YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GPS SİNYALLERİ İLE KONUM BELİRLEMEDE İYONOSFERİK ETKİLERİN İNCELENMESİ

Fizikçi Olcay GÜMRÜKCÜ

FBE Fizik Anabilim Dalında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı; Yrd. Doç. Dr. Zehra CAN (Yıldız Teknik Üniversitesi)

İSTANBUL, 2009

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ iv

KISALTMA LİSTESİ v

ŞEKİL LİSTESİ vi

ÖNSÖZ vii

ÖZET viii

ABSTRACT ix

1. GİRİŞ 1

2. KÜRESEL KONUM BELİRLEME SİSTEMİ 4

2.1 Küresel Konum Belirleme Sisteminin Bölümleri 5
2.2 Küresel Konum Belirleme Sistemi İle İyonosferik Model Çalışmaları 5

3. İYONOSFER 8

3.1 Gazların İyonizasyonu 8
3.2 İyonosfer Tabakaları 10

4. CHAPMAN TABAKASI 13

5. İYONOSFERİN ELEKTROMANYETİK DALGA YAYILIMINA ETKİSİ 22

5.1 İyonize Ortamda Elektromanyetik Dalga Yayılımı 22
5.2 Manyetoiyonik teori 25

6. TOPLAM ELEKTRON İÇERİĞİ 30

6.1 İyonosferik kırılma 32

7. FARADAY DÖNMESİ 39

7.1 Faraday Dönmesinden Yararlanarak İyonosferdeki Elektron İçeriğini Bulma 46

8. İYONOSFER MODELLERİ 50

8.1 IRI ile iyonosfer elektron yoğunluğu ve TEC değişimi hesabı 51

9. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 59

KAYNAKLAR 60

ÖZGEÇMİŞ 64

SİMGE LİSTESİ

f_0F_2	F_2 tabakasının plazma frekansı
N_e	Elektron yoğunluğu
μ	İyonosferik kırılma indisi
τ	Optik derinlik
σ	Gaz atomlarının birim alandaki radyasyon soğurması
H	Skala yüksekliği
n_p	Faz kırılma indisi
n_g	Gurup kırılma indisi
η	İyonizasyon sabiti
α	Recombination sabiti
β	Attachment sabiti
χ	Alıcıya gelen dalganın zenitle yaptığı açı
K	Ortamın dielektrik sabiti
κ	Ortamın soğurma katsayısı
F	Haritalandırma sabiti
Ω	Dönme açısı
w_N	Açısal gyro frekans
w_H	Ortamın plazma frekansı
w	Radyo dalgasının açısal frekansı

KISALTMA LİSTESİ

TEC	Total Electron Content
VTEC	Vercital Total Electron Content
STEC	Slant Total Electron Content
IRI	International Reference Ionosphere
URSI	Committe on Space Research
COSPAR	International Union of Radio Science
CCIR	Consultative Committe International Radio
GPS	Global Position System

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa
Şekil 3.1	Yüklü parçacıkların iyonosfer içinde yüksekliğe bağlı olarak dağılımı…	12
Şekil 4.1	Silindir şeklinde bir cisim içindeki gaz basıncının değişimi …….	15
Şekil 6.1	$1m^2$ kesitli alana sahip bir silindir boyunca TEC miktarı.....	30
Şekil 7.1	Dogrusal kutuplanmış bir dalganın, aynı hız ile aynı yönde ilerleyen fakat birbirine zıt yönde dönen eşit genlikli iki dairesel polarize dalga ile temsili……	40
Şekil 7.2	B_0 manyetik alanı yönünde ilerleyen doğrusal kutuplanmış radyo dalgasının, ordiner ve ekstra ordiner dalga vektörlerine ayrılarak ilerlemesi…….....	41
Şekil 7.3	Çok yüksek frekanslı bir radyo ışınının geometrisi…….	47
Şekil 8.1	Tahmini veriler kullanılarak 24.09.2006 tarihi için elde edilen N_e grafiği…….	53
Şekil 8.2	Tahmini veriler kullanılarak 24.09.2006 tarihinde için edilen TEC grafiği……	54
Şekil 8.3	Gözlem verileri kullanılarak 24.09.2006 tarihi için elde edilen N_e grafiği……...	55
Şekil 8.4	Gözlem verileri kullanılarak 24.09.2006 tarihi için elde edilen TEC grafiği……	55
Şekil 8.5	14.09.2006 tarihinde elde edilen yüksekliğe bağlı N_e değerinin değişimi……	57
Şekil 8.6	14.09.2002 tarihinde elde edilen yüksekliğe bağlı N_e değerinin Değişimi……	58

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanması esnasında, bana her zaman destek olan, cesaretlendiren, yardımlarını esirgemeyen ve en önemlisi bana bilimsel çalışmayı öğreten çok değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Zehra CAN' a bütün saygım ve sevgimle teşekkür ederim.

Ayrıca bana maddi ve manevi destek olan annem ve babama, hoşgörü ve ilgilerinden dolayı kardeşlerime ve tüm aileme, yardımlarından dolayı Onur Utku Parça'ya minnet borçluyum. Bu tezi yazarken bana destek olan herkese teşekkür ederim.

ÖZET

Yüksek doğruluklu konum belirleme sistemi olan GPS (küresel konum belirleme sistemi) başlangıçta askeri amaçlı kullanım için geliştirilmesine rağmen, teknolojideki gelişmeler sayesinde günlük hayatta da pek çok uygulama olanağı bulmuştur. GPS sinyalleri aracılığı ile iyonosfer elektron yoğunluğu profili elde edilebilmekte, iyonosfer toplam elektron içeriği (TEC) incelenebilmekte, iyonosferik düzensizlikler araştırılabilmektedir. İyonosfer ve troposfer tahminleri yapılabilmektedir. Güneşin aktivitesine bağlı olarak iyonosferin elektron yoğunluğundaki sürekli değişim, iyonosferden geçen GPS sinyallerinin gecikmesine neden olmaktadır. Bu tez çalışmasında GPS tekniğinden faydalanarak GPS sinyalleri üzerindeki iyonosfer etkileri araştırılarak, farklı iyonosfer modelleri incelenmiş ve IRI iyonosfer modeli kullanılarak elektron yoğunluğunun yükseklikle değişimi ve TEC değeri elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: İyonosferin elektron yoğunluğu değişimi, iyonosferin toplam elektron içeriği (TEC), iyonosferik modeller, GPS

ABSTRACT

Although GPS (Global Positioning System) that is a location determining system in high accuracy, has been developed for military purpose usage at the beginning, thanks to the developments in technology has found implementation possibility in daily life as well. Density profile of the ionosphere electron can be obtained through GPS signals and, Total Electron Content (TEC) of ionosphere can be examined and, ionospheric irregularities can be researched. In addition, Ionosphere and Troposphere estimations also can be performed. Depending on the activity of the Sun, continuous changing at the electron density of ionosphere can cause delay of the GPS signals that passing through the ionosphere. In this thesis study, by deriving benefit from GPS technique, the effects of ionosphere upon the GPS signals were researched; different ionosphere models were examined and, the changing of the electron density with altitude and TEC value were obtained by using IRI ionosphere model.

Key Words: Changing of the ionosphere electron density, total electron content (TEC) of ionosphere, ionospheric models, GPS

1.GİRİŞ

Konum belirlemede kullanılan GPS teknikleri, başlangıçta askeri araçların koordinatlarının belirlenmesi amacıyla geliştirilmiştir. Gelişen teknoloji ile birlikte günlük hayatta da, sivil kullanım alanında kara, hava ve deniz araçlarının navigasyonunda, araç takip sistemlerinde, coğrafi bilgi sistemlerinin geliştirilmesinde, iyonosfer ve troposfer araştırmalarında uygulama olanağına kavuşmuştur.

Yer yüzeyinden itibaren yaklaşık olarak 20200 km yörünge yüksekliğinde dağılmış olarak bulunan GPS uyduları (28 adet), 11 saat 58 dakikada tam bir devir yapmaktadır. Farklı iki L_1 ve L_2 taşıyıcı frekansına sahip olan bu uyduların sinyalleri, 1575,42 MHz (L_1) ve 1227,60 MHz (L_2) değerindedir. GPS uydularından yayınlanan sinyaller uzay boşluğunda ilerledikten sonra, dünya atmosferine girdiğinde, önce iyonosferden daha sonrada troposferden geçerek yer yüzeyinde bulunan GPS alıcılarına erişmektedirler. Bu sinyaller, frekanslarına bağlı olarak iyonosferde ilerleyeceklerdir. İçinden geçtikleri ve doğal bir plazma olan iyonosfer, sürekli değişim halinde olduğundan, GPS sinyallerinin gecikmesine neden olacaktır. İyonosferin geciktirme etkisi, iyonosferin elektron yoğunluğuna bağlı olarak bir değişim gösterecektir. Bu etki, metreküpteki elektron sayısının fonksiyonu olarak hesaplanır [Kahveci ve Yıldız, 2002; Seeber, 2003; Leick, 1990; Grewal vd., 2007; 1].

İyonosfer tabakasını oluşturan serbest elektronların yoğunluğu güneşten gelen radyasyona bağlı olarak değişmektedir. Günün saatlerine bağlı olarak, güneşteki patlamaların da etkisi ile sürekli olarak değişen iyonosfer, gece veya gündüz boyunca, mevsimlere bağlı olarak sürekli değişen bir elektron yoğunluğuna sahiptir. Güneşte meydana gelen geomanyetik fırtınalar ve fırtınalar sonrası güneşten saçılan güneş malzemelerinin atımına (coronal mass ejection) bağlı olarak da sinyal farklı gecikmelerle yer yüzeyine ulaşabilmektedir [Jakowski vd., 1997, 2].

Literatür araştırmalarında, GPS i kullanarak iyonosfer araştırması yapılan pek çok çalışma mevcuttur. Bunlar arasında Wilson ve Mannucci tarafından yapılan toplam elektron içeriği incelemesini, Hajj tarafından yapılan elektron yoğunluğu profilleri incelenmesini, Coco ve grubu tarafından sporadic E tabakası araştırılmasını sayabiliriz [Wilson ve Manucci, 1993; Hajj vd., 1994; Coco vd., 1995]. Ayrıca Coker ve grubu tarafından auroral faaliyetler ile ilgili

bir çalışma yapılmış, Ho ve grubu tarafından büyük-ölçekli iyonosferik düzensizlikler araştırılmış, Calais ve Minster tarafından yapay iyonosferik değişiklikler incelenmiş, Houminer ve Soicher tarafından ise f_0F_2 tahminleri hakkında çalışılmıştır [Coker vd., 1995; Ho vd., 1996; Calais ve Minster, 1996; Houminer ve Soicher., 1996]. Bunlardan başka, K. Davies ve G.K. Hartman tarafından da GPS verileri kullanılarak iyonosferik TEC tayini ile ilgili başka bir araştırma yapılmıştır [Davies ve Hartman., 1997]. Peter Kolb tarafından yerel alan ağlarından faydalanılarak iyonosferin modellenmesi ile ilgili yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Kolb, GPS ölçümlerini kullanan referans istasyon ağları boyunca, iyonosferi tanımlamak için kullanılan karakteristik parametreleri açığa çıkarmak için bir yöntem sunmuştur. Modelin temel kavramı ise, iyonosferin delik noktaları (piercing point) boyunca, iyonosferik gecikmeyi, bir ortogonal fonksiyon serisiyle açıklayan bir açılımdır [Kolb, 2005].

Uydu alıcı uzaklıklarının hesaplanmasında, önemli bir hata kaynağı olarak karşımıza çıkan, iyonosferin neden olduğu etkiyi doğru bir şekilde tayin edebilmek için, iyonosfer tabakasının çok iyi bir şekilde modellenmesi gerekmektedir. İyonosferi geçerek gelen GPS sinyalleri, iyonosferin bu değişken yapısından oldukça fazla etkilenmektedir. İyonosferin elektromanyetik dalgaların yayılmasındaki etkileri, elektromanyetik dalganın izlediği yol üzerindeki bir metrekare alanda bulunan serbest elektronların sayısı olarak tanımlanan TEC ile ifade edilmektedir. TEC, iyonosfer ve üst atmosferin yapısını incelemek için kullanılan önemli değişkenlerden birisidir. TEC değerleri ile iyonosferdeki kısa ve uzun vadeli değişimler, iyonosferik düzensizlikler ve TEC değerini bozan-etkenler birlikte incelenebilmektedir. İyonosfer zamanda ve uzayda değişik ölçeklerde değişim gösterir. GPS uydularından gelen sinyaller kullanılarak bölgesel ve küresel TEC değerleri tahmin edilebilmektedir. GPS sinyalleri, iyonosferdeki soğurmadan ve dünya manyetik alanından çok fazla etkilenmediklerinden dolayı, iyonosfer fiziği açısından faydalı bilgiler elde etmemizi sağlamaktadır [Erol ve Arıkan, 2004; Arıkan vd., 2004]. Bu konudaki araştırmalarımıza, YTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğünce desteklenen "Konum Belirlenmesinde Önemli Bir Rol Oynayan GPS Sinyallerinin İyonosferle Etkileşimi" başlıklı ve 27-01-01-06 no lu projemiz ile de devam etmekteyiz. Bu projede; GPS tekniğinden faydalanarak, GPS sinyallerinin uğrayacağı iyonosferik gecikmeyi, referans istasyonlar ağı boyunca hesaplayıp, konum belirlemede oluşacak hatayı minimuma indirgeyecek uygun bir iyonosfer modelinin geliştirilmesi üzerine çalışmaktayız*[Can, Z;2009].

"Bu araştırma Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nce desteklenmiştir. Proje No: .27-01-01-06....."

Yukarda literatür araştırmalarında da belirttiğimiz gibi, çağımızda GPS teknolojisinden faydalanarak yüksek doğruluklu konum belirleme büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla tezimizde GPS sinyalleri üzerinde iyonosferik etkileri araştırdık. Geniş bir literatür araştırmasını verdikten sonra GPS in tanımın yaparak kullanım alanlarından bahsettik. Üçüncü bölümde iyonosferi tanımlayarak, İyonosfer tabakalarını anlattık. Dördüncü bölümde; iyonosferin elektron yoğunluğunun yüksekliğe bağlı olarak modellenmesini açıklayan Chapman Tabakasını anlattık. Beşinci bölümde ise, İyonize ortamda elektromanyetik dalga yayılımını anlatıp, manyetoiyonik teoriyi ayrıntılarıyla açıkladık. Altıncı bölümde, iyonosfer ve üst atmosferin yapısını incelemekte kullanılan toplam elektron içeriği miktarı ve hesaplanması ile ilgili bilgiler verip, TEC hesabında önemli bir etken olan iyonosferik kırılmadan bahsettik. Yedinci bölümde, iyonosfer araştırmalarında faydalanılan ve TEC hesabında da kullanılan Faraday Dönmesi olayını ayrıntılarıyla açıkladık. Sekizinci bölümde, değişken iyonosferin yapısını anlamamıza yardımcı olabilecek farklı iyonosfer modellerinden bahsettik. Yaygın bir şekilde kullanılmakta olan IRI (International Reference Ionosphere) 2000 ve 2007 modellerinden faydalanarak, güneş lekesinin farklı durumları için TEC değişim değerlerini ve Ne elektron yoğunluğu değişimlerini hesapladık. Dokuzuncu bölümde ise, araştırma sonuçlarımızı özetleyerek yorum ve önerilerimizi getirdik.

2. KÜRESEL KONUM BELİRLEME SİSTEMİ

Küresel Konum Belirleme Sistemi (GPS), herhangi bir konumda ve zamanda konum belirlemeyi sağlayan bir haberleşme sistemidir. 1980'li yıllarda ABD Savunma Dairesi tarafından, askeri araçların ya da uçakların yerinin belirlenmesi amacıyla geliştirilmiştir. GPS sistemi, son yıllardaki teknolojik gelişmeler sayesinde günlük hayatımızda sivil kullanıma da açık hale gelmiştir. Araç takip sistemlerinde, aktif kontrol ağlarında, coğrafi bilgi sistemlerinin (CBS) veri tabanlarının geliştirilmesinde, turizm, tarım, ormancılık, spor alanlarında, hidrografik ölçmelerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. GPS teknolojisinin,

iyonosfer ve troposferin modellenebilmesinde önemli katkıları olmaktadır [Kahveci ve Yıldız, 2002; Kahveci, 1997].

Yüksek doğruluklu konum belirleme sistemi olan ve pek çok uygulama alanı bulunan GPS ölçme tekniklerinin de zayıf yönleri vardır. GPS ile konum belirlemede temel işlev uydu ile alıcı arasındaki uzaklığın belirlenmesidir. Bu uzaklığın belirlenmesi sırasında, uydu efemeris hataları, uydu saati hataları, iyonosferik gecikme etkisi, troposferik gecikme etkisi, multipath etkisi gibi hata kaynaklarıda mevcuttur. Yüksek doğruluk isteyen çalışmalarda bu hataların giderilebilmesi için dikkatli bir çalışma gerekmektedir.

