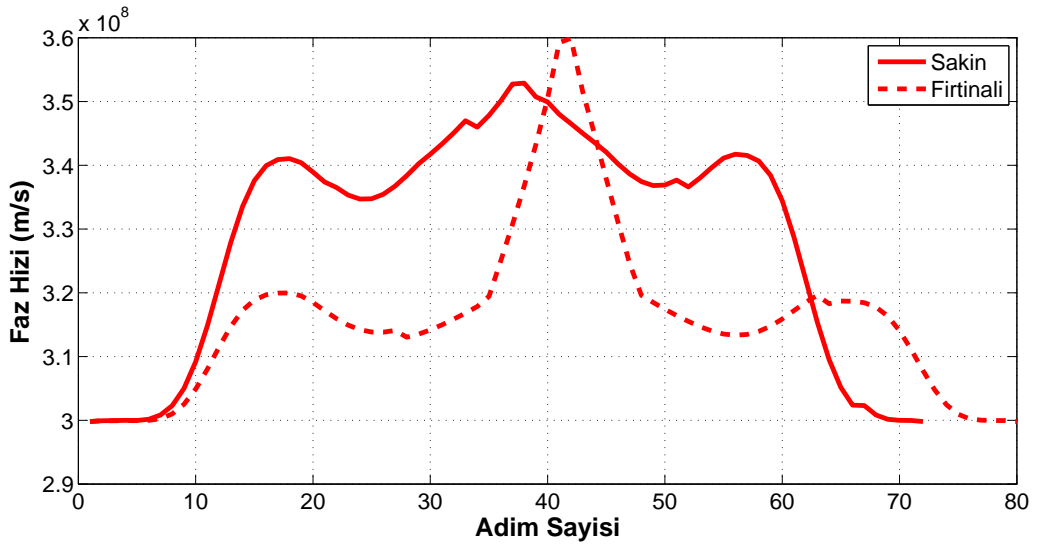
IONOLAB-RAY algoritması kullanılarak 17 Nisan 2011 sakin gün ve 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 02:00 GS ve 14:00 GS için sıradan ve sıradışı dalga yayılımında ışın izlemenin her bir adımına karşılık faz hızı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda koşturulan senaryolarda ön işlem safhasında iyonkürenin 3B küresel hücre yapısı 1°enlem ve boylam çözünürlüğü ve 2 km yükseklik çözünürlüğü ile oluşturulmuştur. Kaynak konumu Ankara'dır.

Saat 14:00 GS için sakin ve fırtınalı tarihlerde, 6 MHz'de, kaynaktan çıkış yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°olan dalganın yayılım yolu grafiği Şekil 6.7'de verilmektedir. Belirtilen sakin ve fırtınalı günlerde 14:00 GS için faz hızının, dalga yayılımındaki ışın izleme adımına göre grafikleri karşılaştırmalı olarak çizdirilmiştir. Sıradan dalganın faz hızı için elde edilen grafik Şekil 6.17'de, sıra-

dışı dalganın faz hızı için elde edilen grafik Şekil 6.18’de verilmektedir. Verilen grafiklerde sakin ve fırtınalı gün için dalga yayılım yolunun adım sayılarının eşit olmadığı göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 6.17. Sakin ve fırtınalı gün sıradan dalga yayılımının faz hızı değişimi, 17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 14:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°.

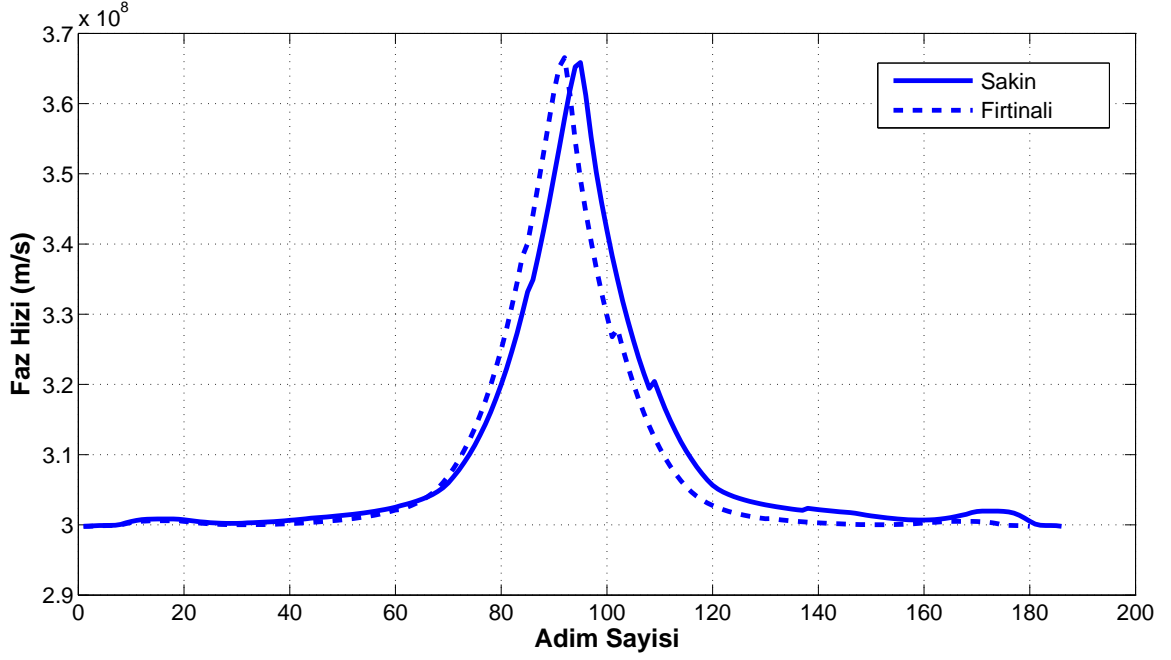


Şekil 6.18. Sakin ve fırtınalı gün sıradışı dalga yayılımının faz hızı değişimi, 17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 14:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°.

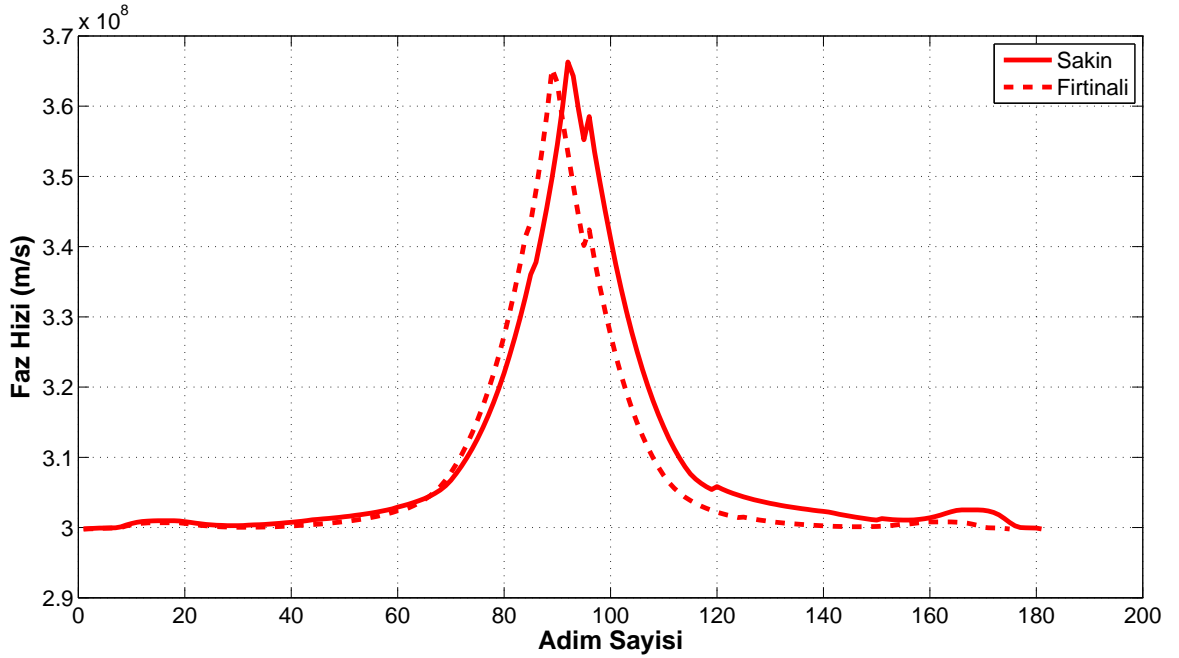
Verilen örnek senaryolar üzerinden faz hızının dalga yayılımı boyunca deği-

şimine bakıldığında dalga iyonkürede yükselerek ilerlerken faz hızı önce artmakta sonra bir miktar azalmakta ve daha sonra tekrar artarak iyonküreden yansıma yüksekliğine geldiğinde en büyük değerine ulaşmaktadır. Dalga iyonküreden yansıyarak geri döndüğünde, yeryüzüne doğru ilerlerken faz hızı önce azalmakta, sonra bir miktar artmakta ve daha sonra azalarak dalganın serbest uzaydaki hızına gelmektedir. Hem sıradan dalga hem de sıradışı dalga yayılımında sakin günde faz hızının ulaştığı en büyük değer fırtınalı güne göre daha küçük değer almaktadır. Saat 14:00 GS için sakin ve fırtınalı tarihlerde, 6 MHz'de, kaynaktan çıkış yükseliş açısı  $30^\circ$ , yanca açısı  $90^\circ$  olan dalganın izlediği yol boyunca geçtiği hücrelerin elektron yoğunluklarının adım sayısına karşılık çizdirildiği grafikler sıradan dalga için Şekil 6.10'de, sıradışı dalga için fig:NE1400sıradisi'de verilmektedir. Dalganın yayılım yolu boyunca elektron yoğunluğu değişimi ile faz hızı değişiminin birbiriyle doğru orantılı bir yönsemeye sahip olduğu görülmektedir.

Faz hızının dalganın yayılım yolu boyunca değişimi ayrıca 17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, saat 02:00 GT için incelenmiştir. 6 MHz'de, kaynaktan çıkış yükseliş açısı  $30^\circ$ , yanca açısı  $90^\circ$  olan dalganın yayılım yolu grafiği Şekil 6.12'de verilmektedir. Saat 02:00 GS için elde edilen sıradan dalganın faz hızı grafiği Şekil 6.19'de, sıradışı dalganın faz hızı grafiği Şekil 6.20'de verilmektedir.



Şekil 6.19. Sakin ve fırtınalı gün sıradan dalga yayılımının faz hızı değişimi, 17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 02:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°.



Şekil 6.20. Sakin ve fırtınalı gün sıradışı dalga yayılımının faz hızı değişimi, 17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 02:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°.

Saat 02:00 GS'de sıradan ve sıradışı dalga için elde edilen faz hızı grafiklerinde dalga iyonkürede yükselerek ilerlerken faz hızı artmakta, dalga iyonkürede yansıma yüksekliğine ulaştığında grup hızı en büyük değerini almakta ve dalga kırılıp yerküreye doğru ilerlerken faz hızı azalmaktadır. Saat 02:00 GS için sakin ve fırtınalı tarihlerde, 6 MHz'de, kaynaktan çıkış yükseliş açısı  $30^\circ$ , yanca açısı  $90^\circ$  olan dalganın izlediği yol boyunca geçtiği hücrelerin elektron yoğunluklarının adım sayısına karşılık çizdirildiği grafikler sıradan dalga için Şekil 6.15'de, sıradışı dalga için Şekil 6.16'de verilmektedir. Saat 02:00 GS için elde edilen elektron yoğunluğu grafikleri incelendiğinde grup hızının elektron yoğunluğu ile doğru orantı yönsemeye sahip olduğu görülmektedir. 02:00 GS'de sıradan ve sıradışı dalgaların sakin ve fırtınalı günlerde yayılım yolları birbirine yakın olduğundan elektron yoğunlukları ve faz hızı değişim grafikleri sakin ve fırtınalı günler için birbirine yakın çıkmaktadır.

Bölüm 6.2'de verilen grup hızı grafikleri ile ortak örnek senaryolar üzerinden bu bölümde verilen faz hızı grafikleri incelendiğinde dalganın grup ve faz hızı parametrelerinin beklenen ile uyumlu olarak birbirlerinin tersi davranış sergiledikleri gözlenmektedir.

#### **6.4 Zaman Gecikmesi**

Dalganın yayılım yolu boyunca geçirdiği zaman alıcıya gelen sinyalin analizi için büyük önem taşımaktadır. Özellikle çoklu yol durumunda farklı yolları izleyen dalgalar farklı zamanlarda alıcıya ulaşmaktadır. Bu tez kapsamında geliştirilen dalga yayılım modeli ile zaman gecikmesi hesaplanmaktadır. Bu hesaplama için IONOLAB-RAY algoritmasında 'ftimedelay' fonksiyonu geliştirilmiştir.