GPS uydularından yayınlanan sinyaller, uzay boşluğunu geçtikten sonra, dünya atmosferinde önce iyonosferden daha sonrada troposferden geçerek yer yüzeyinde konumlanmış olan GPS alıcılarına ulaşmaktadır. Bu nedenle de iyonosferin neden olacağı iyonosferik gecikmenin çok iyi bir şekilde tayin edilmesi gerekir. Fakat iyonosferin yapısı, güneşin aktivitesine bağlı olarak, günün saatine, gece veya gündüz oluşuna, mevsime, yıla, enlem ve boylamın da etkisi ile sürekli olarak değişen bir yapıya sahiptir. Dolayısıyla GPS sinyalleri iyonosferin içerisinden geçerken, sürekli olarak değişen iyonosferin yapısından etkilenecektir. İyonosfer, radyo dalgalarını dağıtıcı bir özelliğe sahip olduğundan, uydu alıcı uzunluğunda azalma ya da artmalar oluşturacaktır.

Bu bozucu etkilerin giderilebilmesi içinde, GPS sinyalinin içinden geçtiği iyonosfer tabakasının iyi bir şekilde modellendirilebilmesi gerekmektedir. Bu iyonosferik etki, sinyalin

geçmiş olduğu yol üzerindeki alanda bulunan serbest elektronların miktarı ile doğrudan ilişkilidir.

2.1 Küresel Konum Belirleme Sisteminin Bölümleri

Küresel konum belirleme sistemi; uzay, kontrol ve kullanıcı bölümü olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. Uzay bölümü yerden yaklaşık 20200 km yükseklikte bulunan 28 adet uydudan oluşmaktadır. Bu uydular kendilerine ve diğer uydulara ait bilgileri yerdeki kullanıcılara elektromanyetik dalgalarla iletirler. GPS uydularında bu veri akışını iki farklı frekansla, L1 frekansı 1575,42 MHz ve L2 frekansı 1227,60 MHz sağlanır. Bu frekansların seçilme nedeni iyonosferik etkinin L bandında az olmasındandır. Ayrıca, L1 frekansının herhangi bir nedenden dolayı kesilmesi durumunda L2 frekansı yedek frekans görevi görür. Başka bir neden de, çift frekans özelliklerinden yararlanılarak iyonosferik düzeltmelerin yapılabilmesidir.

Kontrol bölümü ise dünyanın belirli yerlerinde konumlanmış altı adet istasyondan oluşmaktadır. Bu istasyonlar uydudan alınan verileri değerlendirmek (uydu yörüngelerinin belirlenmesi gibi) ve uyduların düzgün çalışmasını sağlamakla görevlidir.

GPS kullanıcı bölümü, elinde GPS alıcısı olan herkese denilir. GPS alıcısının temel görevi uydu sinyallerini kaydetmektir. GPS alıcısı tarafından kaydedilen sinyaller işleme tabi tutulur, anlık uygulamalarda koordinat dönüşümleri yapılır ve gerektiğinde navigasyon için gerekli bilgiler toplanır [Kahveci ve Yıldız, 2002].

2.2 Küresel Konum Belirleme Sistemi ile İyonosferik Model Çalışmaları

İyonosferi oluşturan serbest elektronlar ve pozitif yüklü iyonlar, sinyal yayılımını ve ortamın elektrik özelliklerini etkilerler. İyonosferin yapısı ve etkilerinin araştırılması GPS deki koordinat çözümlerinin doğruluğu bakımından önemlidir. Tam sayı belirsizliğini kısa süreli ölçümle çözmek oldukça güçtür. Baz uzunluğu arttıkça daha uzun ölçme sürelerine ihtiyaç vardır. İyonosferdeki düzensiz değişimler (stokastik bölüm) üzerinde odaklanan çalışmalar,

iyonosferdeki düzensiz etkileri belirlemeye yöneliktir. Bunun nedeni ise, iyonosferdeki düzensiz etkilerin, tam sayı belirsizliği çözümü ve koordinat bileşenlerini doğrudan etkilemesidir.

Bölgesel iyonosfer haritası L1 ve L2 faz ölçülerinin farkına eşit olan L4 doğrusal kombinasyonuna Taylor açılımı uygulanarak elde edilmektedir. Küresel iyonosfer etkilerinin modellendirilmesinde ise bölgesel nitelikteki Taylor açılımı yetersiz kaldığından küresel harmonik açılım uygulanmaktadır. İyonosferin GPS ölçülerinde neden olduğu sorunlar özellikle uydudan yayınlanan sinyallerin alıcı tarafından alınması sırasındaki sinyal kesiklikleridir. Bu ise ölçülen taşıyıcı dalga fazının sürekliliğini engellediğinden faz kesikliklerine (Cycle Slips) neden olmaktadır. Bu da ölçü değerlendirmesi (postprocessing) aşamasında oldukça yorucu ve zaman alıcı işlemler gerektirmektedir. Eğer ölçüler tek frekanslı (single-frequency) alıcılar kullanılarak yapılmışsa sorun daha da karmaşık hale gelmektedir [Kahveci, 1997].

İyonosferin GPS ile yapılan kod ve faz ölçülerine olan etkileri farklıdır. Başka bir deyişle, kod ölçüleri için iyonosferik grup gecikme etkisi (group delay) söz konusu iken faz ölçüleri için faz hızlanması (phase advance) söz konusudur. Faz ölçüleri için kırılma indisi, $n_p = 1 - \frac{40.3}{f^2} N_e$ ve kod ölçüleri için kırılma indisi $n_g = 1 + \frac{40.3}{f^2} N_e$ şeklinde ifade edilmektedir [Georgiadou ve Kleusberg, 1988; Leick, 1990; Seeber, 2003; Aslan vd., 2004; Kolb, 2005].

İyonosfer radyo dalgalarını dağıtıcı (dispersive) bir özelliğe sahiptir. Bu bozucu etki radyo dalgalarının frekansına bağlı olarak değişim gösterir. Dolayısıyla bu etkiler modellendirilirken öncelikle iyonosferin kırılma indisinin belirlenmesi ve daha sonra da uydu-alıcı arasındaki sinyal yolu boyunca integral alınarak ölçülere getirilecek olan düzeltmenin bulunması gerekmektedir. Birbirine yakın uzaklıkta ölçü yapan alıcılar için; elektromanyetik dalgalar, aynı iyonosferik bölgeden geçtiği için aynı büyüklükteki iyonosferik etki altında kalacakları kabul edilebilir. Bu nedenle kısa baz uzunluklarında ($< 20 - 30\,km$) tekli, ikili ve üçlü faz farkları oluşturularak söz konusu iyonosferik etki, hem tek hem de çift frekanslı ölçüler için büyük ölçüde giderilebilmektedir. Fakat uzun bazlarda ($> 100\,km$) mutlaka çift frekanslı alıcılar kullanılmalıdır. Ayrıca kısa bazların değerlendirilmesinde sadece L1 frekansının bir

iyonosfer modeli ile birlikte kullanılması L3 kombinasyonuna göre çoğu zaman daha iyi sonuç vermektedir. Çünkü L3 kombinasyonunun gürültüsü L1'e göre daha fazladır [Kahveci, 1997].

Yer yüzeyinde bulunan GPS alıcılarına iyonosferi geçerek ulaşan GPS sinyalleri, iyonosferin zaman içerisindeki değişimini incelemek için kullanılabilmektedir. Radyo dalgasının izlediği yolun üzerindeki bir metrekare alanda bulunan serbest elektronların sayısı olarak tanımlanan toplam elektron içeriği (TEC) iyonosfer ve üst atmosferin yapısını inceleyebilmek için kullanılan önemli değişkenlerden birisidir. TEC değerleri ile iyonosferdeki kısa ve uzun vadeli değişimleri, iyonosferik düzensizlikler ve bozan etkenleri birlikte incelemek mümkündür [Arıkan vd., 2004; Erol ve Arıkan, 2004; Erol ve Arıkan, 2005]. Ayrıca iyonosferde oluşan TEC değişimleri ile enerji dalgalanmaları belirlenebilmektedir. Değişik enerji kaynaklarının oluşturduğu basınç dalgalanmaları, farklı algılanma modelleri ile tayin edilebilmektedir [Hawarey ve Ayan, 2004].

3. İYONOSFER

Dünya atmosferinin üst kısımlarında, yaklaşık 50 km yükseklikten başlayan oldukça yüksek elektron yoğunluğuna sahip iyonlaşmış gaz tabakası bulunmaktadır.

1901 yılında Heaviside ve Kenelly tarafından birbirinden bağımsız olarak öngörülen ve uzun yıllar boyunca Heaviside tabakası olarak adlandırılan bu doğal plazma tabakası, Marconi'nin Londra'da yayınladığı radyo sinyallerini daha da güçlenmiş olarak Nova Scotia'da gözlemesi sonucunda araştırmacıların bu bölgeyle daha fazla ilgilenmesine yol açmıştır. İyonosfer adı verilen bu doğal plazma tabakası güneşten gelen mor ötesi ışınların, atmosferin üst tabakalarındaki atomlar ve moleküllerce soğurulması sonucunda oluşmaktadır. Bu tabakalar, foto iyonizasyon sonucunda oluştuğu gibi, şimşeklerin taşıdığı şiddetli elektrik alanların ve şok dalgalarının ya da oldukça yüksek temparatürlerin etkisiyle de oluşabilmektedir. Serbest elektronlar ve artı iyonları içeren bu iyonosfer tabakası elektromanyetik dalgaları yansıtarak, bu dalgaların oldukça uzak mesafelere gitmelerini sağlar. Bu yüklü parçacıklar, dünyanın manyetik alanınca hapsedilirler. İyonlaşmış tabakaların yükseklikleri ve özellikleri, güneş ışınımının doğasına ve atmosfer bileşiminin niteliklerine bağlıdır [Yeniçay, 1970; Pollack ve Stump, 2004; Cheng, 2003; Davies, 1968].

3.1 Gazların İyonizasyonu

Çevremizi saran atmosfer yaklaşık olarak % 78 Azot (N_2), % 21 Oksijen (O_2), % 0,9 Argon (Ar), % 0,03 Karbondioksit (CO_2) bileşenlerinden oluşmaktadır. Ayrıca azınlık bileşenler olarak da Neon (Ne), Helyum (He), Metan (CH_4), Kripton (Kr), Hidrojen (H_2), Ksenon, Ozon, Azot oksitleri Amonyak, Kükürt dioksit, Karbon monoksit ve Radon gazlarından oluşmaktadır. Gaz karışımı yer yüzeyinde itibaren yaklaşık 100 km ye kadar bu oranlarda sabit olarak devam eder. Daha sonra ise bu oranlar yükseklikle beraber büyük farklılıklar gösterir

Örneğin;

200 km:	O	→	10^{16} P/ m^3	300km: O	→ 10^{16} P/ m^3
	N_2	→	10^{16} P/ m^3	N_2	→ 10^{14} P/ m^3
	O_2	→	10^{64} P/m^3	O_2	→ 10^{12}P/m^3
	He	→	10^{13} P/ m^3	He	→ 10^{13} P/ m^3

olarak dağılım göstermektedir [Yaşa, 1987].

Dünyamızı saran atmosferimizde bulunan bu gaz karışımı güneşten gelen farklı dalga boylarındaki elektromanyetik radyasyonun etkisi altındadır. Bu gaz karışımının üzerine düşen elektromanyetik dalga, atom ya da moleküllerin elektronlarının sahip olduğu enerjinin artmasına sebep olur. Dolayısıyla elektron uyarılmış seviyeye geçerek, çekirdek etrafındaki yörüngelerden bir veya birkaç elektron uzaklaştırabilir. Eğer gelen elektromanyetik dalganın enerjisi elektronu dış yörüngeden tamamen koparacak kadar büyük ise, atom ya da moleküle bağlı olan elektron, atomdan ayrılarak serbest yüklü elektron haline gelecektir. Elektronunu kaybeden atom ise pozitif yüklü iyon haline gelir. Atomun bu şekilde enerji yutarak elektronunu kaybetmesi olayına foto iyonizasyon ve elektronun kaybolması için gereken enerjiye de iyonlaşma enerji denir.

Güneşten kuvantlar halinde yayılarak gelen ışınlar, yeryüzüne gelmeden önce etrafımızı saran atmosferden geçerek yukarda bahsettiğimiz gaz karışımının içinden geçeceklerdir. Gelen güneş ışınlarının enerjisi yeterince yüksek ise oksijen ve azot molekülleri ile oksijen atomunu iyonize ederler.

$$O_2 + hv \rightarrow O_2^* + e \qquad \lambda < 1024\ A^0$$

$$N_2 + hv \rightarrow N_2^+ + e \qquad \lambda < 796\ A^0$$

$$O + hv \rightarrow O^* + e \qquad \lambda < 911\ A^0$$

Dünya atmosferinde bulunan atom veya molekülleri iyonize eden ışınların dalga boyları 1000 A^0 den daha düşüktür. Atmosferin bileşiminde ki farklı dalga boyları hesaplanılmaktadır. Farklıda bulunsa iyonize edici ışınların dalga boyları ultraviyole ya da X ışınlarının dalga boyuna karşı gelmektedir. İyonizasyon sonucunda serbest kalan elektronlar, çarpışmalar sonucu kaybolmaktadırlar. Atom ve molekülleri iyonize eden ışığın kaynağı güneş olduğu için, iyonların meydana gelişi ve ortaya çıkan elektronların kayboluşu sürekli bir şekilde devam edecektir. İyonosferde elektron yoğunluğu değişimi bu üretim ve kayboluş mekanizması ile orantılıdır. İyonların meydana gelişi ve elektronların kayboluşu arasında bir denge varsa, güneşin meydana getirdiği iyon üretimini q ile orantı sabitini de α ile gösterirsek, N_e elektron yoğunluğu, N^+ da iyon yoğunluğu olmak üzere

$$\frac{dN_e}{dt} = q - \alpha N_e N^+ \tag{3.1}$$

dir. Ortam nötür olduğu için $N_e = N^+$ olacaktır. Dolayısıyla kayıp terimi N^2 ile orantılıdır.

Bu denklemde α orantı sabitine elektron ile iyonun birleşme katsayısı (Recombination Coefficient) adı verilmektedir [Davies, 1968; Yazıcı, 1996; Yaşa, 1987; 1].

3.2 İyonosfer Katmanları

İyonosfer; güneşin aktivitesine bağlı olarak, günün saatine, gece veya gündüz oluşuna, mevsime, yıla, enlem ve boylamın da etkisi ile birlikte, güneşin 11 yıllık çevriminin evresine de bağlı olarak sürekli değişen bir yapıya sahiptir. Farklı yüksekliklerde farklı atom ve moleküller bulunduğundan, her bir atom ve molekülünde foto iyonizasyon seviyeleri farklı olduğundan, yüksekliğe ve elektron yoğunluğuna bağlı olarak iyonosfer kendi içerisinde farklı katmanlara ayrılmaktadır. İyonlaşma miktarına bağlı olarak D, E ve F katmanı olarak adlandırılan bu tabakalar farklı özellikleri nedeniyle kendi içlerinde de E_1, E_2, E_3 ile F_1 ve F_2 katmanlarına ayrılmaktadır.

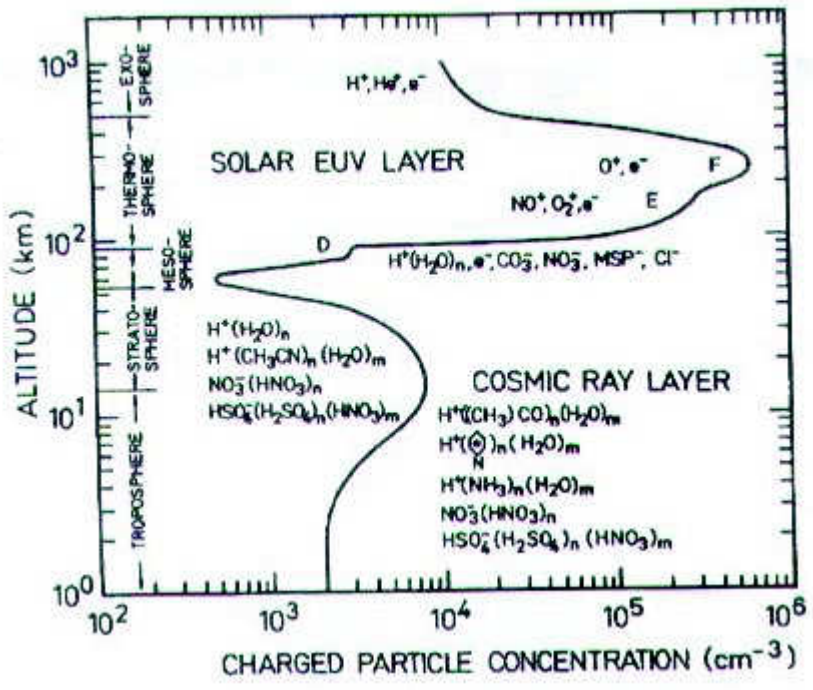
D katmanı, yeryüzünden itibaren yaklaşık 50 km ile 90 km arasında yer alan iyonlaşmanın en az olduğu fakat karmaşık bir kimyasal yapıya sahip olan tabakadır. Bu katman kendi

içerisinde üç farklı davranış sergilemektedir. 80 km ile 90 km arasındaki katmanda 1-10 A^o luk X-ışınlarının oluşturduğu iyonizasyon hâkimken, 70km ile 80km arasındaki katmanda Lyman-α ışınları ile iyonizasyon gerçekleşmektedir. 70km nin altında ise kozmik ışınların oluşturduğu ince bir iyon tabakası mevcuttur.

90 km ile 150 km arasındaki bölge E bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Bu bölgenin sinyaller üzerinde kırınım etkisi vardır. Bu bölgeyi oluşturan temel iyonlar O_2^+, NO^+ ve O^+ dır. Düşük enerjili X ışınlarıyla oluşturulmakla beraber, 1000A^o ile 15000A^o'luk EUV ışınların foto iyonizasyonu ile de oluşabilmektedir [Davies, 1968; Yaşa, 1987; Yazıcı, 1996; 1].

90 km ile 150 km nin üzeri ise F katmanı olarak adlandırılmaktadır. F katmanında yüksüz atmosferin temel bileşini O ve N_2 dan ve ikincil olarak da O_2, N ve NO dan ibarettir. İyonizasyon, 900 A^o a kadar olan dalga boyundaki güneş ışınları tarafından gerçekleştirilen foto iyonizasyonla oluşmaktadır. F katmanında elektron yoğunluğu gündüz 2.10^5 e/cm^3 ile 5.10^6 e/cm^3 arasında yüksekliğe bağlı olarak değişim göstermektedir. Geceleri ise bu yoğunluk 10^5 e/cm^3'e kadar düşmektedir. F katmanında elektron yoğunluğu gün boyunca iki farklı maksimum değere sahip olduğundan, bu katman kendi içerisindeki özelliği nedeniyle F_1 ve F_2 diye ikiye ayrılmaktadır. İyonlaşmanın en fazla olduğu katman F_2 dir. Yansıtıcı özelliğinde dolayı F katmanı Kısa Dalga haberleşmeleri açısından büyük önem taşımaktadır.

Şekil 3.1 de iyonosfer katmanlarında yüklü parçacıkların yüksekliğe bağlı olarak dağılımı gösterilmektedir [Davies, 1968; Yaşa, 1987; Yazıcı, 1996; 1, 3].



Şekil 3.1 Yüklü parçacıkların iyonosfer içinde yüksekliğe bağlı olarak dağılımı.

4. CHAPMAN TABAKASI

İyonosfer değişken bir yapıda olmasından dolayı, elektron yoğunluğunun yüksekliğe bağlı olarak hesaplanması oldukça zordur. Bu zorluğun giderilmesi için 1931 yılında Chapman tarafından bir takım varsayımlar yapılarak iyonosfer modellenmiştir [Davies, 1965].

Chapman tabaka modeli aslında basitleştirilmiş bir iyonize tabaka modelidir fakat günümüzde GPS datalarından elde edilen verilere dayanarak iyonosferin modellemesinde kullanılmaktadır [Tascione, 1988; Bassiri ve Hajj, 1992; Bassiri ve Hajj, 1993; Hochegger vd., 1999; Depuev ve Pulinets, 2004].

Chapman, güneşten gelen radyasyon ışınının soğrulması sonucu oluşan elektron yoğunluğunun kimyasal sürecini basitleştirmek için bazı varsayımlar yapmıştır.

1. Atmosferde yalnızca bir çeşit gazın bulunması
2. Atmosferin tabakalı düzlemlerden oluşması
3. Güneşten gelen iyonize radyasyon ışınının monokromatik olması ve paralel gelmesi
4. Atmosferin izotermal bir ortam olması varsayımlarına dayanır [Chapman, 1930; Chapman ve Davies, 1958; Davies, 1965].

Chapman zenit (başucu) ile χ açısı yaparak iyonosferin h yüksekliğine kadar gelen monokromatik soğrulan (iyonize edici) ışınının şiddetini S olarak almıştır. İyonosferin h ve $h + dh$ yükseklikleri arasında kalan bölgeye, gelen radyasyon ışınının birim alan başına soğrulma miktarı dS olarak alınır.

$$dS = S\sigma N dh \sec \chi \tag{4.1}$$

(4.1) eşitliğinde σ ifadesi birim alanda bulunan gaz halinde ki atomların soğrulma miktarıdır ve N ifadesi gaz halindeki atomların moleküler kütle yoğunluk sayısını gösterir. Sonsuzdan h yüksekliğine kadar gelen radyasyon şiddeti (4.2) eşitliği ile bulunur.

$$\int \frac{ds}{s} = \sec \chi \int_{\infty}^{h} N\sigma dh = -\tau \sec \chi \tag{4.2}$$

$$\tau = -\int_{\infty}^{h} N\sigma dh \tag{4.3}$$

(4.3) ifadesine h yüksekliğine kadar atmosferin optik derinliği denir. Eksi işareti optik derinliğin h yüksekliğinin tersi yönünde artığını gösterir. Atmosferin çok yükseklerinde $S \to S_{\infty}$ olur.

$$S = S_{\infty} \exp\left(-\tau \sec \chi\right) \tag{4.4}$$

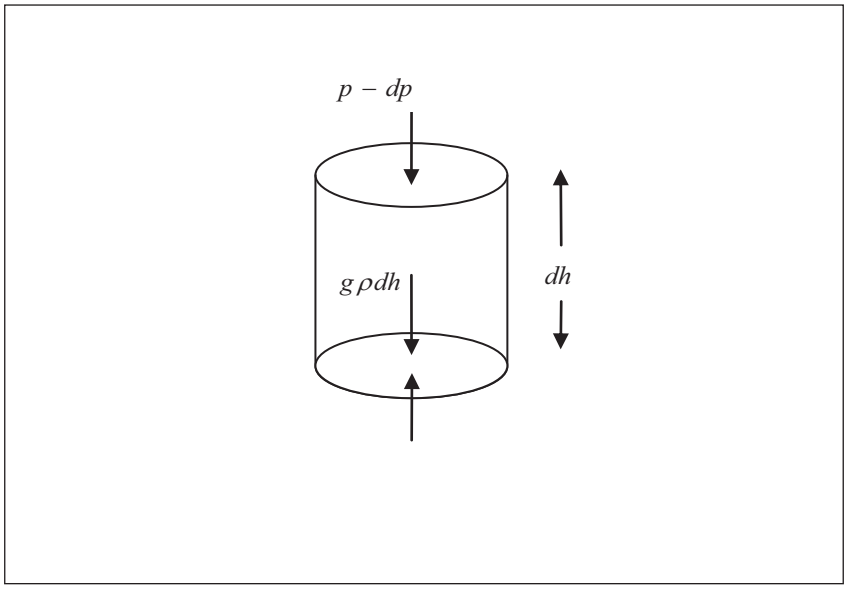
Eşitlik (4.1) de radyasyon şiddeti (S) yerine eşitlik (4.4) de ki değeri yazılırsa, birim hacim başına soğurulan enerji şiddeti (4.5) eşitliği ile verilir.

$$\frac{dS}{dh \operatorname{Sec} \chi} = N\sigma S_{\infty} \exp\left(-\tau \sec \chi\right) \tag{4.5}$$

Yüksekliğe bağlı moleküler yoğunluk değişimini (ρ) bulmak için Chapman, bir çeşit molekül ve izotermal ortam yaklaşımlarını kullanmıştır. Bunun için Şekil 4.1 deki gibi yan yüksekliği dh bir silindir düşünülürse, silindirin alt ve üst tabakaları arasındaki basınç farkı dp eşitlik (4.6) ile verilir.

$$dp = -\rho g dh \tag{4.6}$$

İdeal gaz yasasından ($p = nkT$)



Şekil 4.1 Silindir şeklinde ki bir cisim içindeki gaz basıncı değişimi [Davies, 1968].

$$mdp = (mn)kT = \rho kT \tag{4.7}$$

m moleküler kütle, p basınç, n yoğunluk, k Boltzman sabiti, g yer çekimi ivmesi ve T sıcaklıktır.

$$mdp = d\rho(kT) \tag{4.8}$$

$$dp = \frac{kT}{m} d\rho \tag{4.9}$$

$$\frac{kT}{m} d\rho = -\rho g dh \tag{4.10}$$

$$\frac{d\rho}{\rho} = -\frac{mg}{kT} dh = -\frac{dh}{H} \tag{4.11}$$

(4.11) denkleminde verilen ifade $H = \frac{kT}{mg}$ skala yüksekliği olarak adlandırılır. (4.11) denkleminin çözümünden moleküler yoğunluğunun yükseklikle e^{-1} (eksponansiyel) olarak azaldığı görülür [Chapman,1931].

$$\rho = \rho_0 e^{-(h-h_0/H)} \tag{4.12}$$

Burada ρ değerinin h_0 yüksekliğindeki değeri ρ_0 dır. Eğer referans yüksekliğini sıfır olarak tanımlanırsa moleküler kütle yoğunluğu (4.13) denklemi ile verilir.

$$\rho = \rho_0 e^{-\frac{h}{H}} \tag{4.13}$$

(4.04) de moleküler kütle yoğunluğu yüksekliğe bağlı olarak yazılırsa, (4.14) denklemi elde edilir [Chapman,1930; Chapman ve Davies, 1958].

$$S = S_\infty \exp\{-\sigma\rho_0 H \sec\chi \exp(-h/H)\} \tag{4.14}$$

Birim miktarda soğrulan enerjinin ürettiği iyon çiftinin sayısı (iyonizasyon sabiti) η ile gösterilir. Birim hacim başına saniyede üretilen iyon çifti sayısı (4.15) eşitliği ile verilir [Davies, 1965].

$$q(\chi, h) = \eta \cos \chi \frac{dS}{dh} = N\sigma S_{\infty} \exp(-\tau Sec\, \chi) \tag{4.15}$$

τ değeri ideal gaz yasası kullanılarak, (4.16) eşitliğindeki gibi elde edilir.

$$\tau = \sigma \int_{\infty}^{k} Ndh = \frac{\sigma}{mg} \int dp = \frac{\sigma\rho}{mg} = \frac{\rho NT}{mg} = \sigma NH \tag{4.16}$$

Yukarıda ki eşitlikte $q(\chi, h)$ fonksiyonu τ eşitliğinde yerine yazılırsa aşağıdaki bağıntı elde edilmiş olur.

$$q(\chi, h) = \frac{\tau S_{\infty}}{He} \eta \exp(1 - \tau \sec \chi) \tag{4.17}$$

Burada e doğal logaritma tabanındadır ve $e = 2.718 .....$ değerindedir. (4.17) denklemi tüm sıcaklıklar için geçerli olan iyon üretim oranıdır ve bu eşitlikte yer çekimi ivmesinin (g) yükseklikle değişimi ihmal edilmiştir. Chapman teorisindeki izotermal atmosfer varsayımıyla bir z yüksekliği tanımlanır.

$$z = -\ln \tau \tag{4.18a}$$

$$\tau = \exp(-z) \tag{4.18b}$$

Bu ifadeler $q(\chi, z)$ denkleminde yerine yazılırsa, denklemin yeni hali aşağıdaki gibi olur.

$$q(\chi, z) = \frac{S_\infty \eta}{\varepsilon H} \exp\{1 - z - \sec \chi \exp(-z)\} \tag{4.19a}$$

$$= q_0 \exp\{1 - z - \sec \chi \exp(-z)\} \tag{4.19b}$$

Bu eşitlik zenit ile χ açısı yaparak atmosferde z yüksekliğine kadar gelen radyasyon ışının soğrulması sonucu oluşan iyonların üretim oranını verir. Aynı eşitlik, $z = 0$ seviyesinde güneş tam tepedeyken yani $\tau = 1$ olduğunda iyon üretim oranı eşitlik (4.20) ile verilir.

$$q_0 = \frac{S_\infty \eta}{\varepsilon H} \tag{4.20}$$

Atmosferin en üst noktasında gaz miktarı az olduğundan, bu kısımda az miktarda enerji soğrulur. Başka bir deyişle atmosferin alt tabakaları yüksek yoğunluğun olduğu yerlerdir. Fakat enerjinin büyük bir kısmı yüksek seviyelerde soğrulduğundan maksimum soğrulma veya maksimum iyon üretiminin orta enlemlerde meydana geldiği düşünülür. İyon parçacıklarının üretim oranını $q(\chi, z)$, yükseklik ve zenit açısına bağlı olan eşitlikle ifade edilir. Solar zenit açısını (χ) yüksekliğin (z) fonksiyonu olarak yazılırsa (4.21) eşitliği elde edilir [Chapman, 1931; Chapman ve Davies, 1958; Davies, 1965; Davies, 1968].

$$\ln \frac{q(\chi, z)}{q_0} = 1 - z - \sec \chi e^{-z} \tag{4.21}$$

(4.21) eşitliğinin, iyon üretiminin pik yüksekliği (z_m veya h_m) için çözümü yapıldığında elde edilen eşitlik (4.22) ile verilir.

$$\ln \frac{q_m(\chi, z_m)}{q_0} = -z_m \tag{4.22}$$

(4.22) eşitliğin de ki yükseklik ifadesi, (4.23) veya (4.24) eşitlikleriyle ifade edilir.

$$z_m = \ln \sec \chi \tag{4.23}$$

$$h_m = h_0 + H \ln \sec \chi \tag{4.24}$$

(4.19b) eşitliğinde iyon üretiminin pik değeri q_m için çözüm yapıldığında $q_m = q_0 \cos \chi$ ifadesi elde edilir.

İyon üretiminin yoğunluğu, iyonlaştırıcı radyasyon akımına ve iyonizasyon sabitine (η) bağlıdır. Yani akım değişse bile maksimum üretim yüksekliği değişmez. Eğer gelen radyasyon birçok dalga boyundan oluşuyorsa, bu durumda iyonizasyon sabiti göze çarpacak şekilde farklılaşır. Çünkü farklı dalga boyları farklı yüksekliklerde soğrulur. Bunun sonucunda da iyonosferde değişik tabakalar oluşur. Ayrıca iyonosferde farklı iyonize tabakaları farklı gazlar ile oluşur [Davies, 1968; Tascione, 1988; Radicella, 1989].

Atmosferde ki elektron hareketlerini ihmal edecek olursak elektron kayıp süreci sonunda herhangi bir seviyedeki net elektron yoğunluğu N ile verilir. (4.25) eşitliği (Quadratic Law),

$$\frac{dN}{dt} = q - \alpha N^2 \tag{4.25}$$

(4.21) eşitliğinde yerine yazılırsa,

$$2 \ln \frac{N}{N_0} = 1 - z - \sec \chi e^{-z} \tag{4.26}$$

ifadesi elde edilir. Güneş tam tepedeyken N_0 pik elektron yoğunluğu olarak adlandırılır maksimum elektron yoğunluğu ise aşağıda ki (4.27) denklemi ile verilir.

$$N_{\max}^2 = \frac{q_0}{\alpha} \cos \chi \tag{4.27}$$

$$N_0^2 = \frac{q_0}{\alpha} \tag{4.28}$$

Aynı süreç, serbest elektron oluşumu (attachment–like loss) düşünülerek, (4.29) eşitliği,

$$\frac{dN}{dt} = q - \beta N \tag{4.29}$$

(4.21) eşitliğinde yerine yazılarak, aşağıdaki bağıntıyı elde edilir.

$$\ln \frac{N}{N'} = 1 - z - \sec \chi e^{-z} \tag{4.30}$$

$$N' = \frac{q_0}{q} \tag{4.31}$$

Bu durumda maksimum elektron yoğunluğu (4.32) ile verilir.

$$N_{\max} = \frac{q_0}{\beta} \cos \chi \tag{4.32}$$

Attachment-like yani kayıp süresi yükseklikten bağımsız olduğundan $q = \beta N$ ile ifade edilebilir. Eğer β direk olarak moleküler yoğunluğa bağlı olduğu farz edilirse, (4.33) eşitliği elde edilir.

$$q = \beta_0 N \exp(-z) \tag{4.33}$$

Buradaki β_0, β nın h_0 seviyesinde aldığı değerdir. Buradan elektron yoğunluğu aşağıda ki eşitlik ile verilir.

$$N = N_0 \exp\{1 - \sec \chi \exp(-z)\} \tag{4.34}$$

Bu denklemde, E ve F1 tabakaların konumu $\cos^{1/2}\chi$ bağlı olarak belirlenir.

$$\cos\chi = \sin\phi\sin\delta + \cos\phi\cos\delta\cosh \tag{4.35}$$

Ø coğrafik enlem, δ solar sapma, h yerel saat açısıdır. Burada alçak tabakalar için z negatif olduğundan iyon üretimi, $\sec\chi e^{-z}$ terimi ile genişler, Yüksek tabakalarda ise z pozitif olduğundan aynı terimden dolayı küçülür. Dolayısıyla iyon üretimi gün doğumuna kadar hızlıca artar günbatımına kadar sabit kalır sonra hızlıca düşmeye başlar. Görünür ışık sayesinde negatif iyonlardan elektronların kimyasal reaksiyonlarla ayrılması (photodetachment) sonucu serbest elektronlar üretilir. Yerin atmosferi birçok gazdan oluşmuştur, atmosfere gelen radyasyon geniş bir spektruma sahiptir, yine hatırlayalım ki atmosfer izotermal bir ortam değildir. Pratikte, iyonosfer tabakalarında N in değeri $\cos\chi$ ya tamamen bağlı değildir. Fakat Chapman teorisinde, bu gerçekleri göz ardı ederek bazı varsayımlar yapmış bu varsayımlar sayesinde, elde ettiğimiz elektron yoğunluğu profili ile GPS gözlem datalarının analizi ve iyonosferde meydana gelen fiziksel süreçleri anlamamızda yardımcı olmuştur. Chapman çok düşük frekanslı radyo sinyalleri kullanarak iyonosferde ki gün batımına kadar olan absorpsiyonun yaklaşık sabit olduğunu ve gün batımında aniden azaldığını buna bağlı olarakda gün batımına kadar elektron yoğunluğunu yaklaşık sabit olduğunu gün batımında sonra aniden azaldığını görmüştür [Chapman, 1930; Chapman, 1958; Davies, 1968; Davies, 1965; Hochegger, Nava vd., 1999; Depuev ve Pulients, 2004].