IONOLAB-RAY algoritmasında dalga yayılımı hücreden hücreye adım adım hesaplanmaktadır. Zaman gecikmesi dalganın izlediği yol boyunca yeryüzü ile iyonküre arasında dalganın serbest uzaydaki hızı ve aldığı yol ile; iyonküreyi temsil eden 3B küresel hücrelerin içinden geçerken o hücrelerdeki grup hızı ve aldığı yol kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu modülde zaman gecikmesi hem



herbir adım için hem de toplam değer olarak kullanıcıya sunulmaktadır. Zaman gecikmesi,  $ZG$ 'nin hesaplanmasında

$$ZG = \sum_{m=1}^M \frac{r_m}{v_{gm}} \quad (6.23)$$

matematiksel ifadesi kullanılmaktadır. İfadede  $M$  dalganın kaynaktan çıkıp yayılımını tamamlayana kadar, yani yeryüzüne dönene ya da ilgi alanı bölgenin dışına çıkana kadar, izlediği toplam adım sayısını göstermektedir.  $r_m$  dalganın her bir adımda aldığı yol,  $v_{gm}$  ise dalganın her bir adımdaki grup hızını ifade etmektedir.

IONOLAB-RAY algoritması ile faz hızını hesaplamak için öncelikle istenilen senaryolara karşılık ana koşum çalıştırılmış olmalıdır. Sonrasında grup hızı modülü koşturulmalıdır. Ana koşum ve grup hızı modüllerinde kaydedilen veriler kullanılarak,

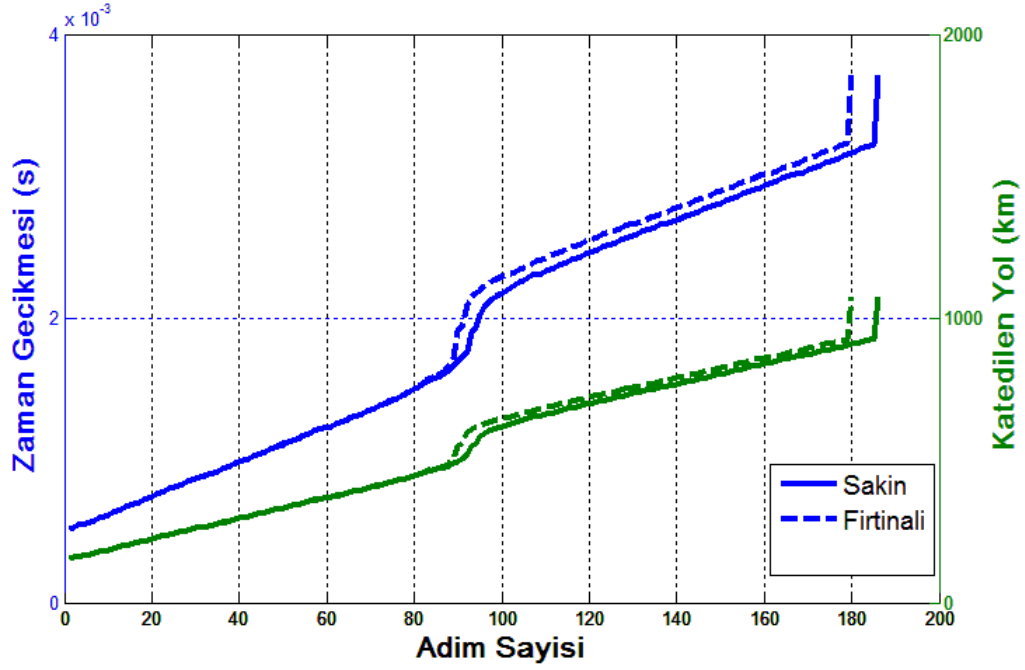
```
[time_delay, time_delay_ionosphere, total_timedelay, total_timedelay_ionosphere, path_length_step] = ftimedelay(data, freq_i, tlat_i, tlong_i, theight_i, telev_i, tazi_i, datetime_i, group_velocity)
```

komutu ile zaman gecikmesi modülü koşturulabilmektedir. Bu modülün girdi parametreleri Çizelge 5.6'de açıklanmaktadır. Çizelge 5.6'de verilen parametrelere ek olarak Çizelge 6.2'da verilen *group\_velocity* parametresi girdi olarak kullanılmaktadır. Zaman gecikmesi modülünün çıktı parametreleri ise Çizelge 6.4'da verilmektedir.

17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 02:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı  $30^\circ$ , yanca açısı  $90^\circ$  olan senaryoda sıradan ve sıradışı dalganın zaman gecikmesinin dalganın izlediği yola karşılık değişimi Şekil 6.21'de verilmektedir. Aynı grafik üzerinde dalganın izlediği yol boyunca katettiği yol zaman gecikmesi ile birlikte çizdirilmiştir. Dalganın izlediği yol boyunca her adımda katedilen yol ve zaman gecikmesi artmaktadır.

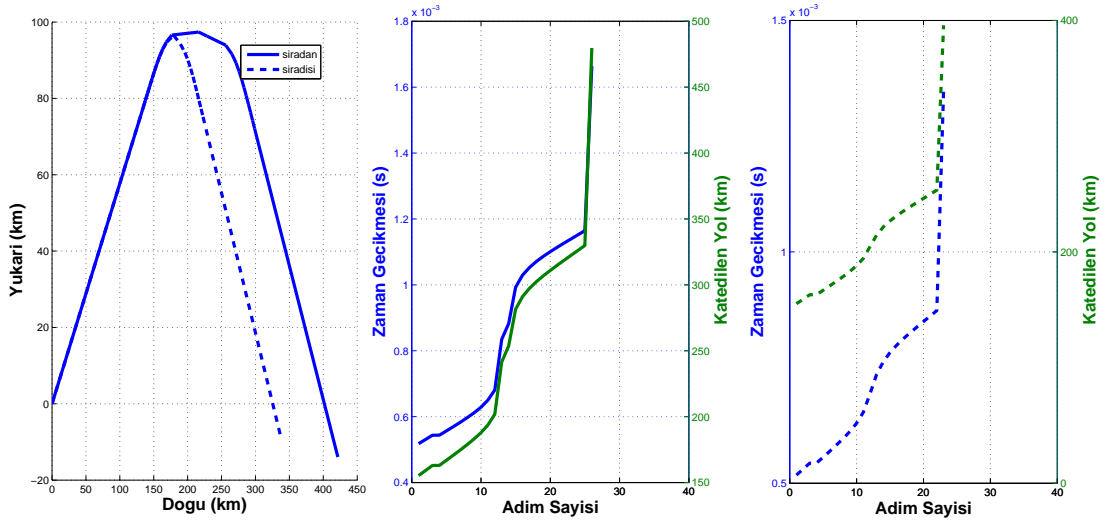
Çizelge 6.4. Zaman gecikmesi modülünün çıktı parametreleri.

Parametre	Açıklama	Format
<i>time_delay</i>	Dalganın yayılım yolu boyunca yeryüzü-iyonküre arasındaki bölge(ler) dahil içinden geçtiği tüm hücrelerdeki zaman gecikmesi	ℝ Dalga yayılımındaki toplam adım sayısı boyutunda dizi
<i>time_delay_ionosphere</i>	Yalnız iyonküre katmanında, yayılım yolu boyunca dalganın içinden geçtiği hücrelerdeki zaman gecikmesi	ℝ Dalga yayılımında iyonküre içindeki adım sayısı boyutunda dizi
<i>total_timedelay</i>	Dalganın yayılım yolu boyunca yeryüzü-iyonküre arasındaki bölge(ler) dahil içinden geçtiği tüm hücrelerdeki zaman gecikmesi toplamı	ℝ
<i>total_timedelay_ionosphere</i>	Yalnız iyonküre katmanında, yayılım yolu boyunca dalganın içinden geçtiği hücrelerdeki zaman gecikmesi toplamı	ℝ
<i>path_length_step</i>	Dalganın yayılım yolu boyunca yeryüzü-iyonküre arasındaki bölge(ler) dahil içinden geçtiği tüm hücrelerdeki zaman gecikmesi	ℝ Dalga yayılımındaki toplam adım sayısı boyutunda dizi

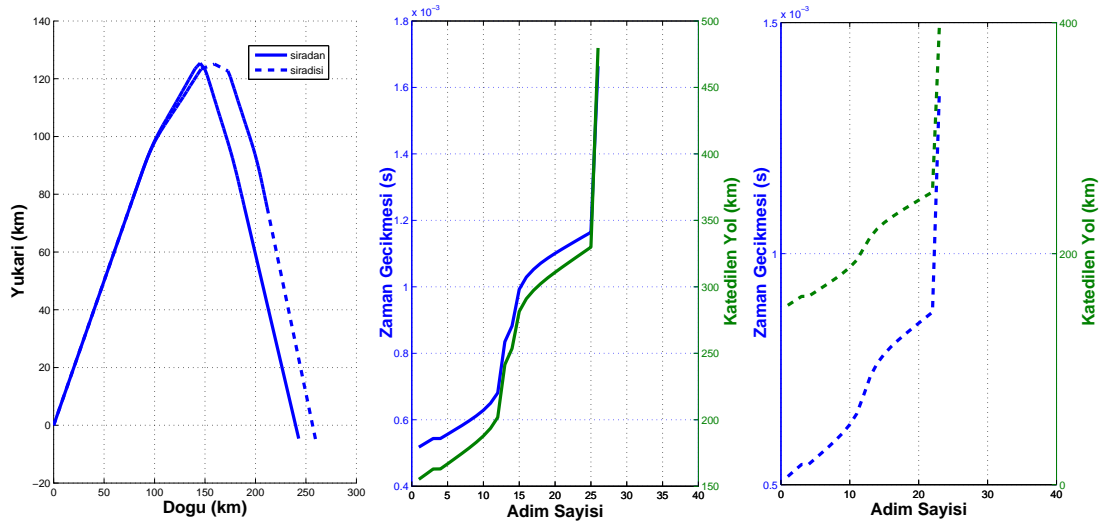


Şekil 6.21. Sakin ve fırtınalı gün sıradan dalga yayılımının zaman gecikmesi, 17 Nisan 2011 sakin gün, 25 Ekim 2011 fırtınalı gün, 02:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı  $30^\circ$ , yanca açısı  $90^\circ$ .

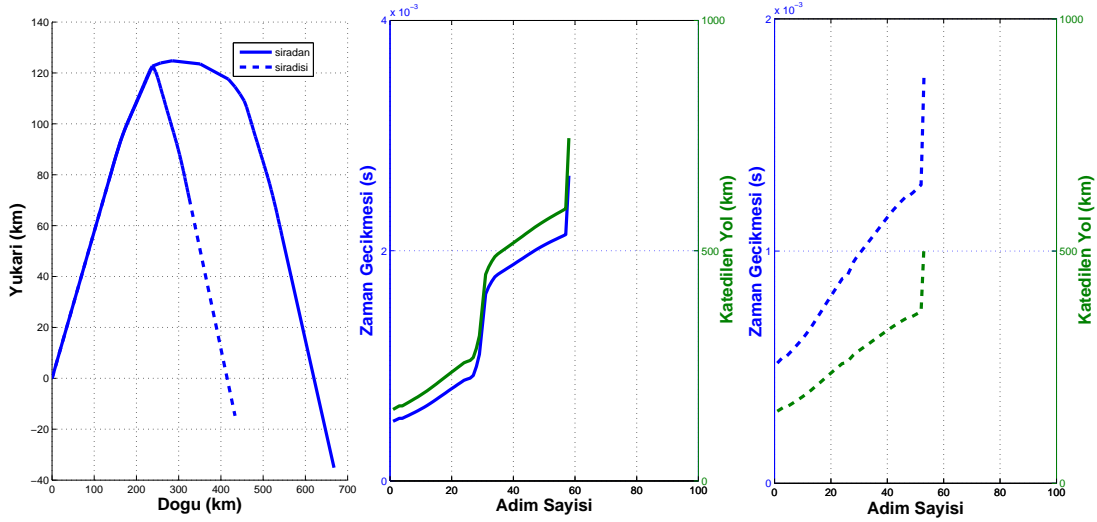
Zaman gecikmesi dalganın izlediği yola ve bu yol boyunca iyonkürenin yapısına bağlıdır. 21 Haziran 2015 tarihi, 10:00 GS'de 6 MHz ve 9 MHz yayılma frekansı ve  $30^\circ$  ile  $45^\circ$  yükseliş açısı senaryolarında sıradan ve sıradışı dalga için Şekil 6.22, Şekil 6.23, Şekil 6.24, Şekil 6.25 ve Şekil 6.25'de verilmektedir. Şekillerde soldaki grafik sıradan ve sıradışı dalganın izlediği yolun doğu-kuzey düzlemindeki görüntüsü, ortadaki grafik sıradan dalganın zaman gecikmesi ile katedilen yolu sağdaki grafik ise sıradışı dalganın zaman gecikmesi ile katedilen yolunu göstermektedir.