5. İYONOSFERİN ELEKTROMANYETİK DALGA YAYILIMINA ETKİSİ

İyonosferi kat eden elektromanyetik dalgaların kırılmaya uğramaları, iyonosferde ilerleyen elektromanyetik dalgaların detaylı bir şekilde incelenmesini gerektirmiştir. İyonosferin neden olduğu kırılma, ilerleyen dalganın frekansına ve iyonosferin elektron yoğunluğuna bağlı olarak değişim göstermektedir. İyonosferin elektron yoğunluğu ise, güneşin 11 yıllık çevrimine bağlı olarak meydana gelen güneş olaylarına, mevsime, günün zamanına, enlem ve boylama (coğrafi konuma) bağlı olarak sürekli değişim göstermektedir. İyonosferde yayılan dalga, oluşan kırılmalardan dolayı gecikmeye uğrayacağından, bu gecikmenin belirlenebilmesi için, iyonosferdeki kırılma indisi ve kırılma indisinin bağlı olduğu parametrelerin bilinmesi gerekir.

İyonosferi tanımlayan önemli parametrelerden birisi olan kırılma indisi hesabı yapılırken, ortamın ve dalganın özellikleri bilinmelidir. Bu nedenle önce dalganın elektrik bakımdan nötral gaz ve iyonlardan oluşan bir ortamda ilerlediği düşünülür. Böyle bir ortamda dalganın yayılmasını etkileyen en önemli faktörler elektron yoğunluğu, dış manyetik alan $\vec{B}_0$ ve elektron ile diğer parçacıklar arasındaki çarpışma frekansıdır. Bununla birlikte ortamın kırılma indisi, dalganın özelliklerine de bağlıdır. Ayrıca dalga frekansına, dalganın yayılım yönüne, dalganın elektrik veya manyetik alan vektör bileşenlerinin yönüne de bağlıdır.

5.1 İyonize Ortamda Elektromanyetik Dalga Yayılımı

Homojen izotrop bir ortamda yayılan elektromanyetik dalganın elektrik alan bileşeni,

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \qquad (5.1)$$

dalga denklemine uyar. Bu denklemde μ ortamın manyetik geçirgenliği ve ε da ortamın elektriksel geçirgenliğidir. Elektrik alan vektörünün ortamdaki yayılma hızı $v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$ faz hızı

ile ifade edilir. Snell yasasından faydalanarak kırılma indisi bağıntısını $\mu = \frac{c}{\upsilon} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}} = \sqrt{\kappa}$ ile hesaplayabiliriz. κ ortamın soğurma katsayısıdır [Davies, 1968].

x doğrultusunda yz düzleminde yayılan bir düzlem elektromanyetik dalganın hareket denklemi

$$E = E_0 e^{i(wt - kx)} \tag{5.2}$$

bağıntısı ile ifade edilebilir. Bu bağıntıda k ortamdaki yayılma sabiti olup $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ dır. λ ortamdaki dalga boyu ve $i^2 = -1$ dir. Düzlem dalganın hareket denklemi,

$$\begin{aligned} E &= E_0 \cos(wt - kx) \\ E &= E_0 \cos w(t - \frac{x}{v}) \\ E &= E_0 \cos k_0 (ct - \mu x) \end{aligned} \quad . \tag{5.3}$$

bağıntıları ile de ifade edilebilir. Bu denklemlerde $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ boşluktaki yayılma sabiti, λ_0 boşluktaki dalga boyudur. Ortamda aynı faz hızı ile yayılan bu denklemlerde v, μ ve k reel büyüklüklerdir Soğurucu bir ortamda ise bu parametreler kompleks formda ifade edilirler. n kompleks kırılma indisi olmak üzere,

$$\begin{aligned} E &= E_0 e^{i(wt - nk_0 x)} \\ n &= \mu - ix \end{aligned} \tag{5.4}$$

olarak ifade edilir. (5.4) eşitliğinde $\mu \; ve \; \chi$ kırılma indisinin reel ve imajiner kısmıdır. Kırılma indisinin kompleks ifadesini (5.2) dalga denkleminde yerine yazılırsa,

$$E = E_0 e^{-k_0 \chi x} e^{i(wt - \mu k_0 x)} \tag{5.5}$$

eşitliği elde edilir. Bu denklemde $K = k_0 \chi$ ortamın soğurma katsayısı ve $E_0 e^{-iK x}$ de dalganın genliğidir ve uzaklık ile eksponansiyel olarak azalmaktadır [Yaşa, 1987]. Ortamın kompleks kırılma indisini veren bağıntı, E elektrik alanına ve P polarizasyonuna bağlı olarak ifade edilebilir.

$$D = \varepsilon E = \varepsilon_0 E + P$$
$$K = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = 1 + \frac{P}{\varepsilon_0 E} \qquad (5.6)$$

Dalganın yayıldığı ortamdaki $\frac{P}{E}$ oranı hesaplanabilirse n kırılma indisi bağıntısı kolaylıkla tayin edilebilir. Düzlem dalganın yayıldığı ortamın, elektriksel olarak nötr olduğu, yük dağılımının uniform olduğu, elektronların sadece dalganın yayılımını etkilediği, soğuk plazmada ki termal hareketlerin ve boş uzayın manyetik özelliklerin var olduğu, Lorentz polarizasyon teriminin olmadığı bir ortam olduğu kabul edilir.

x doğrultusunda ilerleyen bir radyo dalgasının elektrik alan vektörünün y bileşeni

$$E_y = E_0 \cos(wt - kx) \qquad (5.7)$$

denklemi ile ifade edilir. İyonosferde ilerleyen dalga ile parçacıkların çarpışmaları sırasında, dalgada ki potansiyel enerji parçacıktaki kinetik enerjiye dönüşür bu enerjiyle hareket eden parçacıklar elektromanyetik dalga yayarlar ve en sonunda gelen dalgaya enerjilerini iade ederler. Elektronlardan saçılan dalgalar, ilerleyen dalgalarda faz değişimine sebep olurlar.

İzotropik ortamda kırılma indisinin bulunabilmesi için ortamın $\frac{P}{E}$ (constitutive) ilişkisinin hesaplanması gerekir. Bundan dolayı E elektrik alan etkisi altında bulunan bir m kütleli ve e yüklü iyon hareketi düşünerek hesaplamalar yapılır.

Bu durumda e yüklü iyon üzerine etki eden elektrostatik kuvveti $F = eE$ olur.

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = eE_y \qquad (5.8)$$

İzotropik ortam için kırılma kırılma indisi bağıntısı (5.9) denklemi ile bulunur.

$$n^2 = 1 - \frac{N_e^2}{\varepsilon_0 m w^2} \tag{5.9}$$

denklemi bulunur. Bu denklem reel bir değer olduğu için

$$\mu^2 = 1 - \frac{N_e^2}{\varepsilon_0 m w^2} = 1 - \frac{w^2{}_N}{w^2} \tag{5.10}$$

olarak yazılabilir.

$$w_N^2 = \frac{N_e^2}{\varepsilon_0 m} \tag{5.11}$$

ya da

$$f_N^2 = \frac{N_e^2}{4\pi^2 \varepsilon_0 m} \tag{5.12}$$

olarak ifade edilebilir.

Burada w_N ortamın açısal plazma frekansı olarak adlandırılır.

5.2 Manyetoiyonik Teori

Yukarda iyonize ortamı izotropik kabul ederek kırılma indisi bağıntısını elde ettik. Ortamda bir dış manyetik alanın bulunduğunu ve soğrulmanın olduğu düşünülürse bu denklemler oldukça karmaşık olacaktır. Bu bölümde x ekseniyle θ açısı yapan bir $\vec{B}_0$ dış manyetik alanının bulunduğunu kabul edeceğiz. Ayrıca çarpışma frekansının elektronun enerjisinden bağımsız olduğu kabul edilecektir. Böyle bir dış manyetik alanda x ekseni doğrultusunda ilerleyen düzlem radyo dalgası düşünülür. Elektron üzerine etki edecek olan kuvvetler, elektrostatik kuvvet eE, manyetik kuvvet $e\,\vec{v} \times \vec{B}_0$ ve çarpışmalardan kaynaklanan sürtünme kuvvetidir. Bir dalganın elektrik alanı etkisi altında serbest elektronun hareket denklemi (5.13) eşitliği ile verilir.

$$m\frac{d\vec{v}}{dt} = e(E + \vec{v} \times \vec{B}_0) - mv\vec{v} \tag{5.13}$$

Burada v çarpışma frekansıdır. Bu denklemde $\vec{v}$ ile $\frac{d\vec{v}}{dt}$ değerleri yerine yazılarak Ne ile çarpılırsa, E ve P arasındaki bağıntı, (5.14) eşitliği ile verilir.

$$-P = \varepsilon_0 XE + iPXY - iZP \tag{5.14}$$

$$X = (\frac{w_H}{w})^2, Y = (\frac{e}{mw}), Z = \frac{v}{w}$$

(5.14) bağıntısı plazmanın constitutive ilişkisi olarak tanımlanmaktadır. Bu denkleminin x, y ve z bileşenleri

$$-P_x = \varepsilon_0 XE_x - iP_z Y_T - iP_x Z \tag{5.15}$$

$$-P_y = \varepsilon_0 XE_y + iP_z Y_L - iP_y Z \tag{5.16}$$

$$-P_z = \varepsilon_0 XE_z + iP_x Y_T - iP_y Y_L - iP_z Z \tag{5.17}$$

olarak elde edilirler. Ortamın elektromanyetik özelliklerini gösteren bu denklemlerde $Y_T = Y \sin\theta$, $Y_L = Y \cos\theta$ dir.

Bu bağıntılardan $\frac{P_y}{E_y}$ ve $\frac{P_z}{E_Z}$ oranlarını hesaplanabilir. x doğrultusunda, elektrik alanın etkisi ile ortamdaki deplasmanın elektrik alan ve polarizasyona bağlı olan denkleminden

$$D_x = \varepsilon_0 E_x + P_x = 0 \tag{5.18}$$

faydalanılarak

$$\frac{P_x}{P_z} = \frac{iY_T}{1 - X - iZ} \tag{5.19}$$

elde edilir. R polarizasyon terimi olduğundan

$$R = -\frac{H_y}{H_Z} = \frac{D_Z}{D_Y} = \frac{E_Z}{E_Y} = \frac{P_Z}{P_Y} \tag{5.20}$$

$$P_y E_Z = P_Z E_Y \tag{5.21}$$

elde edilir. Yukarda elde edilen P_y bileşeni P_z ile çarpılıp, yine elde edilen P_z bileşenini veren denklem de P_y ile çarpılıp, bu denklemler birbirinden çıkarıldığında,

$$P_Z^2 Y_L - P_X P_y Y_T + P_y^2 Y_L = 0 \tag{5.22}$$

denklemini elde edilir. Bu denklem $P_y{}^2$ ile bölüp, $\frac{P_z}{P_y}$ yerine de R ifadesi yazılarak,

$$R^2 Y_L - \left(\frac{P_x}{P_z}\right) R Y_T + Y_L = 0 \tag{5.23}$$

elde edilir. $\frac{P_x}{P_z}$ yerine yazılırsa,

$$Y_L R^2 - \frac{i Y^2{}_T}{1 - X - iZ} R + Y_L = 0 \tag{5.24}$$

elde edilir. Bu denklemin kökleri çözülürse

$$R = \frac{i}{2Y_L}\left(\frac{Y_T^2}{1 - X - iZ} \mp \sqrt{\frac{Y_T^4}{(1 - X - iZ)^2} + 4Y_L^2}\right) \tag{5.25}$$

olarak bulunur.

$$\frac{P_y}{\varepsilon_0 E_y} = -\frac{X}{(1 - iZ + iY_L R)} \tag{5.26}$$

(5.25) ve (5.26) denklemleri kırılma indisi bağıntısında yerine yazılırsa,

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \left(\frac{Y_T^2}{2(1 - X - iZ)} \mp \sqrt{\frac{Y_T^4}{4(1 - X - iZ)^2} + Y_L^2} \right)} \tag{5.27}$$

Appleton formülü olarak adlandırılan kompleks kırılma indisi bağıntısını elde edilmiş olunur. Eşitlik (5.27) daki kompleks kırılma indisi hem ordinary hem de ekstraordinary dalgalar için geçerli olan genel bir ifadedir. Ordinary dalgalar için kompleks kırılma indisini yazmak istenirse (5.27) eşitliğinin negatif (–) işaretlisi geçerlidir, ekstraordinary dalgalar için kırılma indisi ifadesinin pozitif (+) işaretlisi seçilmelidir [Davies, 1968].

Manyetik alan yokluğunda ise $Y_L = Y_T = 0$ alınarak kompleks kırılma indisi yazılır. Bu durumda kırılma indisi (5.28) eşitliğiyle verilir.

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ} \tag{5.28}$$

Eğer izotropik olmayan ortamda parçacıkların (iyonosfer için iyon ve elektronların, dalgayla) yaptıkları çarpışmaları önemsenmezse bu durumda kırılma indisinde

$Z = \frac{v}{w}$ değeri yerine $Z = 0$ alınır. Dolayısıyla kırılma indisi, (5.29) denklemi ile verilir.

$$\mu^2 = 1 - \frac{2X(1 - X)}{2(1 - X) - Y_T^2 \pm \sqrt{Y_T^4 + +4(1 - X^2)Y_L^2}} \tag{5.29}$$

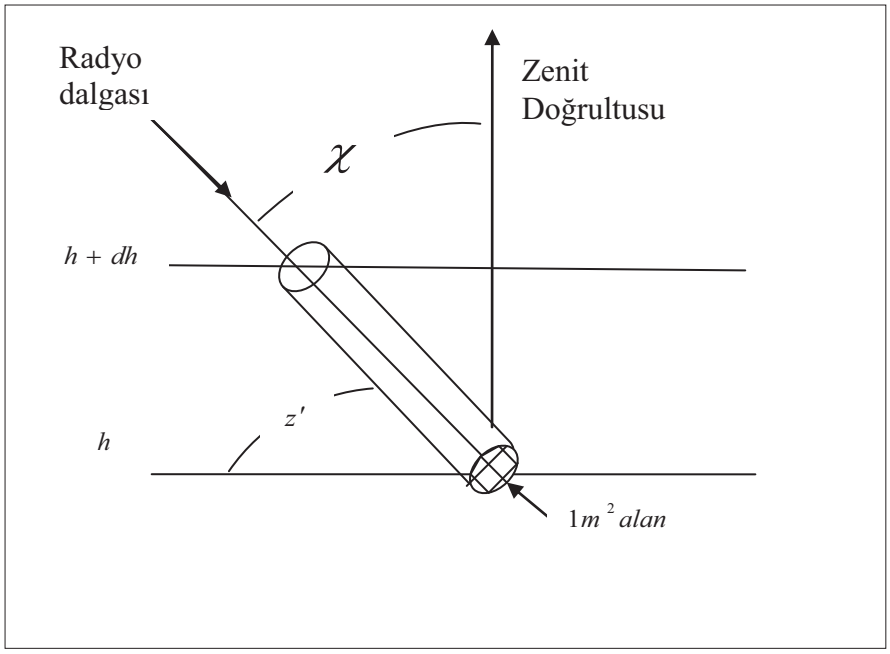
Eğer hem çarpışma hem de manyetik alan ihmal edilirse, bu durumda da kırılma indisi ifadesinde, Z, Y değerleri yerine sıfır yazılır ve böylece kırılma indisi ifadesi (5.30) eşitliği gibi elde edilir.

$$\mu^2 = 1 - X = 1 - \left(\frac{f_N}{f} \right)^2 = 1 - \kappa \frac{N}{f^2} \tag{5.30}$$

Burada κ bir sabit olup değeri $\kappa \approx 80.5N$ metre küp başına elektrondur [Davies, 1968]. Tüm bu işlemlerden anlaşılacağı üzere iyonosferdeki, manyetik alan değişimleri ve parçacık çarpışmaları, iyonosferin yapısını, dolayısıyla kırılma indisini etkileyen önemli faktörlerdir. Bu nedenden dolayı kırılma indisi iyonosfer araştırmaları için çok önemlidir.

6. TOPLAM ELEKTRON İÇERİĞİ

Radyo dalgalarının yayılımına etki edecek kadar elektronlara ve iyonlara sahip olan iyonosfer, uydudan dünyadaki alıcılara doğru ilerlemekte olan GPS sinyallerinin gecikmesine neden olmaktadır. Bu nedenle radyo dalgasının izlediği yolun üzerindeki bir metrekare alanda bulunan serbest elektronların sayısı olarak tanımlanan toplam elektron içeriği iyonosfer ve üst atmosferin yapısını inceleyebilmek için kullanılan önemli değişkenlerden birisidir. Dolayısıyla GPS sinyalinin geçtiği bölgede ki elektron yoğunluğu ve buna bağlı olarak toplam elektron içeriği doğru bir şekilde belirlenmelidir [Kahveci, 2001; Seeber, 2003;1].



Şekil 6.1 $1m^2$ kesitli alana sahip bir silindir boyunca TEC miktarı [Davies, 1965]

Şekil 6.1'de görüldüğü üzere, toplam elektron içeriği, iyonosferde $1\ m^2$ kesitlik alana sahip bir silindir boyunca toplam elektron miktarı olarak tanımlanır. Birimi $TECU$ ile ifade edilir.

$$TEC = \int_S^R N_e\, ds \tag{6.1a}$$

$$1TECU = 10^{16}\ el/m^2 \tag{6.1b}$$

Eşitlik (6.1a) da integral alıcı ile uydu arasında ki yol boyuncadır. Ne elektron yoğunluğunu göstermektedir.

TEC, alcıya göre zenit boyunca ki dik elektron içeriği (VTEC) ve uydu ile alıcı arasında ki toplam elektron içeri (STEC) olmak üzere ikiye ayrılır [Davies ve Hartmann, 1997; Kolb, Chen vd., 2005]

$$VTEC = \frac{1}{F} TEC \tag{6.2}$$

Burada

$$F = \frac{1}{\cos z'} \tag{6.3}$$

(6.3) eşitliğine eğrilik faktörü veya haritalandırma faktörü denir. Ayrıca z' yatay düzlem ile sinyal yolu arasındaki zenit açısıdır. Haritalandırma faktörü zenit yönünde ki sinyalin ilerlediği yol boyunca TEC değerini belirlemek için ve iyonosferik etkinin giderilmesi için yapılan modellerde kullanılır.

F haritalandırma faktörü tek tabaka modeline dayanır. Bu modelde iyonosfer yerden yaklaşık 50 km yükseklikte başlayıp 750 km de bittiği varsayılmış ve iyonosferin ortalama yüksekliği 400 km alınmıştır. İyonosfer 400 km kalınlığında olduğu kabul edilip, serbest elektronların bu küresel tabaka içinde homojen dağıldığı düşünülmüştür [Mannucci, 1998; Krankowski, Baran vd., 2002; Seeber, 2003].

$$z' = \arcsin\left(\frac{r_E}{r_E + h_i} \sin z'\right) \tag{6.4}$$

Burada r_E yerin yarıçapı, h_i iyonosferin yüksekliğidir. Ayrıca kullanılan sinus teoremi uydu ile alıcı arasındaki mesafe ile zenit mesafesi arasındaki ilişkiyi kurar. Buradan z' açısının artmasıyla, zenit yönünde ve sinyalin ilerleme yönündeki toplam elektron içeriğini veren F faktörü de artar.

TEC hesabı yapılırken GPS gözlemlerinden yararlanılır. GPS sinyallerinden yaralanılarak faz hesaplamaları yapılır. Yapılan faz kayması hesaplarından TEC değişimi elde edilir.

TEC değişimleri incelenerek iyonosferik düzensizlikler ve bu düzensizlikleri etkileyen faktörler incelenir [Mannuccci,1998].

6.1 İyonosferik Kırılma

Boş uzayda yayılan bir elektromanyetik dalganın faz ve gurup hızları birbirine eşit olup, ışık hızıyla ilerlerler. İyonosfer ise GPS sinyalleri için dağıtıcı (anizotropik) bir ortam olduğundan grup ve faz hızları birbirinden farklıdır. İyonosfer de ilerleyen bir elektromanyetik dalganın gurup ve faz hızı arasında ki ilişki denklem (6.5) ile verilmiştir[Seeber, 2003].

$$v_g = v_p - \lambda \frac{dv_p}{d\lambda} \tag{6.5}$$

Burada v_p faz hızını ve v_g gurup hızını verir. GPS sinyaline modüle edilen L_1 ve L_2 sinyalleri uzayda gurup hızı ile hareket ederler. Ayrıca faz hızı $v_p = \lambda f$ eşitliği ile verilir. Bu eşitliğin diferansiyeli alınır ve (6.5) denkleminde yerine yazılırsa, (6.6b) eşitliği elde edilir.

$$d\lambda / \lambda = - df / f \tag{6.6a}$$

$$v_g = v_p + f\left(dv_p / df\right) \tag{6.6b}$$

Benzer bir bağıntı da kırılma indisleri arasında da vardır.

$$v_g n_g = c \tag{6.7}$$

$$v_p n_p = c \tag{6.8}$$

İyonosferin kırılma indisi bu ortamda ilerleyen sinyalin gecikmesine neden olur. GPS sinyallerinde, gurup hızı, kod sinyalinin ve faz hızı, taşıyıcı faz sinyalinin yayılımını etkiler.

$$\frac{dv_p}{df} = -\frac{c}{n^2 f}\left(\frac{dn_p}{df}\right) \tag{6.9}$$

(6.9) eşitliği, (6.6) ifadesinde yerine yazılırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$v_g = v_p + f\left[-\frac{c}{n^2 f}\left(\frac{dn_p}{df}\right)\right] \tag{6.10}$$

Bu denkleme bakıldığında grup hızının, faz hızından büyük olduğu görülmektedir.

$$\frac{c}{n_g} = \frac{c}{n_p} - \left[\frac{fc}{n_p^2}\left(\frac{dn_p}{df}\right)\right] \tag{6.11}$$

$$\frac{c}{n_g} = \frac{1}{n_p^2}\left(cn_p - fc\frac{dn_p}{df}\right) \tag{6.12}$$

Veya

$$n_g = \frac{n_p^2}{n_p - f\,\frac{dn_p}{df}} \tag{6.13}$$

Burada $n_p - f\,\frac{dn_p}{df}$ ifadesi için

$$(1-x)^2 = 1 + x - x^2 ..... \qquad |x| < 1 \tag{6.14}$$

(6.14) ifadesindeki yaklaşım kullanılır fakat sadece birinci derece teriminin açılımına kadar olan değerler alınır. Diğer terimler, birinci terime göre küçük olacağından etkileri dikkate alınmaz. Bu yaklaşım yapılarak gurup kırılma indisi ile faz kırılma indisi arasında ki bağıntı aşağıda ki şekilde elde edilir [Seeber, 2003].

$$n_g = n_p + f\left(dn_p / df\right) \tag{6.15}$$

Faz kırılma indisi için de aşağıdaki ifade elde edilir.

$$n_p = 1 + a_1 / f^2 + a_2 / f^3 + a_3 / f^4 ..... + \tag{6.16}$$

$$\frac{dn_p}{df} = -\frac{2a_1}{f^3} - \frac{3a_2}{f^4} - \frac{4a_3}{f^5} ..... \tag{6.17}$$

(6.17) eşitliği, denklem (6.15) de yerine yazılır.

$$n_g = n_p - \frac{2a_1}{f^2} - \frac{3a_2}{f^3} - \frac{4a_3}{f^4} ..... \tag{6.18}$$

Yine (6.18) eşitliğinde, n_p değeri de yerine yazılır.

$$n_g = 1 - \frac{a_1}{f^2} - \frac{2a_2}{f^3} - \frac{3a_3}{f^4} \ldots\ldots \tag{6.19}$$

Burada n_g terimi birden büyüktür. Dolayısıyla denklemde $2a_1/f^2$ teriminden sonraki terimler önemsenmez. Ayrıca a_i katsayıları N_e elektron yoğunluğuna bağlıdır.

$$n_g = 1 - \frac{a_1}{f^2} \tag{6.20}$$

Bu denklemde a_1 katsayısını aşağıdaki şekilde belirlemek mümkündür.

$$n^2 = 1 - \frac{N_e^2}{\varepsilon_0 m w^2} \tag{6.21}$$

$$(1 \pm x)^{1/2} = 1 \pm \frac{1}{2}x \pm \frac{1}{4}x^2 \ldots\ldots \tag{6.22}$$

(6.21) eşitliğinde, (6.22) yaklaşımı kullanılarak birinci terime kadar açılımı alınırsa, (6.23) ifadesi elde edilir.

$$n = 1 - \frac{1}{2}\frac{N_e^2}{\varepsilon_0 m (2\pi f)^2} \tag{6.23}$$

$$a_1 = \frac{1}{2} Ne \frac{\left(1.610^{-19}\right)^2}{8.8510^{-12}\left(9.1110^{-31}\right)4\pi^2 f^2} \tag{6.24}$$

Eşitlik (6.24) den $a_1 = 40.3 N_e$ olarak bulunur. Bu değer eşitlik (6.20) yerine yazılırsa

$$n_g = 1 + \frac{40.3 N_e}{f^2} \tag{6.25}$$

ve faz kırılma indisi için

$$n_p = 1 - \frac{40.3 N_e}{f^2} \tag{6.26}$$

eşitlikleri bulunur.

İyonosferik etkinin gurup hızı ve faz hızı üzerindeki etkileri yaklaşık olarak aynıdır. Eşitlik (6.07) ve (6.08) de n_p ve n_g değerleri yerine yazılırsa, gurup ve faz hızları bulunmuş olur.

$$v_p = \frac{c}{1 - \frac{40.3 N_e}{f^2}} \tag{6.27}$$

ve

$$v_g = \frac{c}{1 + \frac{40.3 N_e}{f^2}} \tag{6.28}$$

Buradan iyonosferdeki geçikmenin sebep olduğu menzil hatası ΔS gurup ve faz hızlarıyla ilerleyen sinyaller için kırılma indisleri kullanılarak, eşitlik (6.29) ile belirlenebilir. Menzil hesabı için sinyalin kat ettiği yol boyunca integral alınır.

$$S = \int_S^R n ds \tag{6.29}$$

Burada R alıcının bulunduğu konumu ve S de uydunun bulunduğu konumu ifade eder. Eğer sinyalin kırılma indisinin bir olduğu ortamda ilerlediği düşünülürse, sinyal düz bir yol kat eder.

$$S_0 = \int_S^R ds_0 \tag{6.30}$$

Buradan, kırılma indisi bir olan ve birden farklı olan iki ortam arasında ki yol farkı (6.31) eşitliğiyle verilir.

$$\Delta S_{ION} = S - S_0 = \int_S^R nds - \int_S^R ds_0 \tag{6.31}$$

Faz gecikmesi için eşitlik (6.25), (6.26) ve (6.31) den yararlanılarak iyonosferdeki elektromanyetik dalganın faz gecikmesi ve gurup gecikmeleri bulunur.

Faz gecikmesi,

$$\Delta S_{ION,p} = \int_S^R \left(1 - \frac{40.3N_e}{f^2}\right) ds - \int_S^R ds_0 \tag{6.32}$$

Grup gecikmesi için

$$\Delta S_{ION,p} = \int_S^R \left(1 + \frac{40.3N_e}{f^2}\right) ds - \int_S^R ds_0 \tag{6.33}$$

(6.32) ve (6.33) daki ilk terim düz yol için alınan integral olduğundan ilk terimlerle üçüncü terimler birbirlerini götürür. Ayrıca eşitliklerdeki $\int_S^R N_e ds$ değeri TEC değerini verir. Bu durumda son eşitlikler (6.34) ve (6.35) de ki gibi olur.

$$\Delta S_{ION,p} = -\frac{40.3TEC}{f^2} \tag{6.34}$$

$$\Delta S_{ION,g} = \frac{40.3TEC}{f^2} \tag{6.35}$$

Burada faz üzerinde ve kod ölçümleri üzerinde ki eşitlikler farklı işaretlere sahip olsa bile yaklaşık aynı miktarda iyonosferik etkiye uğramış olurlar. Ayrıca burada ki TEC değeri zenit yönünde tanımlanan toplam elektron miktarıdır. Elde edilen bu gecikme miktarları, GPS sinyalleri kullanılarak (faz ve kod ölçümleriyle), yapılan konum belirleme esnasında, iyonosferik hata miktarı olarak elde edilen değerlere eklenir ve böylece doğru konum bilgisi elde edilir.

7. FARADAY DÖNMESİ

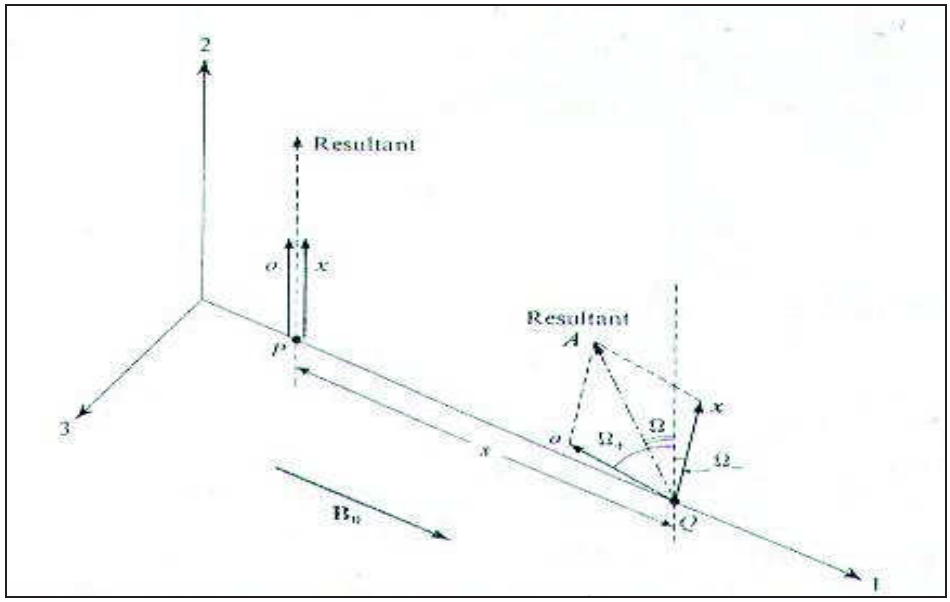
1845 yılında Faraday, manyetik alan uygulanan şekerli çözeltiye kutuplanmış bir ışık dalgası gönderdiğinde, manyetik alanın büyüklüğüne bağlı olarak dalganın kutuplanma doğrultusunun döndüğünü keşfetti. Kutuplanmış bir dalga, içinde iyonlaşmış gaz bulunan bir manyetik alan içinden geçtiğinde, dalganın kutuplanma doğrultusu manyetik alanın şiddeti ve serbest elektronların miktarıyla doğru orantılı olarak dönmeye başlar. Bu etki, en çok radyo dalgalarında belirgin olarak ölçülebilmektedir. Doğrusal kutuplanmış bir dalga, manyetik alan boyunca gönderildiğinde, bu dalganın kutuplanma doğrultusunun dönmesi olayına Faraday dönmesi adı verilmektedir [Davies, 1968; Rishbeth ve Garriot, 1969].

Faraday dönmesi olarak bilinen bu olaydan, iyonosfer araştırmalarında faydalanılmakta ve iyonosferik TEC hesapları yapılabilmektedir [Bassiri ve Hajj, 1992; Bassiri ve Hajj, 1993; Davies ve Hartmann, 1997; 1].