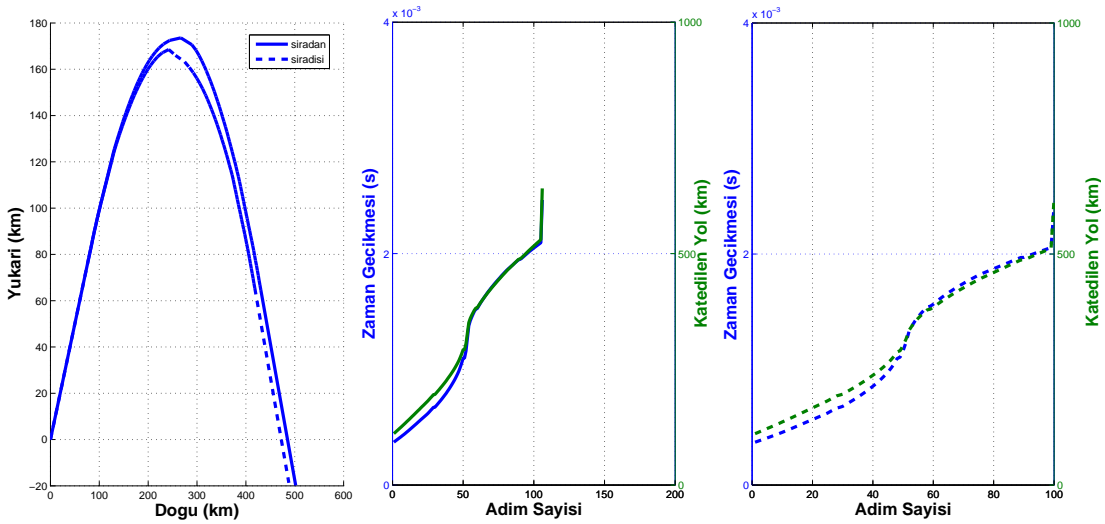
Şekil 6.22. Sıradan ve sıradışı dalganın izlediği yol ve zaman gecikmesi, 21 Haziran 2015 10:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı  $30^\circ$ , yanca açısı  $90^\circ$ .



Şekil 6.23. Sıradan ve sıradışı dalganın izlediği yol ve zaman gecikmesi, 21 Haziran 2015 10:00 GS, Ankara, 6 MHz, yükseliş açısı  $45^\circ$ , yanca açısı  $90^\circ$ .



Şekil 6.24. Sıradan ve sıradışı dalganın izlediği yol ve zaman gecikmesi, 21 Haziran 2015 10:00 GS, Ankara, 9 MHz, yükseliş açısı 30°, yanca açısı 90°.



Şekil 6.25. Sıradan ve sıradışı dalganın izlediği yol ve zaman gecikmesi, 21 Haziran 2015 10:00 GS, Ankara, 9 MHz, yükseliş açısı 45°, yanca açısı 90°.

## 6.5 Faraday Dönmesi

Doğrusal kutuplanmalı bir dalga yön bağımlı bir ortama girdiğinde farklı yayılım sabitlerine sahip dairesel kutuplanmalı iki dalga olarak ilerlemektedir. Bu iki dalga bir noktada doğrusal kutuplanmalı bir dalga haline gelecek şekilde

toplandığında doğrusal kutuplanma düzlemi dönmektedir. Bu durum Faraday dönmesi olarak bilinmektedir. Dalga iyonküreye girdiğinde yön bağımlılığın sonucu olarak sıradan ve sıra dışı olmak üzere iki dalgaya ayrılmaktadır. Doğrusal kutuplanmalı dalganın iyonküreye girmesi sonrasında sıradan ve sıra dışı dalgalar dairesel kutuplanmalı olarak ilerlemektedir. Bu iki dalga yansiyarak iyonküreden çıktıklarında ve toplandıklarında elde edilen doğrusal kutuplanmalı dalganın kutuplanma açısı dönmektedir. Bu Faraday dönmesini hesaplayan modül geliştirilmiştir. Sıradan dalganın ilerlediği her bir hücredeki faz kayması  $FK_{O_m}$ , sıra dışı dalganın ilerlediği her bir hücredeki faz kayması  $FK_{X_m}$

$$FK_{O_m} = -\omega\sqrt{\mu_o\epsilon_o}n_{O_m}r_{O_m} \quad (6.24)$$

$$FK_{X_s} = -\omega\sqrt{\mu_o\epsilon_o}n_{X_s}r_{X_s} \quad (6.25)$$

olarak verilmektedir. Buna göre sıradan dalganın  $M$  kadar, sıradışı dalganın  $S$  kadar hücreden geçtiği ve her ikisinin de yeryüzüne döndüğü durumda  $FD$  ile gösterilen Faraday dönmesi

$$FD = \frac{\left(\sum_{m=1}^M FK_{O_m} - \sum_{s=1}^S FK_{X_s}\right)}{2} \quad (6.26)$$

ile hesaplanmaktadır.

IONOLAB-RAY algoritması ile Faraday dönmesini hesaplamak için öncelikle istenilen senaryolara karşılık ana koşul çalıştırılmış olmalıdır. Ana koşul aşamında kaydedilen veriler kullanılarak,

`[faraday_rotation, Exyz_received] = ffaradayrotation(ord, exord, freq_i, tlat_i, tlong_i, theight_i, telev_i, tazi_i, datetime_i, Etheta, Ephi)`

komutu ile grup hızı modülü koşturulabilmektedir. Bu modülün girdi parametreleri Çizelge 5.6'de açıklanmaktadır.Çizelge 5.6'de verilen parametrelerin yanı

Çizelge 6.5. Faraday dönmesi modülünün girdi parametreleri.

Parametre	Açıklama	Format
<i>Etheta</i>	Kaynaktan çıkan dalganın büyüklüğünün küresel koordinatlardaki $\theta$ bileşeni	$\Re$
<i>Ephi</i>	Kaynaktan çıkan dalganın büyüklüğünün küresel koordinatlardaki $\phi$ bileşeni	$\Re$

Çizelge 6.6. Faraday dönmesi modülünün çıktı parametreleri.

Parametre	Açıklama	Format
<i>faraday_rotation</i>	Kaynaktan çıkan dalganın kutuplanmasındaki açısal dönme	$\Re$ rad
<i>Exyz_received</i>	Kaynağı merkez alan DKY yerel koordinatında yeryüzüne ulaşan dalganın bileşenleri	$\Re$

sıra Çizelge 6.5 tablosunda verilen parametreler de Faraday dönmesi modülünün diğer girdi parametreleridir.

Faraday dönmesi modülünün çıktı parametreleri ise Çizelge 6.2'da verilmektedir.

## 7. IONOLAB-RAY ALGORİTMASININ GENİŞLETİLMİŞ UYGULAMALARI

Bu bölümde IONOLAB-RAY algoritmasının ana hedefi olan dalga yayılım yolu ve dalga parametrelerinin hesaplanmasının yanı sıra farklı uygulamalarda kullanılması ile ilgili örnekler verilmektedir. Bu örneklerden ilki IONOLAB-RAY algoritması ile ionogram yapılandırılmasıdır. Bu bölümde ionosonda ya da dijisonda ile yapılan ölçümlere dayalı olarak oluşturulan ionogramlar ile IONOLAB-RAY ile türetilen ionogramlar karşılaştırılmakta, böylece bu tez kapsamında geliştirilen dalga yayılım yolu ve dalganın grup hızı ile zaman gecikmesi hesaplamalarının geçerliliği gösterilmektedir. Diğer uygulama ise IONOLAB-RAY algoritmasının TEİ verisi ile beslenebilmesi özelliğinden yararlanılarak, TEİ verilerinin istatistiksel dağılımlarına göre ionküre modelinin türetilmesi imkanı ortaya çıkmaktadır. Buradan yola çıkarak IONOLAB-RAY kullanılarak dalga yayılım yolu ve dalga parametreleri bu istatistiksel girdilere karşı hesaplanabilmektedir.

### 7.1 IONOLAB-RAY Algoritması ile İyonogram Yapılandırılması

Bu tez kapsamında geliştirilen KD bandında dalga yayılım modeli kullanılarak ionosonda ya da dijisondaların yaptıkları işlevlerin modellenmesi mümkündür. İyonosondalar Bölüm 2.2'de anlatıldığı üzere bir anlamda ionküreyi inceleyen radarlardır. Çıktı olarak frekansa karşılık dalganın ionküreden yansıdığı sanal yükseklik grafiği olan ionogramları türetilir. Temel çalışma prensipleri aşağıda maddeler halinde verilen işlem adımları ile özetlenebilmektedir.

- Yaklaşık olarak 1-20 MHz frekans aralığında gökyüzüne doğru sinyaller gönderilmektedir.
- İyonküreden yansiyarak geri dönen sinyallerden tekrar ionosonda üzerine düşenler toplanmaktadır.
- Toplanan sinyallerden her bir frekans bileşeninin aldığı yol boyunca geçirdiği zaman hesaplanmaktadır.



- Toplanan sinyallerin kutuplanmasına bakılarak sıradan ve sıradışı dalga ayrıştırılmaktadır.
- Sıradan ve sıradışı dalga için ayrı ayrı frekansa karşılık sanal yükseklik grafiği çizdirilmektedir.

İyonogramlarda dalganın iyonküreden yansıdığı gerçek yükseklik yerine sanal yükseklik noktaları işaretlenmektedir. Bunun sebebi dalganın iyonkürede hızının yavaşlaması ve iyonosondalar tarafından dalganın gerçek hızının bilinmemesidir. İşlem adımlarında belirtilen sanal yükseklik dalganın iyonkürede serbest uzaydaki hızı ile yol alması kabulü altında hesaplanan, dalganın yol aldığı süre boyunca iyonkürede çıkmış olabileceği yüksekliktir.

İyonogramlarda genellikle sıradan ve sıradışı dalga için frekansa karşılık sanal yükseklik işaretlerinin yanı sıra iyonosondaya düşen farklı sinyallerin etkisiyle işaretlenmiş noktalar da bulunmaktadır. Bu noktalar gökyüzüne gönderilen dalgaların iyonküreden yansıyarak yeryüzüne gelmesinin ardından tekrar yeryüzünden yasımaya uğrayan ve bunun sonucunda 2 veya daha fazla kere yansıma sonrası iyonosondaya ulaşan dalgalardan kaynaklanabilmektedir. Bunun yanı sıra farklı iyonosondalardan kaynaklanan dalgaların alıcı iyonosondaya düşmesi yani gökyüzünden dik yönde değil, açılı olarak iyonosondaya gelen dalgalar da iyonograma işaretlenebilmektedir. İyonogram üzerinde bu açılı dalgalar daha yüksek frekanslarda gözlenebilmektedir.

İyonogramlar ile ilgili bir diğer durum ise sıradan ve sıradışı dalganın her zaman gerçek anlamda ayırt edilmesinde ortaya çıkabilen zorluklardır.

IONOLAB-RAY bir benzetim algoritması olduğundan model çerçevesinde iyonküreye gönderilen dalganın gerçek yansıma yüksekliğini sıradan ve sıradışı dalgayı ayrı ayrı hesaplayabilmektedir. Bunun yanı sıra IONOLAB-RAY ile dalganın aldığı yol boyunca grup ve faz hızı ile zaman gecikmesi sağlanabilmektedir.

IONOLAB-RAY ile yapılan benzetimler ile iyonogramların karşılaştırılması IONOLAB-RAY algoritmasının dalga yayılım modelinin, grup hızının ve zaman gecikmesi hızının geçerlenmesi olmaktadır. Bu kapsamda IONOLAB-RAY ile iyonogram elde etmek için aşağıda verilen maddelerdeki işlemler yapılmaktadır. Bu işlemler sıradan ve sıradışı dalgaya aynı şekilde uygulanmaktadır.

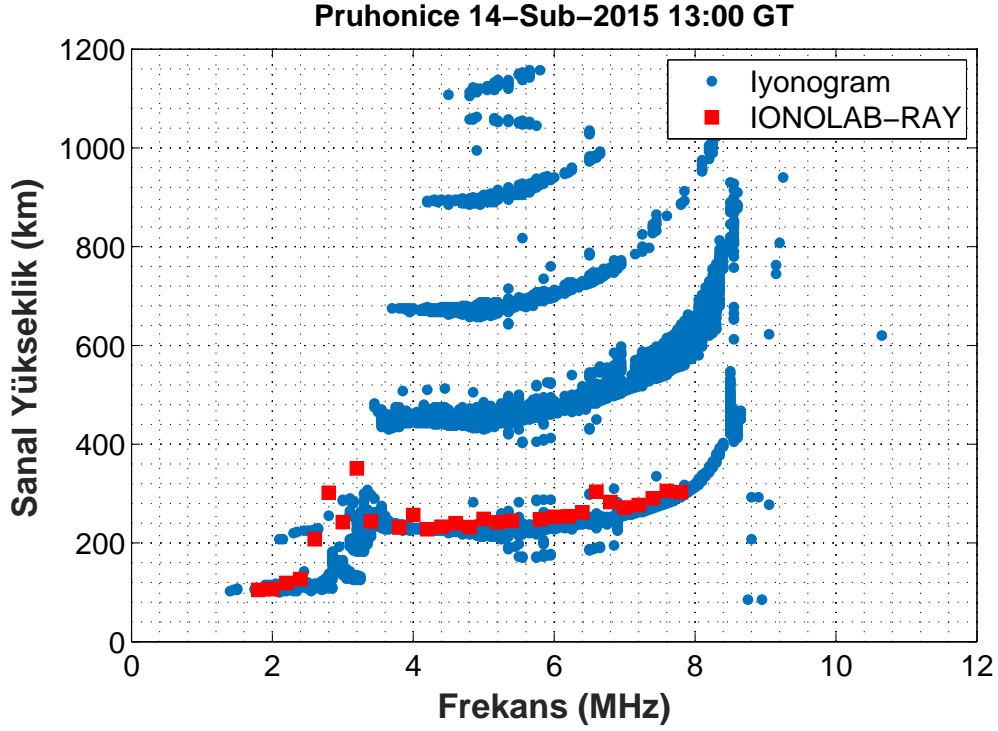
- İyonogram çıktısı kullanılacak olan iyonosonda ya da dijisondanın yeryüzündeki konumu kaynak konumunu belirtmektedir.
- Kaynak konumunun yakın çevresini kapsayacak bir ilgi alanı bölge tanımlanır.
- Bu ilgi alanı bölgede enlem, boylam ve yükseklikte yüksek çözünürlükte 3 boyutlu küresel hücre yapısı oluşturulur. Bu bölge ile iyonogramın elde edildiği yani ölçümün yapıldığı tarih ve saat için ön işlem fazı çalıştırılır. Ön işlem fazında ölçüm konum ve zamanındaki mevcut iyonkürenin modele daha iyi yansıtılabilmesi için IRI-Plas ölçüm için verilen foF2 ve hmF2 değerleri ile beslenir.
- Kaynak konumundan yükseliş açısı dik açığa yakın bir açı ile gönderilen dalganın izlediği yol ana işlem ile hesaplanır. Ana işlemde frekans parametresine bağlı çoklu koşum yapılır. İstenilen çözünürlükte gereken frekans bandı taranabilir. Yanca açısında 360° taranabilir.
- Ana işlem sonucunda sıradan ve sıradışı dalga verileri ayrı ayrı iyonogram çizdirme modülüne girdi olarak verilir.
- İyonogram çizdirme modülü dalga yayılım yolunda dalganın yeryüzünde kaynağın algılayabileceği bölgeye geri dönen dalgalar ayırt edilir. Bu dalgalar için dalganın yansımaya uğradığı yükseklik adımı hesaplanır. Bu adıma kadar dalganın grup hızı ve grup hızı kullanılarak zaman gecikmesi elde edilir.

- Zaman gecikmesinin hesaplanmasında, dalga kaynaktan tam dik gönderilemediğinden, dalganın aldığı yolun başucuna izdüşümü kullanılır.
- Zaman gecikmesi kullanılarak bu sürede dalganın serbest uzaydaki hızı kullanılarak sanal yükseklik hesaplanır.
- Frekansa karşılık sanal yükseklik değerlerinin grafiği çizdirilir.

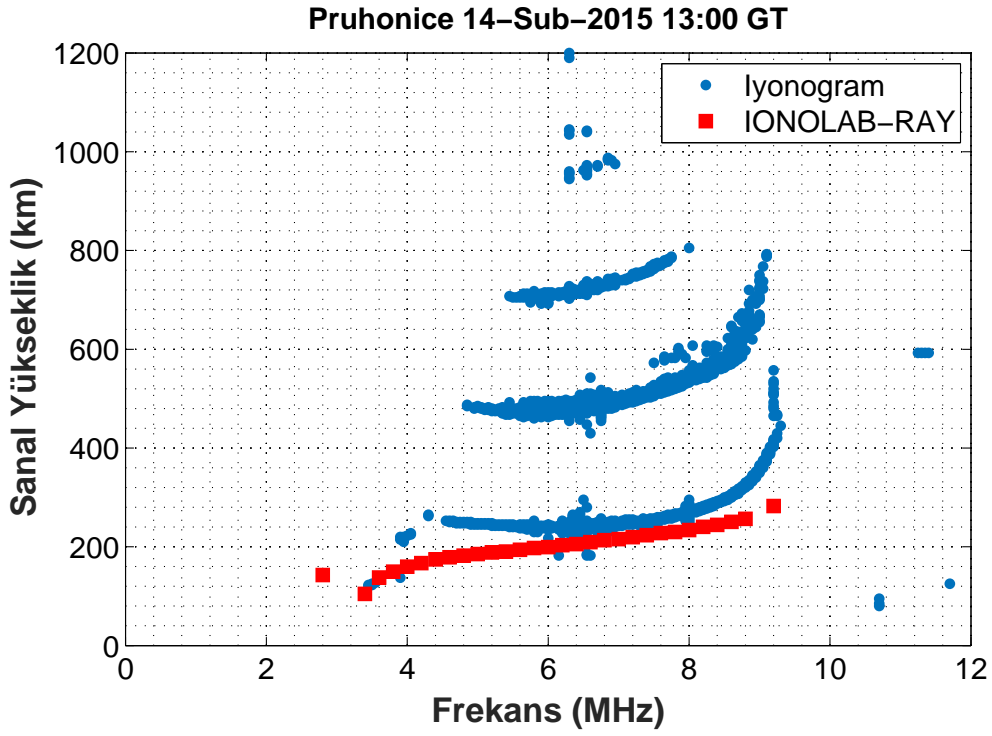
Yukarıda verilen işlem adımları uygulanarak Pruhonice'de ( $49.99^\circ$  K,  $14.55^\circ$  D) bulunan dijisondan elde edilen ionogramlar ile IONOLAB-RAY ile türetilen ionogramlar karşılaştırılmıştır. IONOLAB-RAY ile örnek olarak seçilen tarih ve saatlerde ionogramların çizdirilebilmesi için ön koşulda öncelikle ionoküre modeli enlem ve boylamda  $1^\circ$ , yükseklikte 5 km adımlar ile oluşturulmuştur. IRI-Plas, veri ile beslenmeden, TEİ verisi ile beslenerek, TEİ ile birlikte foF2 ve hmF2 verileri ile beslenerek, yalnız foF2 ve son olarak da yalnız hmF2 ile beslenerek ionogramlar çizdirilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda IRI-Plas'ın foF2 ve hmF2 verisi ile beslendiğinde ölçüm ionogramında daha yakın grafiklerin elde edildiği görülmüştür. foF2 ve hmF2 değerleri ionogramın çıkarıldığı ölçümlere dayanarak elde edildiği göz önünde bulundurulduğunda yapılan çalışma ile ulaşılan çıkarım tutarlıdır. Bu çalışmam sonrasında foF2 ve hmF2 ile beslenen ionoküre modelinde hücre yapısının çözünürlüğü arttırılmıştır. Ön işlem aşamasında enlem ve boylamda  $0.2^\circ$ , yükseklikte 1 km adımlar ile hücre yapısı oluşturulmuştur. İyonkürenin 3B küresel hücre modelinin çözünürlüğünün arttırılması ile IONOLAB-RAY ile elde edilen ionogram grafiği ölçüm grafiğine yaklaşmıştır. Bu bölümde arttırılmış çözünürlükle ve foF2 ve hmF2 beslenen IRI-Plas ile modellenen ionoküre koşullarında elde edilen örnek çıktılar sunulmaktadır. Bu çıktıların elde edilmesinde kaynağın konumu Pruhonice, dalganın frekansı 0.2 MHz adım ile 1 MHz'den 10 MHz'e değişen dizi, yükseliş açısı  $89.4^\circ$ , yanca açısı  $90^\circ$  seçilmiştir. Frekansın çözünürlüğünün arttırılması, yancada  $360^\circ$ 'nin taranması ile ölçüm ionogramına daha da iyi yakınsanabileceği değerlendirilmektedir.

14 Şubat 2015 tarihinde saat 13:00 GS'de sıradan dalga için Şekil 7.1'de, sıradışı dalga için Şekil 7.2'de karşılaştırma grafikleri verilmektedir.

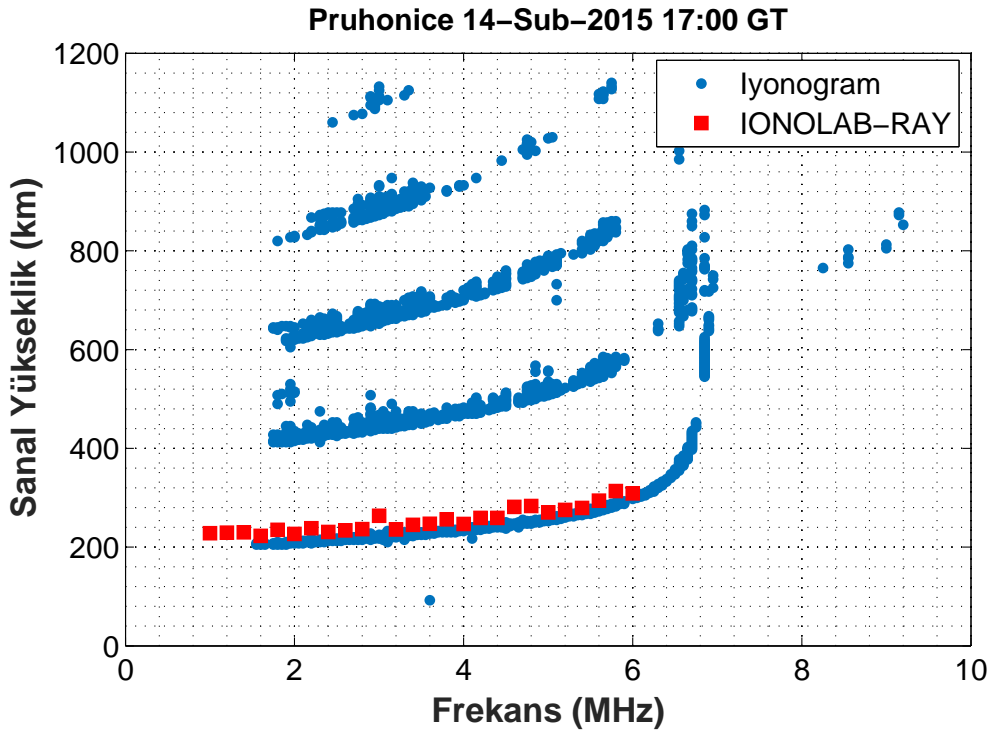
14 Şubat 2015 tarihinde saat 17:00 GS'de sıradan dalga için Şekil 7.3'de, sıradışı dalga için Şekil 7.4'de karşılaştırma grafikleri verilmektedir.