Faraday dönmesinin temel teorisi Davies tarafından aşağıdaki şekilde açıklanmaktadır. Şekil 7.1'de doğrusal kutuplanmış bir dalga gösterilmektedir. Her ikisi de aynı A_0 genliğine sahip iki vektör P noktasında birbirine paraleldir. Bu noktada bileşke genlik $2A_0$ büyüklüğündedir ve yönelimi pozitif y yönündedir. Q noktasında ise bu vektörler y ekseni ile $\mp \phi$ açısını yapmaktadır. Bu durumda bileşke genlik

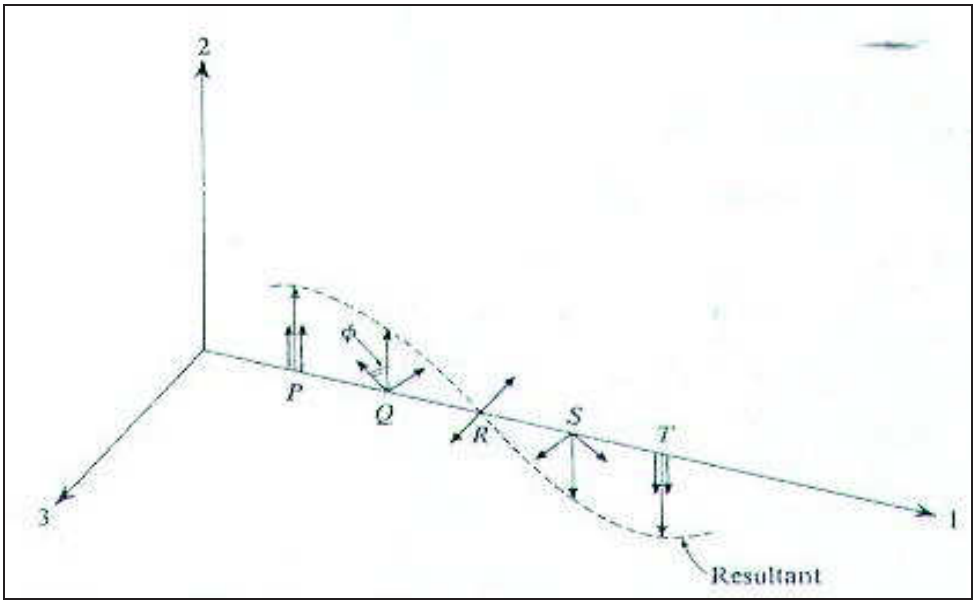
$$A = 2A_0 \cos \phi \tag{7.1}$$

olarak ifade edilmektedir ve yönelimi hala y ekseni boyuncadır. R noktasında ise bu vektörler birbirlerine zıt fazdadır ve bileşke genlik ise sıfırdır. Bir sinüs dalgası olan bileşke dalga x-y düzleminde kutuplanmaktadır. Kısaca doğrusal kutuplanmış bir radyo dalgası zıt yönlerde dönen iki dairesel polarize bileşen ile gösterilebilmektedir.



Şekil 7.1 Dogrusal kutuplanmış bir dalganın, aynı hız ile aynı yönde ilerleyen fakat birbirine zıt yönde dönen eşit genlikli iki dairesel polarize dalga ile temsili [Davies, 1968]

Elektromanyetik dalganın iyonize ortamda yayılmasından bilindiği gibi uygulanan bir manyetik alana paralel yönde ilerleyen doğrusal kutuplanmış bir radyo dalgası, iki dairesel polarize dalga bileşenine ayrılır. Ordiner (Sıradan) ve ekstra ordiner (sıra dışı) dalga olarak adlandırılan bu dalgalar birbirine zıt yönlerde dönerler. Bu dalga bileşenlerinin faz hızları farklı olduğundan, bileşke vektör Ω açısı kadar dönecektir (Şekil 7.2). Soğurma yoksa oluşan bu ordiner ve ekstra ordiner dalganın genlikleri birbirine eşit olur [Davies, 1968, Budden, 1985; 1].



Şekil 7.2 B_0 manyetik alanı yönünde ilerleyen doğrusal kutuplanmış radyo dalgasının, ordiner ve ekstra ordiner dalga vektörlerine ayrılarak ilerlemesi [Davies, 1968].

P noktasından Q noktasına gittiğinde, polarizasyon düzlemi Ω açısı kadar döner. Şekil 7.2'den de görüldüğü gibi Ω açısı,

$$\Omega = \frac{1}{2}\left(\Omega_{+} - \Omega_{-}\right) \tag{7.2}$$

4wq olarak ifade edilecektir. Ω_{+} ordiner dalga ve Ω_{-} ekstra ordiner dalga vektörünün titreşim düzlemi etrafında yaptığı dönmeden dolayı bileşke vektör ile aralarında ki dönme açılarıdır. Ordiner ve ekstra ordiner dalgaların bileşke genlik etrafındaki dönme açıları birbirine eşit olduğundan, dönme açıları arasındaki bağıntı eşitlik (7.3) deki gibi olur.

$$\Omega_{+} - \Omega = \Omega_{-} - \Omega \tag{7.3}$$

Bir λ dalga boyu mesafesinde bileşke vektörün dönmesi 2π dir. Bu nedenle radyan cinsinden bileşke vektör dönmesinin birim uzunluğu $\frac{2\pi}{\lambda}$ ifadesi ile verilir. Dolayısıyla

$$\Omega_{+} = \frac{2\pi}{\lambda_{+}} s \tag{7.4a}$$

$$\Omega_{-} = \frac{2\pi}{\lambda_{-}} s \tag{7.4b}$$

olarak ifade edilir. (7.4a) ve (7.4b) denklemlerinde λ_{+} ordiner ve λ_{-} ekstra ordiner dalganın dalga boyudur. s ise P noktasından Q noktasına kadar dalganın kat ettiği mesafedir. Bu bilgilerden faydalanarak

$$\Omega = \pi s \left(\frac{1}{\lambda_{+}} - \frac{1}{\lambda_{-}} \right) \tag{7.5}$$

denklemi elde edilir. Ayrıca bu bağıntı, μ_{+} ordiner ve μ_{-} ekstra ordiner dalgaların kırılma indisi ve λ_0 boş uzayda ki dalga boyuna bağlı olarak yazılabilir.

$$\Omega = \frac{\pi s}{\lambda_0} (\mu_{+} - \mu_{-}) \tag{7.6}$$

Manyetoiyonik teoriden, çarpışmalar ihmal edildiği durumda kırılma indisi, (7.7) bağıntısı ile verilir.

$$\mu^2 = 1 - \frac{2X(1-X)}{2(1-X) - Y_T^2 \pm \sqrt{Y_T^4 + 4(1-X)^2 Y_L^2}} \tag{7.7}$$

Bu denklemde; $X = (\frac{w_N}{w})^2$, $\vec{Y} = (\frac{q}{mw})\vec{B}_0$, $Y_L = Y\cos\theta$, $Y_T = Y\sin\theta$, $Z = \frac{\nu}{w}$, q elektronun yükü, m elektronun kütlesi, θ dış manyetik alan B_0 ile yayılma doğrultusu arasındaki açı, ν elektron ile diğer parçacıklar arasındaki çarpışma frekansı, w_N ortamın açısal plazma

frekansı olarak ifade edilir. (7.7) denklemi, μ 'nün + ve – değerleri için yazıp farkı alınırsa, (7.8) denklemi elde edilir.

$$\mu_+^2 - \mu_-^2 = 1 - \frac{2X(1-X)}{2(1-X) - Y_T^2 + \sqrt{Y_T^4 + 4(1-X)^2 Y_L^2}} - (1 - \frac{2X(1-X)}{2(1-X) - Y_T^2 - \sqrt{Y_T^4 + 4(1-X)^2 Y_L^2}})$$

$$\mu_+^2 - \mu_-^2 = \frac{X\sqrt{Y_T^4 + 4(1-X)^2 Y_L^2}}{(1-X)(1-Y_L^2) - Y_T^2} \tag{7.8}$$

Plazma frekansından çok büyük frekans değerlerinde (örneğin $100\ MHz$), ordiner ve ekstra ordiner dalgaların kırılma indisleri (μ_+ ve μ_-) birbirine çok yakın olduğundan, bu durumda $\mu_+ + \mu_-$ ifadesi, $\mu_+ + \mu_- = 2$ değerine çok yakın olur. Bu yaklaşımdan faydalanarak

$$\begin{aligned} \mu_+^2 - \mu_-^2 &= (\mu_+ + \mu_-)(\mu_+ - \mu_-) \\ &\approx 2(\mu_+ - \mu_-) \end{aligned} \tag{7.9}$$

$$\mu_+ - \mu_- \approx \frac{1}{2}(\mu_+^2 - \mu_-^2)$$

olarak hesaplanır. (7.9) denklemin sağ tarafı, (7.8) denkleminde yerine yazılır.

$$(\mu_+ - \mu_-) \approx \frac{1}{2}\,\frac{X\sqrt{Y_T^4 + 4(1-X)^2 Y_L^2}}{(1-X)(1-Y_L^2) - Y_T^2} \tag{7.10}$$

Bu son denklemde $Y_T \to 0$ olduğu durumda (Quasilongitudinal yayılım), (7.12) eşitliği elde edilir.

$$\mu_+ - \mu_- \approx \frac{1}{2}\,\frac{X\sqrt{4(1-X)^2 Y_L^2}}{(1-X)(1-Y_L^2)} \tag{7.11}$$

$$\mu_+ - \mu_- \approx \frac{XY_L}{\left(1 - Y_L^2\right)} \tag{7.12}$$

Bu eşitlik, (7.6) denkleminde yerine yazılırsa, (7.13) ifadesi elde edilir.

$$\Omega \approx \frac{\pi s}{\lambda_0}\left(\frac{XY_L}{1 - Y_L^2}\right) \tag{7.13}$$

Bu denklemde $w_N^2 = \frac{N_e^2}{\varepsilon_0 m}$, $Y = \frac{w_H}{w}$ ve w_H elektronun siklotron frekansı olup, $w_H = [(\frac{q}{m})B_0]$ olarak ifade edilmektedir. Faraday dönmesi hesaplanırken dış manyetik alan yayılma doğrultusuna paralel olarak alınır. Bu durumda $\theta = 0$ olur ve $\cos 0 = 1$ değerini alır. Bu nedenle de $Y_L = Y$ olur. Bu ifadeler (7.13) denkleminde yerine yazılırsa, (7.16) denklemi elde edilir.

$$\Omega \approx \frac{\pi s}{\lambda_0}\left(\frac{\omega_N}{\omega}\right)^2 \frac{Y_L}{1 - Y_L^2} \tag{7.14}$$

$$\Omega \approx \frac{\pi s}{\lambda_0 f}\frac{f_N^2}{f}\frac{f_L}{f\left(1 - \frac{f_L^2}{f^2}\right)} \tag{7.15}$$

$$\Omega \approx \frac{\pi s}{c}\frac{f_N^2 f_L}{\left(f^2 - f_L^2\right)} \tag{7.16}$$

Burada dalga frekansı, siklotron frekansından ($f >> f_L$) çok büyüktür. Bu durumda f_L ihmal edilir ve (7.16) denklemi, (7.17) denklemine dönüşür.

$$\Omega \approx \frac{\pi s}{c}\frac{f^2{}_N f_L}{f^2} \tag{7.17}$$

Kutuplanma düzleminin dönmesi, dalganın aldığı s yol uzunluğu, elektron yoğunluğu ($\propto f_N^2$) , f_L ile doğru orantılı ve dalga frekansının karesi ile ters orantılıdır.

Ω İfadesinin çıkarılışında elektron yoğunluğu ve $\vec{B}_0$ manyetik alan vektörü yol boyunca sabit kabul edildi. Eğer bu parametrelerin yol boyunca değişken olduğu düşünülürse bu durumda Ω eşitliğinin yol üzerinden integrali alınmalıdır.

$$\Omega = \frac{\pi}{cf^2}\int_s f_N^2 f_H \, Cos\ \theta \, ds \tag{7.18}$$

$$\Omega = \frac{\pi}{cf^2}\int_s \left(\frac{w_N}{2\pi}\right)^2 \frac{|q|}{m}\frac{B_0}{2\pi} Cos\ \theta \, ds \tag{7.19}$$

$$\Omega = \frac{\pi}{cf^2}\frac{q^3}{\varepsilon_0 m^2 8\pi^3}\int_s NB_0 Cos\ \theta ds \tag{7.20}$$

$$\Omega = 2{,}365 .10^4 f^{-2}\int_s NB_0 Cos\ \theta ds \tag{7.21}$$

Ayrıca, Faraday dönmesinin çıkarılışında faz hızı sabit kabul edilmiştir. Oysa iyonosfer anizotropik bir ortam olduğundan, iyonosfere gelen elektromanyetik dalganın faz hızı değişmektedir. Bu durumda dalganın ilerleği yol boyunca bir faz değişimi ortaya çıkar. Ordiner ve ekstra ordiner dalgaların fazındaki değişim $\Delta\phi$ aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\Delta\phi = 2\pi s\left(\frac{1}{\lambda_+} - \frac{1}{\lambda_-}\right) = \frac{2\pi s}{\lambda_0}(\mu_+ - \mu_-) \tag{7.22}$$

Böylece bileşke vektörün dönmesi,

$$\Omega = \frac{1}{2}\Delta\phi = \frac{\pi s}{\lambda_0}(\mu_+ - \mu_-) \tag{7.23}$$

(7.6) denklemindeki aynı ifade elde edilir.

7.1 Faraday Dönmesinden Yararlanarak İyonosferdeki Elektron İçeriğini Bulma

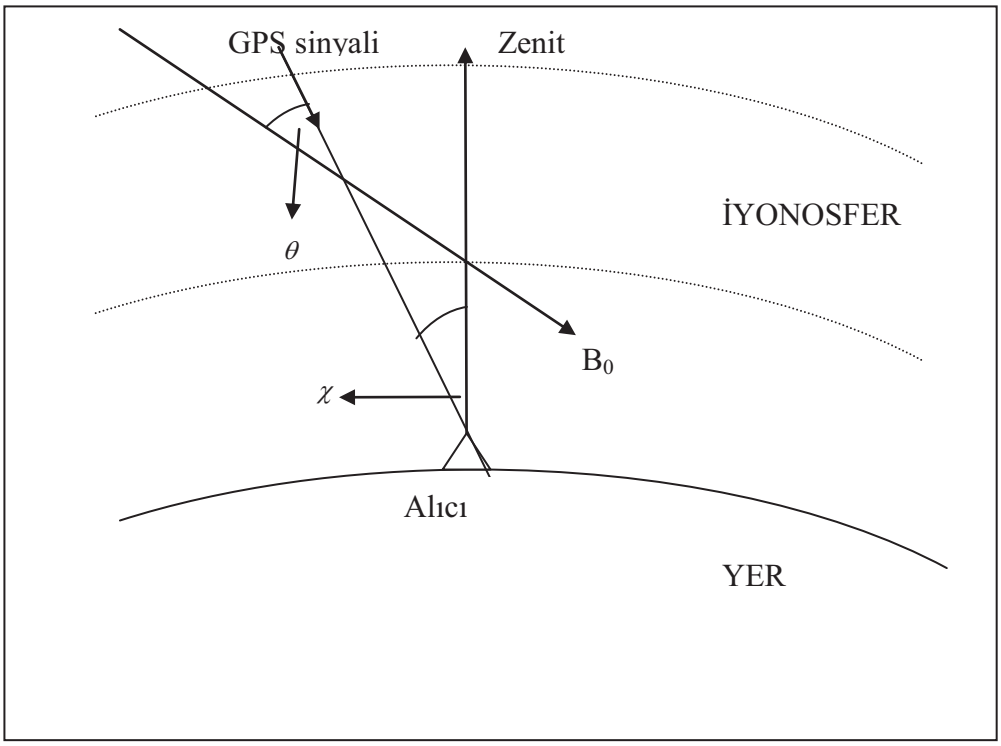
Düşeyle küçük bir χ açısı yapan bir radyo ışını Şekil 7.3 de gösterilmektedir. Yeteri kadar yüksek frekanslarda ki, ordiner ve ekstra ordiner dalgalar, çok az kırılmaya uğrayacağından, kat edecekleri yol yaklaşık aynıdır. Daha başka bir ifadeyle, kat ettikleri yol lineerdir denilir [Davies, 1968]. Böyle bir ışının zenitle χ açısı yaparak, iyonosfere geldiği ve manyetik alanın yükseklikten bağımsız olarak θ açısı yaptığı farz edilir. Bu durumda (7.21) denkleminde ds ifadesi yerine $ds = dh \sec\chi$ değeri yazılır. Ω dönmesi

$$\Omega = \frac{2.365 \times 10^4}{f^2}\int NB_0 \cos\theta \sec\chi \, dh \tag{7.24}$$

veya

$$\Omega \approx 2.365 \times 10^4 f^{-2} \overline{B_o \cos\theta \sec\chi} \int N\, dh \tag{7.25}$$

şeklinde ifade edilmektedir [Davies., 1968].



Şekil 7.3 Çok yüksek frekanslı bir radyo ışınının geometrisi [Davies,1968].