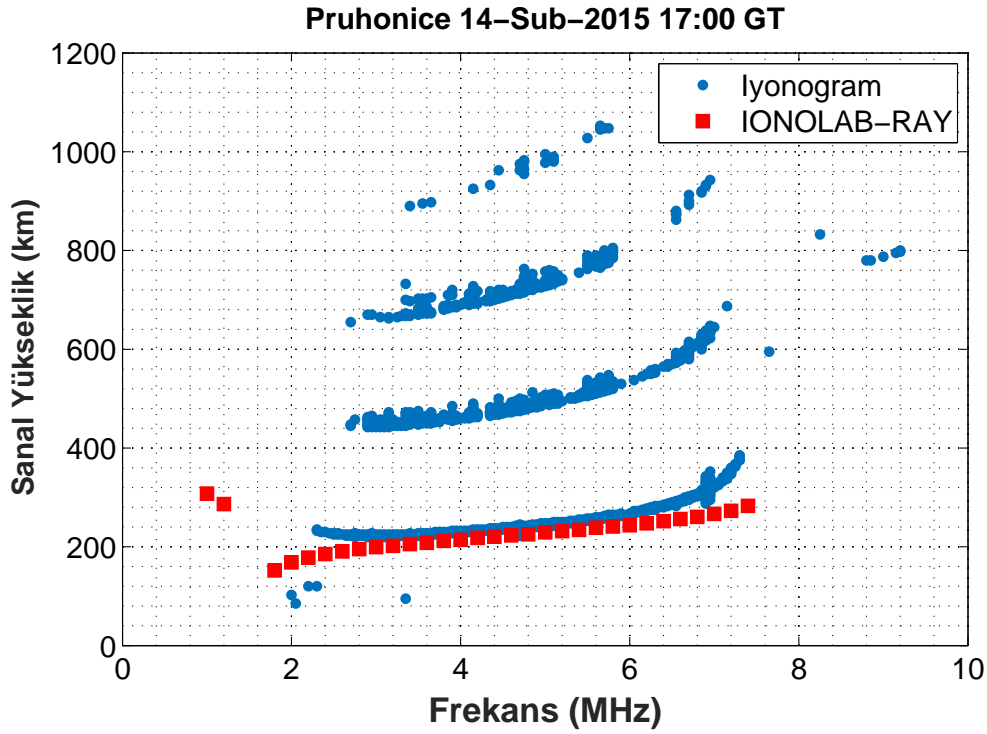
Şekil 7.1. Ölçüme ve IONOLAB-RAY modeline dayalı iyonogramların karşılaştırılması, Pruhonice, 14 Şubat 2015, 13:00 GS, sıradan dalga.



Şekil 7.2. Ölçüme ve IONOLAB-RAY modeline dayalı iyonogramların karşılaştırılması, Pruhonice, 14 Şubat 2015, 13:00 GS, sıradışı dalga.



Şekil 7.3. Ölçüme ve IONOLAB-RAY modeline dayalı iyonogramların karşılaştırılması, Pruhonice, 14 Şubat 2015, 17:00 GS, sıradan dalga.



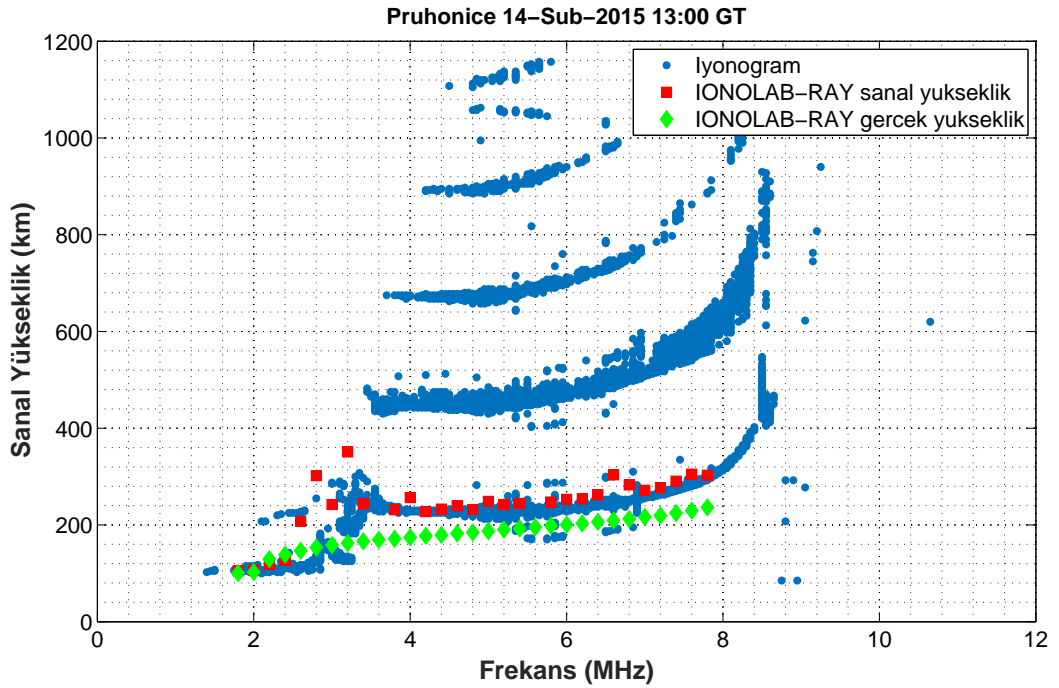
Şekil 7.4. Ölçüme ve IONOLAB-RAY modeline dayalı iyonogramların karşılaştırılması, Pruhonice, 14 Şubat 2015, 17:00 GS, sıradışı dalga.

Ölçüm iyonogramları ile IONOLAB-RAY ile türetilen iyonogramların birbiri ile uyumlu çıktığı görülmektedir. Özellikle sıradan dalga için elde edilen karşılaştırma grafiklerinin sıradışı dalga için elde edilen iyonogramlara göre daha uyumlu çıkmaktadır. Bunun sebebinin iyonosondaların sıradan ve sıradışı dalgaları ayırt etmekteki yaklaşımlarının olabileceği değerlendirilmektedir. IONOLAB-RAY ile elde edilen iyonogramlarda ölçüm iyonogramlarına göre daha düşük frekanslarda da veri bulunabilmektedir. İyonosondaların bu kadar düşük frekanslarda ionkürenin emilime en çok sebebiyet veren alçak katmanlarında soğurulan bu dalgaları alamaması ve bu sebeple iyonograma işaretleyememesi bu farklılığın sebebi olabilmektedir.

Bu bölümde iyonosondaların çok daha karmaşık olarak uyguladıkları sinyal işleme yaklaşımları yerine iyonogramda gösterilen sanal yükseklik kavramından yola çıkarak modelleme yapılmış ve grafikler sunulmuştur. Bu karşılaştırmaların amacı bu tez kapsamında geliştirilen ve IONOLAB-RAY algoritmasında uygu-

lanan modellerin anlamlı sonuçlar verdiğinin gösterilmesidir. Bu bölümde sunulan yaklaşımın yanı sıra IONOLAB-RAY algoritması, dalga parametrelerinin farklı yöntemler ile işlenmesine ve ionogram veya benzeri ionkürenin durumunu gösteren grafiklerin çizilmesine imkan tanımaktadır.

İyonküre ile ilgili asıl ulaşılmak istenen bilgi dalganın ilerleyebildiği gerçek en büyük yükseklik bilgisidir. IONOLAB-RAY gerçek en büyük yüksekliği hesaplamaktadır. İyonogramlar ile karşılaştırma yapabilmek ve böylece algoritmanın geçerli sonuçlar ürettiğini gösterebilmek amacı ile sanal yüksekliği hesaplamak üzere ek işlemler yapılmıştır. Şekil 7.5’de verilen grafikte ionogram, ek işlemler yapılarak IONOLAB-RAY ile hesaplanan sanal yükseklik ve gerçek yükseklik verileri üst üste çizdirilmiştir.



Şekil 7.5. Ölçüme ve IONOLAB-RAY modeline dayalı ionogramlar ile IONOLAB-RAY ile hesaplanan gerçek yükseklik karşılaştırılması, Pruhanice, 14 Şubat 2015, 13:00 GS, sıradan dalga.

Dalga ionkürede, serbest uzaydaki yayılma hızına göre daha yavaş yayıldığı için gerçek yükseklik sanal yüksekliğe göre küçük değer almaktadır.

## 7.2 İstatistiksel Modellere Dayalı Veri Beslemesi

İyonkürenin istatistiksel değişkenliğinin anlaşılmasında ve ifade edilmesinde en temel gözlem parametresi TEİ olmaktadır. TEİ parametresinin Türkiye coğrafik sınırlarını kapsayan bölge içinde konum-zamanda saatlik dağılımının istatistiksel davranışı çıkarılmıştır [84, 85]. Bu çıkarımın yapılmasında Türkiye Ulusal Sabit YKS Ağı'nın TEİ tahminleri kullanılmıştır. Bu verilere göre TEİ dağılımının Türkiye için yaz-kış döneminde lognormal, ilkbahar-sonbahar dönemleri için Weibull ile ifade edilebileceği gösterilmiştir. Yüksek, orta ve ekvatorial enlem bölgelerinde yer alan YKS istasyonlarından altı yıllık yarım güneş döngüsünde elde edilen verilere OYF (Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu) kestirim yöntemi uygulanmış, 2001-2011 yılları arasında TUSAGA ve TUSAGA-Aktif ağlarının verilerine uygulanmıştır. Bir YKS alıcısının yerel başucu doğrultusunda bir saat zaman aralığı için  $u$ . istasyonun,  $y$ . yılının,  $d$ . gününün,  $h$ . saatinde elde edilen  $N_s$  adet TEİ kestirimi  $\mathbf{x}_{u;y;d;h}$  vektörü ile ifade edilebilir:

$$\mathbf{x}_{u;y;d;h} = [x_{u;y;d;h}(1) \quad \dots \quad x_{u;y;d;h}(n_s) \quad \dots \quad x_{u;y;d;h}(N_s)]^T \quad (7.1)$$

Yukarıdaki eşitlikte  $T$  matris devriğini göstermektedir ve  $1 \leq n_s \leq N_s$ .  $u$ . istasyonun,  $y$ . yılının,  $d$ . gününün TEİ verisi  $\mathbf{x}_{u;y;d;h}$  vektörünün her saat için alt alta dizilmesi ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\mathbf{x}_{u;y;d} = [\mathbf{x}_{u;y;d;1}; \quad \dots \quad ; \mathbf{x}_{u;y;d;n_h}; \quad \dots \quad ; \mathbf{x}_{u;y;d;N_h}]_{N \times 1} \quad (7.2)$$

Yukarıdaki eşitlikte  $1 \leq n_h \leq N_h$  ve bir gün 24 saat için  $N_h = 24$  olmaktadır. Bir gün içinde toplam veri sayısı  $N = N_h N_s$  olarak tanımlanmıştır. Yönseme olasılık yoğunluk fonksiyonu kestiriminde kullanılacak saatlik TEİ değerleri,  $N_d$  adet gün için

$$\mathbf{x}_{u;y;h} = [\mathbf{x}_{u;y;1;h}; \quad \dots \quad ; \mathbf{x}_{u;y;n_d;h}; \quad \dots \quad ; \mathbf{x}_{u;y;N_d;h}]_{N_m \times 1} \quad (7.3)$$

ve  $1 \leq n_d \leq N_d$  olarak verilebilir. Eş. 7.3'de gösterilen  $\mathbf{x}_{u;y;h}$ ,  $u$ . istasyonun  $y$ .



yılına ait bütün günlerin  $h$ . saatlerinin ardarda eklenmesi ile oluşmuş vektördür.  $x_{u;y;d}$  vektörünün boyu  $N_m = N_d N_s$  olarak tanımlanmıştır. OYF kestirimlerinde bu vektörün her saat için düzgelenmiş deneysel dağılımları temel alınmıştır. Saatlik TEİ değerlerini istatistiksel olarak karakterize etmek amacıyla deneysel dağılımlara en uygun OYF ve bu OYF'nin parametreleri kestirilmiştir. Saatlik TEİ değerlerinin parametrik OYF kestirimleri için kullanılan bu yöntemde değişkenliği tanımlamak için kullanılan Lognormal (LN) ve Weibull (WB) dağılımları olasılık yoğunluk fonksiyonları aşağıda verilmiştir:

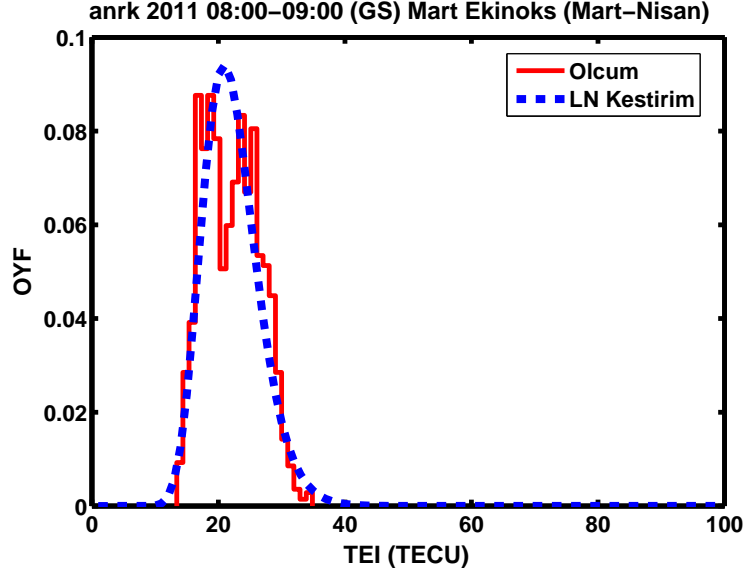
Lognormal Dağılım:

$$p_{LN}(x; \underline{\theta}_{LN}) = \frac{1}{x(\pi\alpha_{LN})^{1/2}} \exp \left\{ -\frac{(\ln x - m_{LN})^2}{\alpha_{LN}} \right\}, \quad (7.4)$$

Weibull Dağılım:

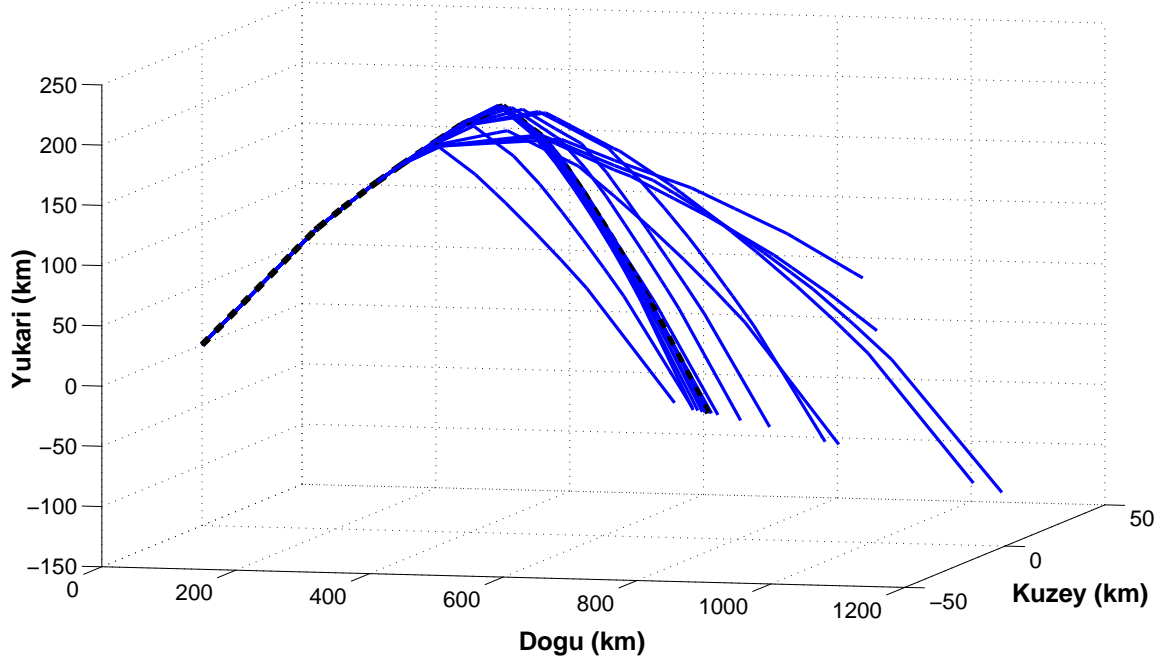
$$p_{WB}(x; \underline{\theta}_{WB}) = n_{WB} \frac{x^{n_{WB}-1}}{\alpha_{WB}} \exp \left\{ -\frac{x^{n_{WB}}}{\alpha_{WB}} \right\}, \quad (7.5)$$

Yukarıdaki eşitliklerde  $0 \leq x < \infty$  olarak tanımlanmıştır.  $\underline{\theta}_{LN} = [m_{LN} \ \alpha_{LN}]$  Lognormal dağılımın parametre vektörünü;  $\underline{\theta}_{WB} = [n_{WB} \ \alpha_{WB}]$  Weibull dağılımın parametre vektörünü göstermektedir. Örnek olarak Ankara 08:00 - 09:00 GS Mart Ekinoks için elde edilen Lognormal OYF ve ölçüm TEİ dağılımı Şekil 7.6'de verilmektedir.

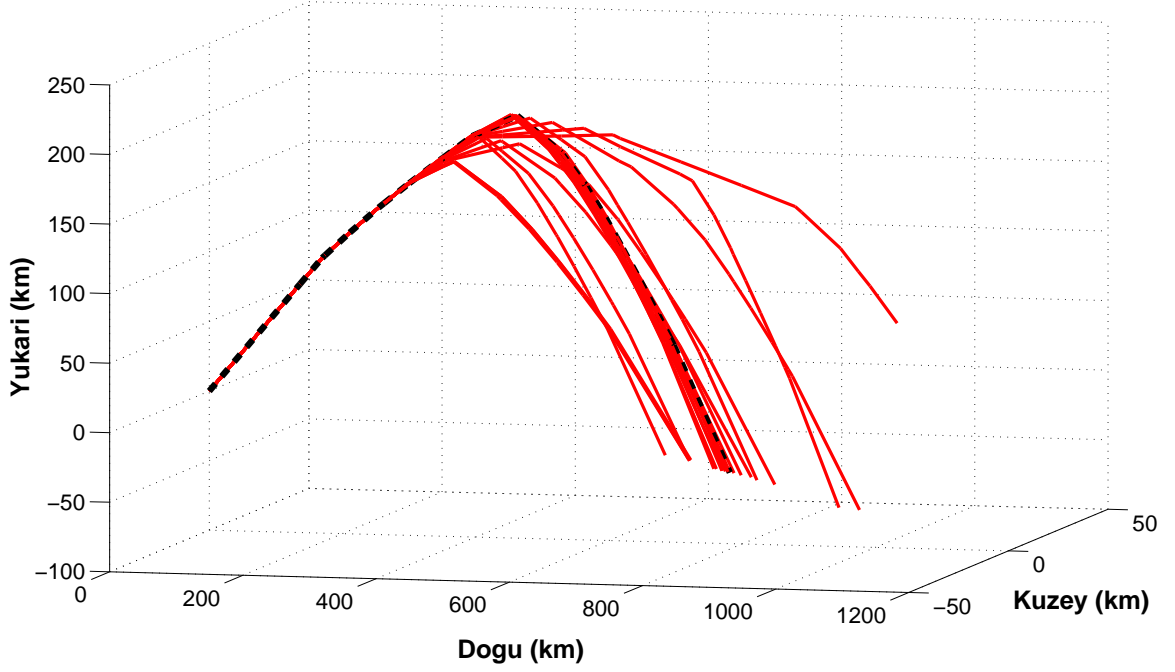


Şekil 7.6. Ankara 08:00 - 09:00 GS Mart Ekinoks için elde edilen Lognormal OYF ve ölçüm TEİ dağılımı

IONOLAB-RAY TEİ verisi ile beslenerek iyonküre modeli oluşturabilme yeteneği sayesinde belirtilen dağılımlardan 2000 deneyin koşuturulması ile sakin bir gün olan 25 Mart 2011 tarihi ve saat 12:00 GS için istatistiksel TEİ verileri elde edilmiştir. Bu veriler ile IRI-Plas beslenerek IONOLAB-RAY koşuturulmuştur. Örnek senaryo olarak kaynak konumu Ankara, frekans 9 MHz, yükseliş açısı  $60^\circ$ , yanca açısı  $90^\circ$  seçilmiştir. Grafiklerin anlaşılabilir görünmesi için 20 tane deney ve 2000 deneyin ortalama TEİ verisi ile besleme yapıldığında elde edilen sıradan ve sıradışı dalgalar için elde edilen dalga yayılım yolu grafikleri sırasıyla Şekil 7.7 ve Şekil 7.7'de verilmektedir. Grafiklerde istatistiksel TEİ verileri ile 2000 deneyinin ortalamasının IONOLAB-RAY'e beslenmesi sonucu elde edilen dalga yayılım yolu kesikli siyah çizgi ile gösterilmektedir.



Şekil 7.7. İstatistiksel TEİ verisi ile beslenen IONOLAB-RAY ile elde edilen sıradan dalga yayılım yolu, 20 deney, Ankara, 5 Mart 2011, 12:00 GS, 9 MHz, yükseliş açısı  $60^\circ$ , yanca açısı  $90^\circ$ .



Şekil 7.8. İstatistiksel TEİ verisi ile beslenen IONOLAB-RAY ile elde edilen sıradışı dalga yayılım yolu, 20 deney, Ankara, 5 Mart 2011, 12:00 GS, 9 MHz, yükseliş açısı  $60^\circ$ , yanca açısı  $90^\circ$ .

İstatistiksel TEİ verilerinin kullanılması ile elde edilen dalga yayılım yolu çıktıları için dalga parametrelerinin IONOLAB-RAY'in modülleri kullanılarak hesaplanabilmesi imkanı bulunmaktadır. Bu uygulama ile ilgili parametrelerin istatistiksel dağılım modellerinin geliştirilmesi çalışmalarına girdi sağlanabilmektedir.

Bu tezin sıradaki bölümü sonuçların anlatıldığı bölümdür.

## 8. SONUÇ

Bu tez çalışması ile KD bandında dalga yayılım modeli ve bu modelin uygulanması amacı ile IONOLAB-RAY algoritması geliştirilmiştir. KD bandında dalga yayılım ortamı iyonküredir. İyonküre havakürenin iyonlaşmış gazlardan oluşan, düzgün dağılmayan, yönbağımlı, zaman göre değişim gösteren bir katmandır. Böyle bir ortamda dalga yayılımının hesaplanması önemli ve zorlu bir problemdir. İyonkürede dalga yayılımının KD bandında uzak mesafe haberleşmesi, yön bulma, ufuk ötesi radarlar, Yerküresel Konumlama Uydu Sistemleri konumlandırma hatalarının düzeltilmesi ve uydu haberleşmesi gibi çeşitli alanlarda uygulamaları bulunmaktadır.

Bu tez kapsamında dalga yayılımının modellenmesinde Snell yasasına dayanan ışın izleme tekniği uygulanmıştır. Snell yasası ile ışın izleme literatürdeki alternatif ışın izleme uygulamalarına göre işlem yükü ve koşum süresi açısından avantaj sağlamaktadır. Bu avantaj zamana göre değişim gösteren iyonküre ortamında dalga yayılımının hesaplanması açısından önemlidir. Ayrıca alternatif ışın izleme yöntemlerinin uygulanmasında iyonkürenin kritik bir takım özellikleri ihmal edilmektedir. Bu tez çalışmasında Snell yasası ile ışın izlemede kırılma indisi Appleton-Hartree formülü ile hesaplanmaktadır. İyonkürenin kritik özelliklerini içinde barındıran bu formül tüm bileşenleri ile hesaplanmaktadır. Böylece Snell yasası ile ışın izlemede iyonkürenin özellikleri modelde kapsamaktadır.

İyonküre ortamı 3B küresel hücre yapısı ile modellenmiştir. Bu modellerin uygulanması için IONOLAB-RAY algoritması tasarlanmıştır. İyonkürenin 3B küresel hücre modelinin her bir hücresi için ve tarih ve zamana bağımlı olarak iyonküre parametreleri hesaplanmaktadır. Bu parametrelerin hesaplanmasında IRI-Plas yazılım aracından yararlanılmaktadır. IRI-Plas yazılım aracının avantajı TEİ ölçüm verisi ile modelin beslenebilmesi ve böylece iyonküre modelinin mevcut iyonküreyi daha iyi yansıtılabilmesidir. IRI-Plas yazılımının bir diğer avantajı iyonküre ve plazmaküreyi 20.200 km yüksekliğe kadar modelle-

yebilmesidir. Bu sayede geliştirilen dalga yayılım modeli yerküre konumlu sistemlerin yanı sıra uzay konumlu sistemler için de kullanılabilir.

İyonkürede dalga yayılım modelinin uygulanması amacı ile IONOLAB-RAY algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma ön işlem ve ana işlem fazlarından oluşmaktadır. Ön işlem fazında sınırları ve çözünürlüğü kullanıcı tarafından tanımlanan zaman ve ilgi alanı bölge içindeki 3B küresel hücre yapısının her bir hücresi için önceden hesaplanabilecek parametreler hesaplanmaktadır. Böylece işlem yükü ve koşum süresi uzun olan hesaplamalar ön işlem fazında yapılmaktadır. Ana işlem fazında ise kaynağın konumu, dalganın kaynaktan çıkma frekansı, yükseliş ve yanca açılarına karşılık, ön işlem fazında elde edilen veriler kullanılarak, sıradan ve sıradışı dalganın yayılım yolları hesaplanmaktadır. Senaryo girdilerinin çoklu girilmesi halinde çoklu koşum yapılabilmektedir. Bu anlamda IONOLAB-RAY algoritması esnek. Dalga yayılım yolunun modellenmesinin yanı sıra zayıflama katsayısı, faz ve grup hızı, zaman gecikmesi ve Faraday dönmesi parametrelerinin hesaplandığı modüller içermektedir. Dalga parametreleri modülleri ve iyonküre parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan modüller sayesinde IONOLAB-RAY algoritması modüler bir yapıya sahip olmaktadır. IONOLAB-RAY, iyonkürenin tüm kritik parametreleri ile temsil edilebilmesi için ihtiyaç duyulan tüm parametrelerinin hesaplanması için gereken modülleri bünyesinde bulundurmaktadır. Kullanıcının senaryo girdileri dışında herhangi bir veri dosyası ya da parametre seti girilmeden koşum yapabilmektedir. Tanımlanan senaryo koşullarına karşılık IONOLAB-RAY algoritması otomatik olarak TEİ verilerini indirebilmekte ve gereken aradeğerlemeyi uygulayabilmektedir. Bu sayede IONOLAB-RAY algoritması kullanıcı dostudur.