Burada $\overline{B_0 \cos\theta \sec\chi}$ değeri verilen manyetik alan için hesaplanabilen ortalama bir değeridir. Yukarıdaki (7.25) denkleminden doğrudan elektron yoğunluğu bulunamayabilir. Bu belirsizliğin giderilmesi için komşu iki frekans için f ve $f + \delta f$ üzerinden bağıl iki dönme ölçümü Ω ve $\Omega + \delta\Omega$ yapılır. Bunun içinde eşitlik (7.25) un diferansiyeli alınır.

$$\delta\Omega = -4.73\, f^3 \delta f \overline{B_0 \cos\theta \sec\chi} \int N\, dh \qquad (7.26)$$

Bu metot dönmenin birden fazla olduğu zamanlar için belirsizliği gidermek amacıyla kullanılır. Ayrıca bu teknik iyonosferin yaklaşık 1000 km den daha düşük yüksekliklerde ki toplam elektron yoğunluğunun ölçülmesinde kullanılmaktadır.

Burada ki dezavantaj ise elektron içeriğindeki küçük değişmeleri belirlemek için yüksek frekansların kullanılmasıdır. Bu frekanslar yaklaşık 20 MHz ve 40 MHz civarındadır. Güneş lekelerinin çok olduğu zamanlarda F2 tabakasının kritik frekansı 20 MHz olur. Çünkü burada

yüksek frekanslar için elektromanyetik dalganın kat ettiği yol, lineer olarak düşünülmekte ve manyetik alan ile θ açısının, başka bir deyişle $\overline{B_0 \cos\theta \sec\chi}$ ifadesinin yükseklikten bağımsız olduğu varsayılmaktadır. Dolayısıyla (7.26) eşitliği burada geçersiz olur. Bu belirtilen sorunun giderilmesinin diğer bir yolu da dispersive doppler ölçümleriyle yani frekans kayması ölçümleriyle Faraday dönmesinin birleştirilmesidir çünkü uydudan gönderilen sinyalin kaymasının nedeni sinyalin aldığı yol boyunca elektron içeriğinde ki değişmedir. Dolayısıyla burada toplam elektron içeriği (TEC) hesaplanmalıdır bunun içinde (7.27) denkleminde olduğu gibi doppler kayması Δf_m kullanılmalıdır.

$$\Delta f_m = \frac{v}{\lambda} = \frac{v\mu f}{c} \tag{7.27}$$

Buradan toplam frekans değişimi, (7.28) eşitliği ile verilir.

$$\Delta f = -\frac{v\mu f}{c} - \frac{f}{c}\int_s \frac{\partial \mu}{\partial t} ds \tag{7.28}$$

Bu işlem f frekansının katı olan nf frekansı (harmonik frekanslar) için de yapılıp Δf_n frekans kayması bulunur. Frekans kayması işlemi birden çok farklı frekanslarla yapılabilir. Böyle bir eşitlik (7.29) da verilmiştir.

$$n\Delta f - \Delta f_n \approx \frac{k}{2 f^2}\left(\frac{1}{n} - n\right)\frac{\partial}{\partial t}\int_s N\, ds \tag{7.29}$$

Yukarıdaki denklemde frekanslar birbirine çok yakın ve birbiriyle ilişkilidir.

$$\frac{d\Omega}{dt} = 2.365 \times 10^4 f^{-2}\left(\overline{B_L}\frac{d}{dt}\int_s Nds + \int_s Nds \frac{d}{dt}\overline{B_L}\right) \tag{7.30a}$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = 2.365 \times 10^{4} f^{-2} \int N\, ds \frac{d\overline{B_L}}{dt} \qquad (7.30b)$$

(7.30a) denkleminde $\overline{B_L}$, $B_0 \cos\theta$ değerinin ağırlıklı ortalamasıdır, ayrıca ani dispersive doppler etkisinden dolayı $(d/dt)\int_s N\, ds$ değeri sıfırdır.

Faraday dönmesi ile birlikte dispersive doppler kullanımı, iyonosferdeki elektron yoğunluk dağılımı hakkında bilgi verir. Bu ölçümler, F2 tabakasının maksimum elektron yoğunluk yüksekliğinin üstünde de elektron yoğunluğu profili hakkında bilgi vermektedir.

Dispersive doppler kullanımı ile elde edilen sonuçlarla, orta enlemde, gün içinde ki maksimum elektron yoğunluğunun gecenin minimum elektron yoğunluğundan altıda sekiz oranında büyük olduğu tespit edildi. Ayrıca orta enlemlerde, kışın öğlen vakitlerindeki elektron içeriği yazdan daha büyük olduğu ve manyetik düzensizlikler durumunda elektron yoğunluğunun azaldığı görülmüştür [Davies,1965, Davies, 1968].

8. İYONOSFER MODELLERİ

İyonosferin elektron yoğunluğu ve TEC değişimi incelemeleri, iyonosferik modeller yardımıyla yapılır. İyonosferik modeller, teorik ve ampirik olmak üzere ikiye ayrılır. Ampirik modeller bilgisayar programı yardımıyla yapılan modellerdir. Bunların en çok bilinenleri, IRI, Bernese, Gamit-Globk ve JPL bilgisayar programlarıdır [Kahveci, 2002]. Aslında birçok ampirik model bölgesel teorik iyonosfer modelleriyle birleştirilerek oluşturulmuştur. Buna örnek olarak, PIM (Parametrized Ionospheric Model) model verilebilir. PIM model iyonosferin elektron yoğunluğu profilini kritik frekansa bağlı olarak verir. PIM model elektron yoğunluğu hesabında katsayı veri tabanına sahiptir ve bu profillerin yeniden yapılandırılmasında kendine has algoritması vardır [Bassiri ve Hajj;1992, Davies; 1968; 1; 5].

Teorik modeller ise Faim (Fully Analytical Ionospheric Model), Slim model, Chui model, Bent model, Empirical, İyonosferik Standart Plazma ve Penn State Mk III modeli olarak sayılabilir. Faim model, Chui ve Slim model sabitlerinin uyumlu bir şekilde kullanılmasıyla elde edilen teorik bir modeldir. Slim (The Semi-Empirical Low-Latitude Ionospheric Model) model de, alçak enlemlerde ki iyonosferin teorik similasyonuna dayanır. Ayrıca, elektron yoğunluğu profili 180 km'den 1800 km'ye kadar, farklı enlemler için belirlenmiştir. Modified Chapman fonksiyonları ile birlikte kullanılan bir modeldir [4]. F. Arıkan ve grubu tarafından geliştirilen ionolab tekniği ile yüksek çözünürlüklü Toplam Elektron İçeriği Kestirimi yapılabilmektedir. Düzgünleştirilmiş Toplam Elektron İçeriği Kestirimi yöntemi ile alıcı ve uydu yanlılıkları uygun biçimde kullanılarak IGS analiz merkezlerinde elde edilen sonuçlarla uyumlu kestirimler yapılabilmektedir [Nayır vd;2007].

Bent model ise, D, E, F_1 tabakalarını modelleyemez. Ancak iyonosferin F_2 tabakası ve üzerinin elektron profili için kullanılır. Bu bölgeyi boylam, zaman, mevsim ve solar radyasyon akımına bağlı olarak parabolik bir şekilde modeller [1,4].

Empirical model, yer alıcıları ve uydulardan çeşitli tekniklerle elde edilen dataların aylık ortalamaları alınarak iyonosferin modellenmesidir.

İyonosferik standart plazma model ise iyonosferin elektron yoğunluğunu, elektron sıcaklığı ve elektron hız pametrelerini içerir. Bu parametreler yer ve uzaydan elde edilen deneysel verilere dayanır.

Chiu model iyonosferi, elektron yoğunluğu yerel saat ve güneş lekesi sayısına bağlı olarak modeller. İyonosferin modellenmesi, elli adet istasyondan, ionosonda tekniğini kullanarak elde edilen datalarla yapılır. Bu modelin çıkış noktası FAIM modeldir. Ayrıca E, F_1 ve F_2 tabakaları için Modified Chapman fonksiyonları kullanılmıştır [4]. Penn State Mk III modeli, iyonosferin F tabakasını Emprical model ve teorik hesaplamalar kullanılarak modeller.

Bu modellerin dışında F_2 tabaksının pik yüksekliği, elektron sıcaklığı, iyon kompozisyonu ile ilgili modellerde vardır [4].

URSI ve COSPAR tarafından geliştirilen IRI, İyonosferin sıcaklık ve yoğunluğunun belirlenmesinde uluslar arası standartlara sahip olan bir programdır. IRI, yerden ve uzaydan alınan dataların aylık ortalaması alınarak geliştirilen 50 km'den 1000km'ye kadar olan yüksekliklerde elektron yoğunluğu, elektron sıcaklığı, iyon sıcaklığı ve iyon kompozisyonunun elde edileceği bir programdır[Gümrükçü ve Can; 2008,1,4].

8.1 IRI programı ile Elektron Yoğunluğunun ve TEC Değişiminin Hesabı

Bu bölümde, International Reference Iononosphere (IRI) modeli kullanılarak elektron yoğunluğun yükseklikle değişimi ve TEC hesabı yapılmıştır. IRI programı COSPAR ve URSI tarafından geliştirilmiş, elektron yoğunluğu ve sıcaklığı hesaplaması üzerine kurulmuş bir programdır [Bilitza, 2000; Bilitza ve Reinisch,2007].

IRI programın temeli altı farklı parametreye dayanır. Bu parametreler, elektron yoğunluğu, elektron sıcaklığı, iyon İçeriği $\left(O^+, H^+, NO^+, O_2^+, N^+\right)$, iyon sıcaklığı, iyon sürüklenmesi ve toplam elektron içeriğidir [Bilitza, 1990].

IRI programında, bu altı parametrenin bulunması için temelde Empirical model kullanılmıştır. Bu programda, İyonosferin E ve F tabakası modellenirken farklı tekniklerden elde edilen datalar kullanılarak, standart plazma modeliyle modellenmiştir. Örneğin, F tabakası için İncoherent Scatter, Topside Sounder, Beacon Satellite ve ionosonda dataları kullanılmıştır. E tabakası için bu teknikler dışında GPS ve radar tekniği kullanılarak, elde edilen datalar istasyonların konumlarına göre değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmelerde F tabakasının maksimum elektron yoğunluğu yüksekliği ile E tabakasının maksimum elektron yoğunluğu yüksekliği normalize edilerek birleştirilir.

İyonosferin F_2 tabakası ve daha yükseklerinde IRI programından elde edilen veriler gerçekle uyuşmazlık gösterdiğinden dolayı bu yüksekliklerde Bent model kullanılmaktadır.

D tabakası modellenmesinde ise sadece roket dataları kullanılır. Bu tabakadaki dataların azlığı, D tabakasının uydular için düşük yükseklikte, ionosonda ve roket gibi teknikler için ise elektron yoğunluğunun az olmasından kaynaklanır. Bu yüzden iyonosferin bu bölgesi ve üstü için Chapman tabaka modeli kullanılmaktadır.

IRI modeli orta enlemlerde çok fazla istasyon olduğundan ve bu istasyonlardan alınan datalar fazlalığı nedeniyle oldukça doğru sonuçlar verir. Bu tekniklerden en önemlisi ionosonda tekniğidir. İonosonda dataların matematiksel modeller yardımıyla aylık ortalamaları alınır. Ayrıca IRI programında, düşük enlemler için geodedik koordinat sistemi, yüksek enlemlerde ise manyetik koordinat sistemi kullanılmaktadır.

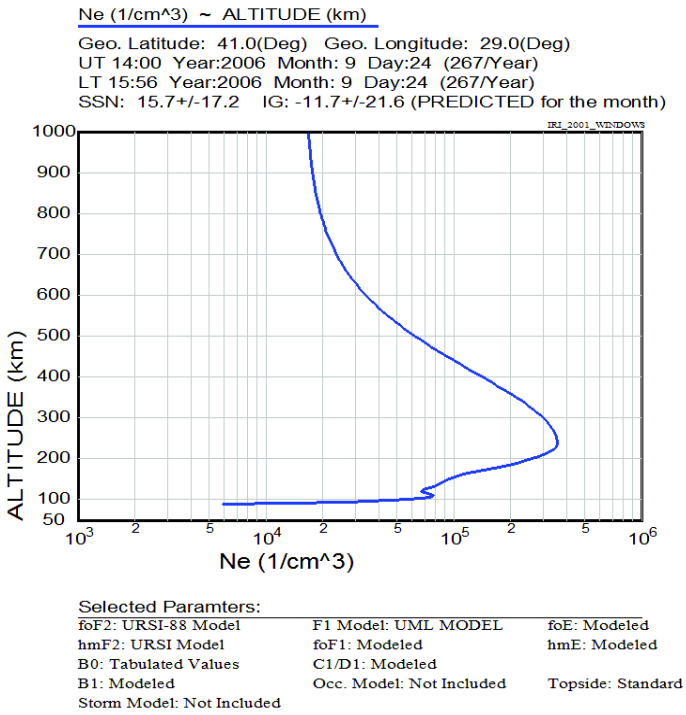
Türkiye'de bir orta enlem ülkesi olduğundan, elektron yoğunluğunun yükseklikle değişimi ve TEC hesabı için IRI programının kullanımı tercih edilmiştir.

Güneş lekesi hesabı için de yine aylık ortalama değerleri kullanılmıştır. Güneş lekelerinin aylık ortalama sabitleri, URSI tarafından küresel (Lengendre) fonksiyonu kullanılarak, CCIR tarafından da Fourier analizi yapılarak belirlenmektedir.

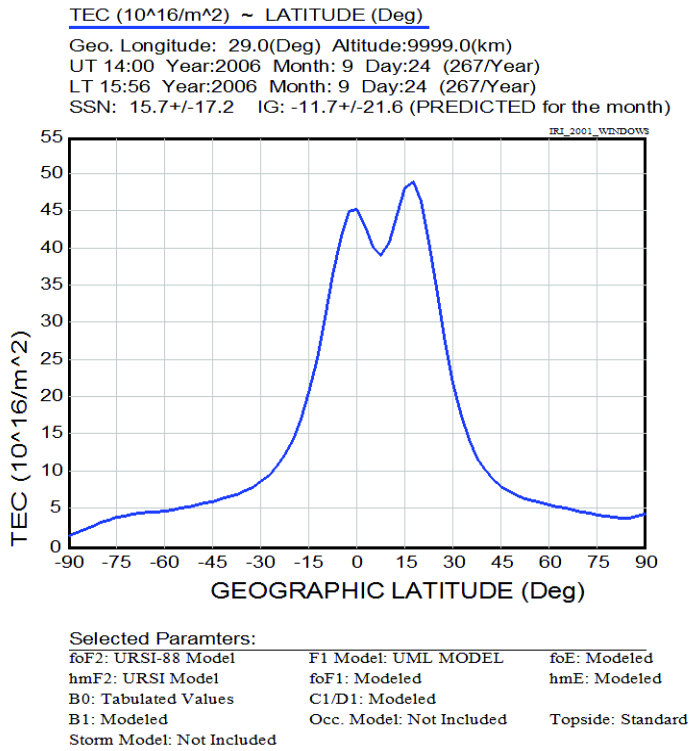
IRI programının tek dezavantajı, enlem, boylam (konum bilgisi) gibi değerlerin kullanıcı tarafından girilmesidir.

Şekil 8.1, 8.2, 8.3 ve 8.4 de, $24.09.2006$ tarihinde sakin gün için İstanbul'un koordinatları kullanılarak yerel saat 14.00 de elektron yoğunluğu (N_e) ve TEC değişim grafikleri gözlenen ve tahmin edilen datalar kullanılarak elde edilmiştir.

IRI programı ile elde edilen bu grafiğin Chapman tabaka modeliyle uyumlu olarak elektron yoğunluğunun yükseklikle eksponansiyel olarak artığı görüldü.