Bu tez çalışması kapsamında IONOLAB-RAY algoritmasının çeşitli parametrelerinin değişimine karşılık dalga yayılım yolu çıktıları elde edilmiş ve değerlendirilmiştir. Bu çıktılar iyonkürenin fiziksel yapısına yönelik beklentiler ile uyumlu sonuçlar vermiştir. IONOLAB-RAY algoritmasının dalga parametrelerini hesaplamak üzere geliştirilmiş olan modülleri kullanılarak bu parametrelerin dalga

yayımla yoluna g6re değişimleri g6zlenmiştir.

IONOLAB-RAY algoritması literat6rde bulunan ve benzer amaçlar ile yapılmış olan çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. IONOLAB-RAY'in bu çalışmalara g6re kritik bir çok konuda avantajlı olduğu değerlendirilmiştir. Bu çalışmalardan IONORT ve PHARLAP'ın yazılımları paylaşıldığından bu yazılımlar ile IONOLAB-RAY'in dalga yayılım yolu çıktıları 6rnek senaryolar 6zerinden karşılaştırılmıştır. Çıktıların birbirleri ile uyumlu olduğu g6zlenmiştir.

IONOLAB-RAY ile iyonogram grafikleri çıkarılmış, Pruhonice konumlu dijisonda tarafından 6retilen 6l6m iyonogramları ile karşılaştırılmıştır. IONOLAB-RAY modelleri ve 6l6mler ile elde edilen iyonogramların uyumlu olduğu g6r6lm6řt6r. B6ylece IONOLAB-RAY dalga yayılım yolu modelinin aynı sıra grup hızı ve zaman gecikmesi parametrelerinin hesaplanması açısından 6l6m verileri ile geerlenmiştir.

IONOLAB-RAY algoritması ile çeşitli uygulamalar yapmak m6mk6nd6r. Bu tez kapsamında IONOLAB-RAY'de iyonk6re modellemek için kullanılan yazılım aracı IRI-Plas, T6rkiye coğrafi sınırları için TEİ verisinin istatistiksel dağılımı 6zerinden sağlanan TEİ değerleri ile beslenmiştir. Bu y6ntemle çok sayıda veri çekilerek dalga yayılım yolları ve ortalamaları hesaplanmıştır.

IONOLAB-RAY algoritması kullanılarak gelecekte yapılabilecek çok sayıda uygulama bulunmaktadır. Bunlar KD bandında uzak mesafe haberleşmesi kanal modeline girdi sağlayacak parametrelerin hesaplanması, uydu haberleşmesinde 6zellikle ekvatorial anomalinin g6zlendiği b6lgelerde iyonk6renin etkilerinin değerlendirilmesi, y6n bulma ve ufuk 6tesi radarların başarımlarının artırılmasına y6nelik uygulamalar olabilecektir.

## KAYNAKLAR

- [1] Budden, K.G., *The Ionosphere and Magnetosphere in The Propagation of Radio Waves*, Cambridge University Press, **1988**.
- [2] Ratcliff, J.A., *An Introduction to the Ionosphere and Magnetosphere*, Cambridge University Press, **1972**.
- [3] Kelso, J.M., *Radio Ray Propagation in the Ionosphere*, McGraw-Hill, **1964**.
- [4] Yeh, K.C., Liu, C.H., *Theory of Ionospheric Waves*, Academic Press, **1972**.
- [5] Davies, J.A., *Ionospheric Radio*, Peter Pregrinus, **1990**.
- [6] Rush, C.M., Stewart, F.G., Pokempner, M., Reasoner, R., Some ionospheric factors affecting the coverage of an HF/VHF direct broadcasting satellite service, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 34, 4, 475–482, **1986**.
- [7] Davies, K., Smith, E.K., Ionospheric effects on satellite land mobile systems, *IEEE TAntennas and Propagation Magazine*, 44, 6, 24–31, **2002**.
- [8] Reinisch, B.W., Haines, D.M., Bibl, K., Galkin, I., Huang, X., Kitrosser, D.F., Sales, G.S., J.L., Scali, Ionospheric sounding in support of over-the-horizon radar, *Radio Science*, 32, 4, 1681–1694, **1997**.
- [9] Coleman, C.J., A ray tracing formulation and its application to some problems in over-the-horizon radar, *Radio Science*, 33, 4, 1187–1197, Jul.-Aug., **1998**.
- [10] Gao, H., Li, G., Li, Y., Yang, Z., Wu, X., Ionospheric effect of HF surface wave over-the-horizon radar, *Radio Science*, 41, 6, 1–10, Dec, **2006**.
- [11] Li, L., High-frequency over-the-horizon radar and ionospheric backscatter studies in China, *33*, 5, 1445–1458, **1998**.
- [12] Saverino, A.L., Capria, A., Berizzi, F, Martorella, M, Mese, E.D., Frequency management in HF-OTH skywave radar: ionospheric propagation channel representation, *Progress In Electromagnetics Research B*, 50, 97–111, .
- [13] Bramley, E.N., Direction-finding studies of large-scale ionospheric irregularities, *The Royal Society A*, 220, 1140, 39–61, Jun, **1953**.
- [14] Hayakawa, M., Ohta, K., Shimakura, S., Spaced direction finding of nighttime whistlers at low and equatorial latitudes and their propagation mechanism, *Radio Science*, 95, A9, 15091–15102, **1990**.



- [15] Hoque, M.M, Jakowski, N., Higher order ionospheric effects in precise GNSS positioning, *Journal of Geodesy*, 81, 4, 259–268, Nov, **2006**.
- [16] Hoque, M.M., Jakowski, N., Estimate of higher order ionospheric errors in GNSS positioning, *Radio Science*, 43, 5, 1–15, **2008**.
- [17] Dubey, S., Wahi, R., Gwal, A.K., Ionospheric effects on GPS positioning, *Advances in Space Research*, 38, 11, 2478–2484, Nov, **2006**.
- [18] Appleton, E.V., Ratcliffe, J.A., Some simultaneous observations on down coming wireless waves, *Proc. R. Soc. Lond. A*, 128, 807, 133–158, Jul, **1930**.
- [19] Appleton, E.V., Chapman, F.W., The collisional friction experienced by vibrating electrons in ionized air, *Proc. Phys. Soc.*, 44, 3, 246–254, May, **1932**.
- [20] Booker, H.G., The application of magnetoionic theory to the ionosphere, *Proc. R. Soc. Lond. A*, 150, 870, 267–286, Mar, **1935**.
- [21] Farmer, F.T., Ratcliffe, J. A., Wireless waves reflected from the ionosphere at oblique incidence, *Proc. Phys. Soc.*, 48, 6, 839–849, Nov, **1936**.
- [22] Chapman, S., The atmospheric height distribution of band absorbed solar radiation, *Proc. Phys. Soc.*, 51, 1, 93–109, Jan, **1939**.
- [23] Lassen, H.I., Ionisation der atmosphere und ihr einfluß auf die ausbreitung der kurzen elektrischen wellen der drahtlosen telegraphie, *Zeitschrift für Hochfrequenztechnik*, 28, 109–113, **1926**.
- [24] Hartree, D.R., The propagation of electromagnetic waves in a refracting medium in a magnetic field, *Proc. Comb. Phil. Soc.*, 27, 1, 143–162, Jan, **1931**.
- [25] Appleton, E.V., Wireless studies of the ionosphere, *J. Instn. Elect. Engrs.*, 71, 21, 642–650, Sep, **1932**.
- [26] Taylor, M., The Appleton-Hartree formula and dispersion curves for the propagation of electromagnetic waves through an ionized medium in the presence of an external magnetic field Part 1: Curves for zero absorption, *Proc. Phys. Soc.*, 45, 2, 245–265, Mar, **1933**.
- [27] Taylor, M., The Appleton-Hartree formula and dispersion curves for the propagation of electromagnetic waves through an ionized medium in the presence of an external magnetic field Part 2: Curves with collisional friction, *Proc. Phys. Soc.*, 46, 3, 408–435, May, **1934**.
- [28] Sen, H.K., Wyller, A.A., On the generalization of the Appleton-Hartree magnetoionic formulas, *J. Geophys. Res.*, 65, 12, 3931–3950, Dec, **1960**.

- [29] Shkarofski, I.P., Generalized Appleton-Hartree equation for any degree of ionization and application to the ionosphere, *Proc. IRE*, 49, 12, 1857–1871, Dec, **1961**.
- [30] Bilitza, D., Rawer, K., Bossy, L., Kutiev, I., International Reference Ionosphere 1990, *NASA Technical Report*, Science Applications Research, ABD, 1–150, **1990**.
- [31] Bilitza, D., International Reference Ionosphere 2000, *Radio Science*, 36, 2, 261–273, Mar.-Apr, **2001**.
- [32] Bilitza, D., Reinisch, B.W., International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters, *Advances in Space Research*, 42, 4, 599–609, Aug, **2008**.
- [33] Bilitza, D., McKinnell, L.A., B., Reinisch, Fuller-Rowell, T., The International Reference Ionosphere (IRI) today and in the future, *J. Geodesy*, 85, 12, 909–920, Nov, **2011**.
- [34] Bilitza, D., Altadill, D., Zhang, Y., Mertens, C., Truhlik, V., Richards, P., McKinnel, L., Reinisch, B., The International Reference Ionosphere 2012 a model of international collaboration, *J. Space Weather Space Clim.*, 4, A07, 1–12, Feb, **2014**.
- [35] Gulyaeva, T.L., Huang, X., Reinisch, B.W., Plasmaspheric extension of topside electron density profiles, *Adv. Space Res.*, 29, 6, 825–831, Mar, **2002**.
- [36] Gulyaeva, T.L., Arikan, F., Hernandez-Pajares, M., Stanislawski, I., GIM-TEC adaptive ionospheric weather assessment and forecast system, *Jour. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 102, 329–340, Sep, **2013**.
- [37] Haselgrove, J., Ray theory and a new method of ray tracing, *Proc. Phys. Soc. London*, 23, 355–364, **1955**.
- [38] Haselgrove, C.B, Haselgrove, J., Twisted ray paths in the ionosphere, *Proc. Phys. Soc. London*, 75, 3, 357–363, Mar, **1960**.
- [39] Jones, R.M., A three-dimensional ray tracing computer program (digest of ESSA technical report, ITSA no.17), *Radio Science*, 3, 1, 93–94, Jan, **1968**.
- [40] Varrier, Nitya Ravindran, *Ray Tracing Analysis for the mid-latitude SuperDARN HF radar at Blackstone incorporating the IRI-2007 model*, Yüksek Lisans Tezi, Virginia Polytechnic Institute, Virginia, **2010**.
- [41] Huang, X., Reinisch, B.W., Real time HF ray tracing through a tilted ionosphere, *Radio Science*, 41, 5, 1–8, Oct, **2006**.

- [42] Li, W., Su, D., Yan, Z., Three dimensional ray tracing in International Reference Ionosphere, International symposium on Antennas Propagation and EM Theory (ISAPE), **2010**.
- [43] Smith, M.S., Phase memory in W.K.B. and phase integral solutions of ionospheric propagation problems, *Proc. R. Soc. Lond. A*, 346, 1644, 59–79, Oct, **1975**.
- [44] Muldrew, D.B., An ionospheric ray-tracing technique and its application to a problem in a long-distance radio propagation, *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, 7, 4, 393–396, Oct, **1959**.
- [45] Woyk, E., Analytical formulas for radio paths in spherically stratified ionospheres, *Radio Science*, 69D, 3, 453–457, **1965**.
- [46] Norman, R.J., Cannon, P.S., An evaluation of a new two dimensional analytic ionosphere ray tracing technique: Segmented method for analytic ray tracing (SMART), *Radio Science*, 34, 2, 498–499, Mar-Apr, **1999**.
- [47] Norman, R.J., Two dimensional analytic HF ray tracing in the ionosphere, Radar Conference, Proceedings of the International, **2003**.
- [48] Norman, R.J., Marshall, J.L., Carter, B.A., Wang, C.S., A new pseudo Three-Dimensional Segment Method Analytical Ray Tracing (3-D SMART) technique, *IEEE Transactions of Antennas and Propagation*, 60, 12, 5818–5824, Dec, **2012**.
- [49] Yaxin, Y., Niu, J., Simpson J.J., A 3D global Earth-ionosphere FDTD model including an anisotropic magnetized plasma ionosphere, *IEEE Transactions of Antennas and Propagation*, 60, 7, 3246–3256, May, **2012**.
- [50] Isaakidis, S.A., Xenos, T. D., Wave propagation and reflection in the ionosphere. an alternative approach for ray path calculations, *Progress In Electromagnetics Research*, 45, 201–215, **2004**.
- [51] Azzarone, A., Bianchi, C., Pezzopane, M., Pietrella, M., Scotto, C., Settini, A., IONORT: A windows software tool to calculate the HF ray tracing in the ionosphere, *Computers and Geosciences*, 42, 57–63, May, **2012**.
- [52] Settini, A., Pietrella, M., Pezzopane, M., Bianchi, C., The IONORT-ISP-WC system: Inclusion of an electron collision frequency model for the D-layer, *Advances in Space Research*, 55, 8, 2114–2123, Apr, **2015**.
- [53] Cervera, M.A., Harris, T.J., Modeling ionospheric disturbance features in quasi-vertically incident ionograms using 3-D magnetoionic ray

- tracing and atmospheric gravity waves, *Journal Of Geophysical Research: Space Physics*, 119, 431–440, Jan, **2014**.
- [54] Norman, R.J., Bennett, J. A., Dyson, P.L., Marshall, J.L., Zhang, K., A ray tracing technique for determining ray tubes in anisotropic media, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61, 5, 2664–2675, May, **2013**.
- [55] Yan, Z., Wang, G., Tian, G., Li, W., Su, D., Rahman, T., The HF channel EM parameters estimation under a complex environment using the modified IRI and IGRF model, *IEEE Transactions of Antennas and Propagation*, 59, 5, 1778–1783, Mar, **2011**.
- [56] Spaulding, A.D., Stewart, F.G., The ionospheric communication analysis and prediction program (IONCAP); reliability and service probability calculations, *Radio Science*, 30, 3, 703–712, **1995**.
- [57] Thrane, E.V., Jodalen, V., Stewart, F., Saleem, D., Katan, J., A study of the relation between ionospheric absorption and predicted hf propagation parameters at high latitudes, *Radio Science*, 29, 5, 1293–1309, Sep-Oct, **1994**.
- [58] Lane, G., Review of the high frequency Ionospheric Communications Enhanced Profile Analysis and Circuit ICEPAC prediction program, Ionospheric Effects Symposium, Alexandria, **2005**.
- [59] Tanyer, S.G., Erol, C.B., Broadcast analysis and prediction in the HF band, *IEEE Transactions on Broadcasting*, 44, 2, 226–232, Aug, **1998**.
- [60] Qiao, J., Rui-Ping, M., Ji-Yac, X., Variations of the ionospheric conductivity with different solar and geomagnetic conditions, *Chinese Journal of Geophysics*, 49, 5, 1121–1129, Sep, **2006**.
- [61] Sayın, I., Akdoğan, K. E., Arıkan, F., Investigation of optimum temporal update periods for regional TEC monitoring, *4th International Conference on Recent Advances in Space Technologies*, 675–679, 11-13 June 2009, .
- [62] Sayın, I., Arıkan, F., Akdoğan, K. E., Optimum temporal update periods for regional ionosphere monitoring, *Radio Science*, 45, 6, 1–9, Dec, **2010**.
- [63] Kong, J.A., *Electromagnetic Wave Theory*, A Wiley-Interscience publication. Wiley, **1986**.
- [64] Ishimaru, A., *Electromagnetic Wave Propagation, Radiation, and Scattering*, Prentice Hall, **1991**.

- [65] Anderson, D.N., Forbes, J.M., Codrescu, M., A fully analytic, low- and middle-latitude ionospheric model, *J. Geophys. Res.*, 94, 1520–1524, **1989**.
- [66] Isaakidis, S.A., Xenos, T. D., An FDTD method with oblique incidence for ionospheric wave propagation problems - application to an hf one-hop radiolink study, *IEEE Trans. On Magnetics*, 38, 2, 677–680, **2002**.
- [67] Hamilton, W.R., *The Mathematical Papers of Sir W. R. Hamilton*, Cambridge University Press, **1931**.
- [68] Yeh, K.C., Liu, C.H., Acoustic-gravity waves in the upper atmosphere, *Reviews of Geophysics*, 12, 2, 193–216, May, **1974**.
- [69] Einaudi, F., Hines, C.O., Wkb approximation in application to acoustic gravity waves, *Canadian Journal of Physics*, 48, 12, 1458–1471, **1970**.
- [70] Clemmow, P.C., Heading, J., Coupled forms of the differential equations governing radio propagation in the ionosphere, *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 50, 2, 319–333, **1954**.
- [71] Smith, M.S., Coupling points of the Booker quartic equation for radio wave propagation in the ionosphere, *Proceedings of the Royal Society A*, 336, 1605, 229–250, **1974**.
- [72] Hoque, M.M., Jakowski, N., Higher order ionospheric propagation effects on GPS radio occultation signals, *Advances in Space Research*, 46, 2, 162–173, Jul, **2010**.
- [73] Harris, S., Refraction compensation in a spherically stratified ionosphere, *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, 9, 2, 207–210, **1961**.
- [74] Thayer, G.D., A rapid and accurate ray tracing algorithm for a horizontally stratified atmosphere, *Radio Science*, 2, 2, 249–252, Feb, **1967**.
- [75] Yeh, K., Liu, C., Ionospheric effects on radio communication and ranging pulses, *IEEE Antennas and Propagation*, 27, 6, 747–751, Nov, **2003**.
- [76] Price, G.H., Propagation of electromagnetic waves through a continuously varying stratified anisotropic medium, *Radio Science*, 68D, 4, 407–418, **1964**.
- [77] Wagen, J.F., Yeh, K.C., A numerical study of waves reflected from a turbulent ionosphere, *Radio Science*, 21, 4, 583–604, **1986**.
- [78] Erdem, E., Arıkan, F., Ray tracing on stratified plane ionosphere model, Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları (IEEE SİU2014) Kurultayı, **2014**.

- [79] Erdem, E., Arıkan, F., A model based ray tracing algorithm for anisotropic and inhomogeneous ionosphere with GIM-TEC assimilation, 7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST 2015 ), **2015**.
- [80] Thebault, E., Finlay, C.C., Beggan, C.D., International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation, *Earth, Planets and Space*, 67, 79, 1–19, May, **2015**.
- [81] Finlay, C.C, Maus, S., Beggan, C.D., International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation, *Geophys. J. Int.*, 183, 3, 1216–1230, **2010**.
- [82] Sayın, I., *Kriging ve Rassal Alan Öncülü ile Toplam Elektron İçeriği Haritalaması*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, **2008**.
- [83] Koroglu, O., Arıkan, F., Türel, N., Aysezen, M. Ş., Lenk, O., Aktuğ, B., Estimation of probability density function for TUSAGA TEC, Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları (IEEE SİU2010) Kurultayı, **2010**.
- [84] Koroglu, O., Arıkan, F., Deviren, M.N., Regional and seasonal parametric probability density function estimation for Total Electron Content, Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları (IEEE SİU2014) Kurultayı, **2014**.

## EK-1

Tezden üretilmiş tebliğ ve poster sunumları burada verilmiştir.



## ÖZGEÇMİŞ

### Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : ESRA ERDEM  
Doğum Yeri : Ankara  
Medeni Hali : Bekar  
E-posta : esraerd@gmail.com  
Adresi : İlker 1. Cad. 1024. Sok.,  
4/5, Dikmen Çankaya / ANKARA

### Eğitim

Lisans : Hacettepe Üniversitesi  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Böl., ANKARA  
(1999-2003)  
Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Böl., ANKARA  
(2004-2007)  
Doktora : Hacettepe Üniversitesi  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Böl., ANKARA  
(2010-2017)

### Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce : Çok İyi  
Almanca : Başlangıç

### İş Deneyimi

Ağustos 2012- ... : Kıdemli Uzman Mühendis,  
ASELSAN REHİS, ANKARA  
Kasım 2004- Temmuz 2012 : Uzman Araştırmacı,  
TUBİTAK BİLGEM İLTAREN, ANKARA  
Ağustos 2001 : Staj, ASELSAN, ANKARA

### Deneyim Alanları

Elektromanyetik, Sinyal İşleme, İyonküre, Kızılötesi Teknolojileri  
Elektronik Harp Sistemleri



## **Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi**

-

## **Tezden Üretilmiş Yayınlar**

Erdem, E., Arıkan, F., IONOLAB-RAY: A wave propagation algorithm for anisotropic and inhomogeneous ionosphere, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences dergisi tarafından basılmak üzere Kasım 2016'da kabul edilmiştir.

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

Erdem, E., Arıkan, F., Düzlem Katmanlı İyonküre Modelinde Işın İzleme , Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları (IEEE SIU2014) Kurultayı, 2014.

Erdem, E., Arıkan, F., İyonkürenin Küresel Izgara Modelinde Işın İzleme, URSI Türkiye 2014 Kurultayı, 2014.

Erdem, E., Arıkan, F., Wave Propagation Modeling for Anisotropic and Inhomogeneous Ionosphere using IRI-Plas-G, IRI Workshop, KMITL, Bangkok, Tayland , 2015.

Erdem, E., Arıkan, F., A Model Based Ray Tracing Algorithm for Anisotropic and Inhomogeneous Ionosphere with GIM-TEC Assimilation, RAST'2015 Recent Advances in Space Research, 2015, İstanbul, Türkiye.

Erdem, E., Arıkan, F., Space Weather Studies of Ionolab Group, URSI-AP-RASC 2016, Seul, Güney Kore.

Erdem, E., Arıkan, F., IONOLAB-RAY - TEC ile Beslenebilen Düzgün Dağılmamış Yön Bağımlı İyonküre Modelinde Işın İzleme Algoritması, URSI Türkiye 2016 Kurultayı, 2016.

## **Diğer Yayınlar**

Erdem, E., Arıkan, F., Erol, C.B., DAMA - Infrared Sea Modeling and Analysis Software, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing , 47, 2009.



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 21/02/2017

Tez Başlığı / Konusu: İYONKÜREDE ELEKTROMANYETİK DALGA YAYILIM MODELİ VE BENZETİMİ

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç ve e)Kaynakça kısımlarından oluşan toplam 142 sayfalık kısmına ilişkin, 21/02/2017 tarihinde tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 3 'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç
- 3- 5 kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

21/02/2017  
*Erdem*  
Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Esra Erdem  
Öğrenci No: N10144087  
Anabilim Dalı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği  
Programı: Elektromanyetik Alanlar  
Statüsü:  Y.Lisans  Doktora  Bütünleşik Dr.

**DANIŞMAN ONAYI**

UYGUNDUR.

*F. Arıkan*

Prof. Dr. Feza ARIKAN



HACETTEPE UNIVERSITY  
GRADUATE SCHOOL OF SCIENCE AND ENGINEERING  
THESIS/DISSERTATION ORIGINALITY REPORT

HACETTEPE UNIVERSITY  
GRADUATE SCHOOL OF SCIENCE AND ENGINEERING  
TO THE DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING

Date: 21/02/2017

Thesis Title / Topic: ELECTROMAGNETIC WAVE PROPAGATION MODEL AND SIMULATION IN IONOSPHERE

According to the originality report obtained by myself/my thesis advisor by using the *Turnitin* plagiarism detection software and by applying the filtering options stated below on 21/02/2017 for the total of 142 pages including the a) Title Page, b) Introduction, c) Main Chapters, d) Conclusion and e) Bibliography sections of my thesis entitled as above, the similarity index of my thesis is 3 %.

Filtering options applied:

1. Bibliography/Works Cited excluded
2. Quotes excluded
3. Match size up to 5 words excluded

I declare that I have carefully read Hacettepe University Graduate School of Science and Engineering Guidelines for Obtaining and Using Thesis Originality Reports; that according to the maximum similarity index values specified in the Guidelines, my thesis does not include any form of plagiarism; that in any future detection of possible infringement of the regulations I accept all legal responsibility; and that all the information I have provided is correct to the best of my knowledge.

I respectfully submit this for approval.

21/02/2017

Date and Signature

Name Surname: Esra Erdem

Student No: N10144087

Department: Electrical and Electronics Engineering

Program: Electromagnetic Fields

Status:  Masters  Ph.D.  Integrated Ph.D.

**ADVISOR APPROVAL**

APPROVED.

Prof. Dr. Feza ARIKAN