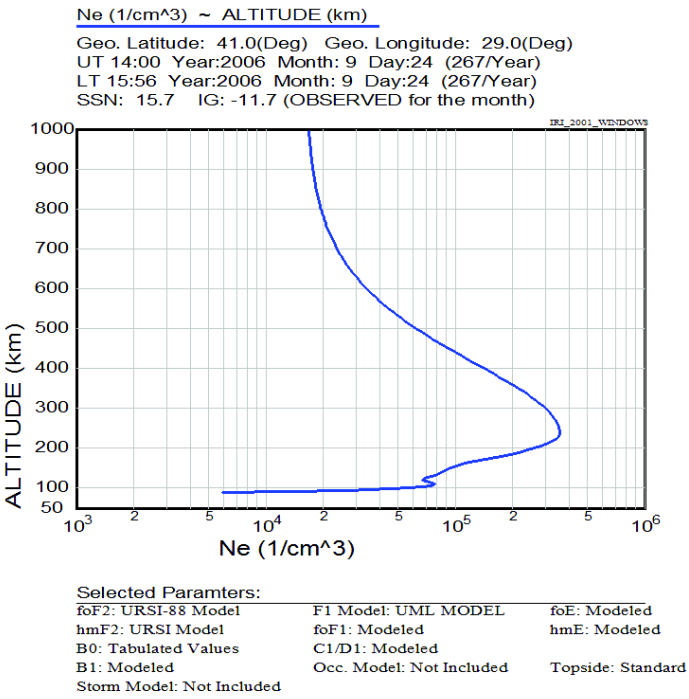
Şekil 8.1 Tahmini veriler kullanılarak 24.09.2006 tarihi için elde edilen N_e grafiği



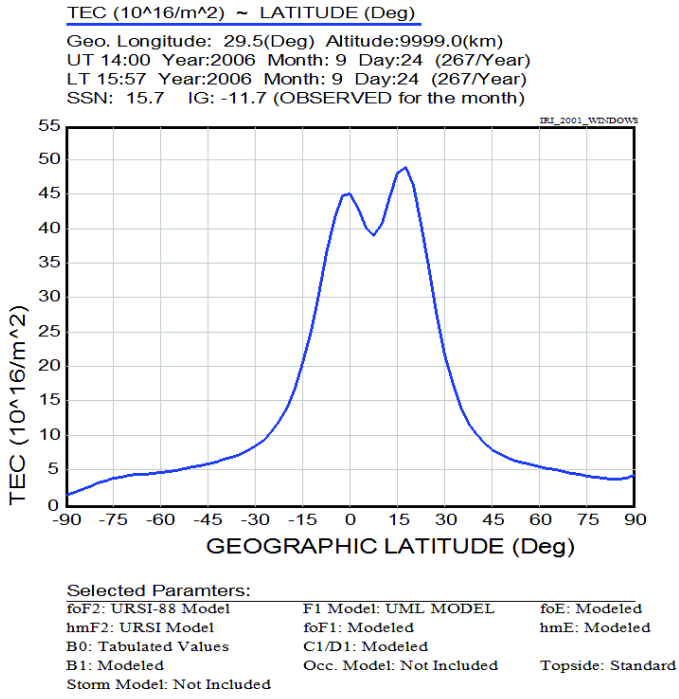
Şekil 8.2 Tahmini veriler kullanılarak 24.09.2006 tarihinde için edilen TEC grafiği

Şekil 8.1 ve 8.2 deki datalar tahmini değerlere dayalı elde edilmiştir. Şekil 8.1 de İstanbul için yapılan elektron yoğunluğunun yükseklikle birlikle değişiminden elde edilen grafiğe göre yaklaşık 250 km yükseklikte maksimum elektron yoğunluğu olan $4.10^{5}\ N_e/cm^3$ bulunur.

Şekil 8.2 de ise ∓ 90 enlemleri için TEC değeri hesabı yapılmıştır. 24.09.2006 tarihinde bu enlemler arasında iki pik değere ulaştığı görüldü. 0 ve 5 derece enlemlerin sırasıyla $45.10^{16}/m^2$ ve yaklaşık $48.10^{16}/m^2$ değerlerini aldığı görülmektedir.



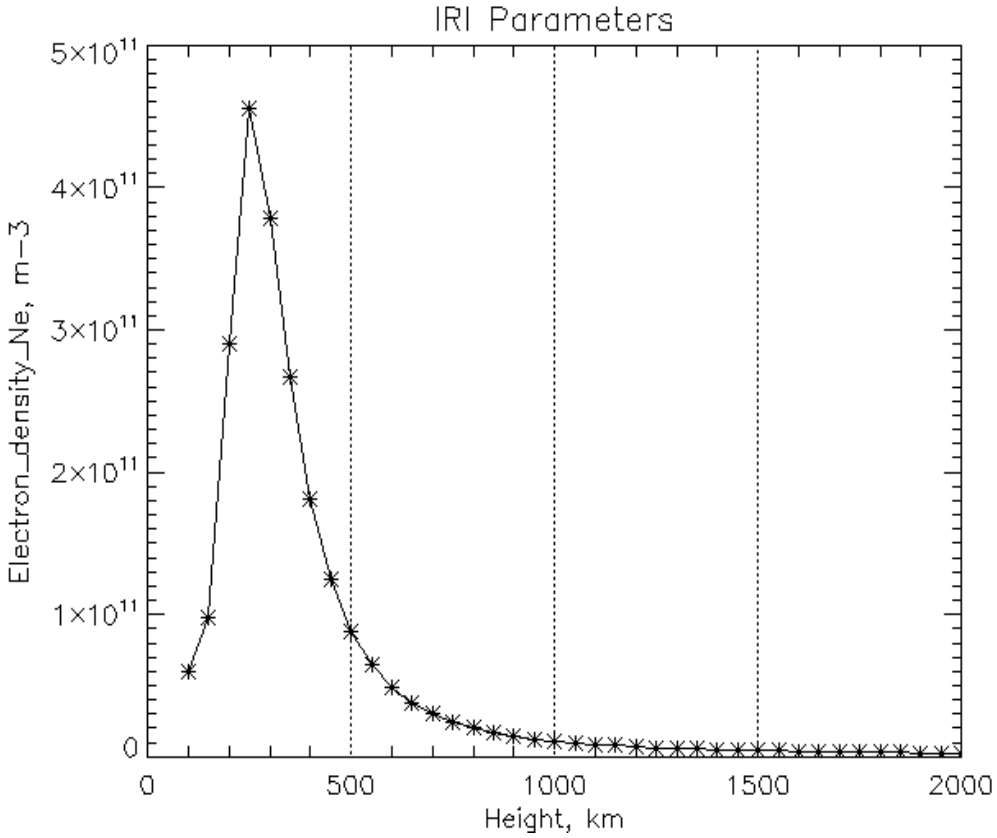
Şekil 8.3 Gözlem verileri kullanılarak 24.09.2006 tarihi için elde edilen N_e grafiği



Şekil 8.4 Gözlem verileri kullanılarak 24.09.2006 tarihi için elde edilen TEC grafiği

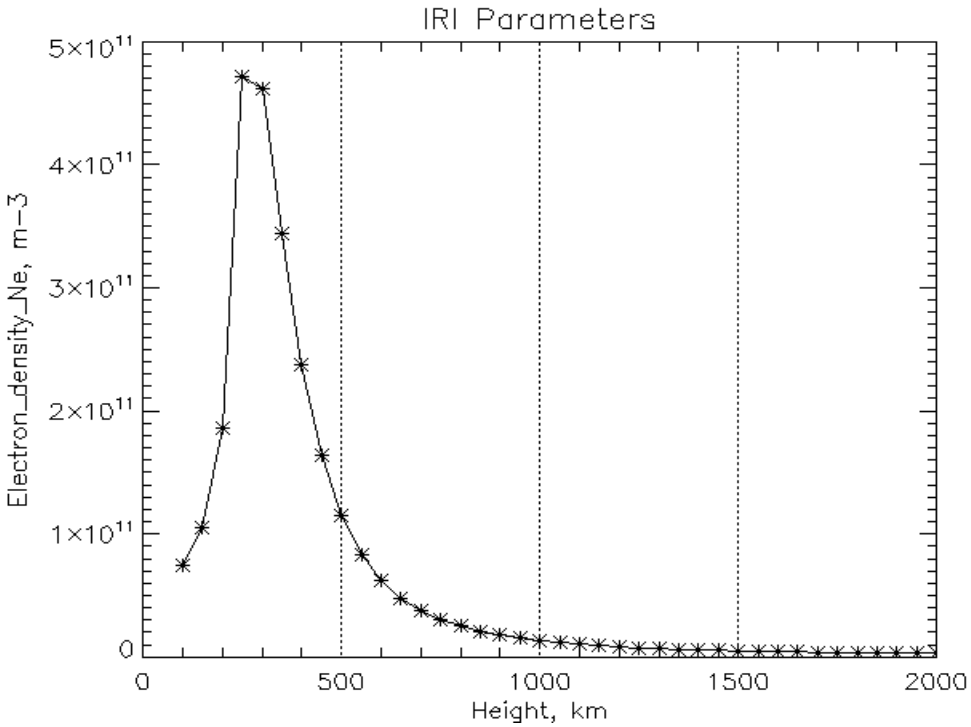
Şekil 8.3 ve 8.4 de ise gözlem datalarından elde edilen elektron yoğunluğunun yükseklikle değişimi ve TEC in enleme göre değişimleri verilmiştir. Bu grafikler IRI-2000 programı kullanılarak elde edilmiştir. Gözlem ve tahmin parametrelerden elde edilen grafiklerin değerlerinin birbiriyle çok benzer olduğu görülmüştür.

IRI programı çeşitli teknikler kullanılarak farklı istasyonlardan elde edilen datalarla birkaç yılda bir güncellenmektedir. Bu amaçla IRI-2007 programı oluşturulmuştur. Şekil 8.5 de IRI-2007 ile elde edilen elektron yoğunluğunun yükseklikle değişimi verilmektedir. Bu grafikte elektron yoğunluğunun maksimum değeri yaklaşık $4.710^{11} N_e / m^3$ olarak, yine yaklaşık 250km yükseklikte bulunmuştur. Bu değerlerin, Şekil 8.1 ve 8.3 de bulunan elektron yoğunluğunun yükseklikle değişimi grafiklerinde bulunan değerlerle uyum içinde olduğu görülmektedir. Yine bu tarihin seçilme nedeni Güneş lekesinin minimuma yakın olması ve CORS-Tr projesi kapsamında kaydedilen Marmara Bölgesinde ki GPS kayıtlarımızın olmasından dolayıdır.



Şekil 8.5 14.09.2006 tarihinde elde edilen yüksekliğe bağlı N_e değerinin değişimi

Şekil 8.6 da elde edilen elektron yoğunluğunun yükseklik ile değişimi grafiği, İstanbul için 14.09.2002 tarihi için saat 14.00 deki değeridir. Bu tarihin seçilme nedeni güneş lekelerinin maksimum değer aldığı en son tarih olmasından dolayıdır. Bu grafikte elde edilen elektron yoğunluğunun yükseklikle değişiminde iki pik değer aldığı görülür. Bu da bu tarihte güneş aktivitesinin yoğun ve buna bağlı olarak iyonosferdeki elektron yoğunluğunun fazla olmasından kaynaklanır. Şekil 8.6 da 200-300 km yükseklikler de iki pik değer görülür. Bu değerler yaklaşık olarak $4.9 10^{11} N_e / m^3$ ve $4.7 10^{11} N_e / m^3$ bulunur.



Şekil 8.6 14.09.2002 tarihinde elde edilen yüksekliğe bağlı N_e değerinin değişimi

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Dünyamızın çevresinde bulunan GPS uydularından yayınlanan sinyaller, uzay boşluğunu geçtikten sonra, dünya atmosferinde önce iyonosferden daha sonra da troposferden geçerek yer yüzeyinde konumlanmış olan GPS alıcılarına ulaşmaktadır. Yer atmosferini geçerek GPS alıcılarına ulaşan bu sinyaller, iyonosferin değişken yapısından oldukça fazla etkilenmektedir. Bu değişiklikte güneşin çok önemli etkisi vardır. Günün saatlerine bağlı olarak, güneşteki patlamaların da etkisi ile sürekli olarak değişen iyonosfer, gece veya gündüz oluşuna, mevsimlere, enlem ve boylamlara bağlı olarak sürekli değişen bir elektron yoğunluğuna sahiptir. Güneşte meydana gelen geomanyetik fırtınalar ve fırtınalar sonrası güneşten saçılan güneş malzemelerinin atımına bağlı olarak da sinyal farklı gecikmelerle yer yüzeyine ulaşabilmektedir. Uydu alıcı uzaklıklarının hesaplanmasında ve doğru konum belirlemede de önemli hata kaynağına neden olan iyonosferin doğru bir şekilde modellenmesi gerekmektedir. Bu amaçla tez çalışmamızda iyonosferik etkileri doğru bir şekilde tayin edebilmek için sinyalin ilerlediği iyonosfer ortamını ve bu ortamda emd yayılımını ayrıntılı bir şekilde inceledik. İyonosferik etki, sinyalin ilerlediği yol üzerindeki alanda bulunan serbest elektronların sayısına bağlı olduğundan TEC hesabını ayrıntılı bir şekilde anlattık. Değişik iyonosfer modellerini ve iyonosfer elektron yoğunluğu hesaplama tekniklerini inceleyerek IRI 2000 ve IRI 2007 programlarını kullanarak, yüksekliğe bağlı olarak elektron yoğunluğu değişimini ve TEC değerlerini, gözlem datalarına ve tahmini değerlere bağlı olarak tayin ettik. Bu hesaplamalarımızda güneşin aktif ve sakin olduğu farklı gün değerlerini dikkate aldık.

Sonuç olarak da elektron yoğunluğunun ve TEC değişim değerlerinin güneşte oluşan olaylara bağlı olarak farklılıklar gösterdiğini belirledik. Bu tez çalışmamızda bahsettiğimiz gibi paket programları kullandık. Fakat bundan sonraki çalışmalarda bu bilgilerin de ışığında, iyonosferden kaynaklanan gecikmeyi en aza indirgeyecek iyonosferik modelin belirlenebilmesi için kaydedilmiş GPS datalarını kullanarak hesaplamalar yapılmalıdır. Güneş aktivitesine bağlı olarak ortaya çıkan güneş lekesi sayılarını da dikkate alarak, Bernese veya Gamit programları aracılığı ile iyonosfer modelleme çalışması yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

Arıkan, F., C.B. Erol.,O. Arıkan., "İstenen Periyod için Düzgünleştirilmiş TEC Kestirimi., URSI-Türkiye., İkinci Ulusal Kongresi, pp. 393-395., 2004.

Aslan, Z., S. Topçu., M.C. Barla ve G. Özdemir., Atmosfer Fiziği, Papatya Yayıncılık, 2004.

Bassiri S., G.A. Hajj, "Modeling the Global Positioning System Signal Propagation Through the Ionosphere", TDA Progress Report 42-110 , August, 1992.

Bassiri, S. and G. A. Hajj, " Higher-Order Ionospheric Effects on The Global Positioning system Observables and Means of Modeling Them", Manuscripta Geodaerica, 18:280-289, 1993.

Bilitza, D., (1990), International Reference Ionosphere, Science Applications Research, USA.

Bilitza, D., "International Reference Ionosphere 2000", Radio Science, Vol. 36, No. 2, pp. 261-275, 2001.

Bilitza, D. and B. W. Reinisch, "International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters", Advance in Space Research, Vol. 42. pp. 599-609, 2008.

Bock, O., Doerflinger E., "Atmospheric Modeling in GPS Data Analysis for High Accuracy Positioning", Physıcs And Chemıstry of the Earth Part A-Solıd Earth and Geodesy, Vol. 26, No:6-8, pp. 373-383, 2001.

Calais, E., and J.B. Minster, "GPS Detection of Ionospheric Perturbations Following a Space Shuttle Ascent", Geophys. Res. Lett., 23, 1897-1900, 1996.

Can, Z., "Konum belirlenmesinde önemli bir rol oynayan GPS sinyallerinin iyonosferle etkileşimi (Proje No:27-01-01-06)" , Devam etmekte olan YTÜ BAP Projesi, 2009.

Cheng, D., (2003), Dalga ve Alan Elektromanyetizması, Akademi Yayıncılık.

Chapman, S., " The Absorption and Dıssociative or Ionizing Effect of Monochromatic Radiation in An Atmosphere on A Rotating Earth" Proc. Phys. Soc., 43:26, 1931.

Chapman, S. And K. Davies, " on The Approximate Daytime Constancy of The Absorption of Radio Waves in The Lowet Ionosphere" , Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, Vol. 13, pp. 86-89, 1958.

Coco, D.S., T.L. "Gaussiran, II, and C. Coker, Passive Detection of Sporadic E Using GPS Phase Measurements", Radio Sci., 30, 1869-1874, 1995.

CODE (2005), Center for Orbit Determination in Europe, "Global Ionosphere Maps Produced by CODE", http://www.aiub.unibe.ch/ionosphere.

Coker, C., R. Hunsucker, and G. Lott, "Detection of Auroral Activity Using GPS satellites", Geophys. Res. Lett., 22, 3259-3262, 1995.

Davies, K., (1965), Ionospheric Radio Propagation, Central Radio Propagation Laboratory, Washington.

Davies, K., (1968), Ionospheric Radio Waves, Colorado.

Davies, K., and G.K. "Hartman, Studying the Ionospher with the Global Positioning System", Radio Sci., 32,4, 1695-1703, 1997.

Depuev, V. H., and S. A. Pulients " A Global Model of Ionospheric Topside Electron Density" , Advances in Space Research, Vol.34, pp. 2016-2020, 2004.

Erol, C.B., F. Arıkan., "GPS Sinyalleri ile İyonosferin İstatistiksel Özelliklerinin Belirlenmesi"., URSI-Türkiye., İkinci Ulusal Kongresi, pp.390-392., 2004.

Erol, C.B. and F. Arıkan., "Statistical Chracterization of the Ionosphere Using GPS Signals"., J. of Electromagnetic Waves an Appl., Vol.19, No:3, pp. 373-387, 2005.

Georgiadou Y., A. Kleusberg., "On the Effect of Ionospheric delay on Geodetic relative Gps positioning"., Manuscripta Geodetica., 13:1-8., 1988.

Grewal, M.S ., L.R.Weill ve A.P. Andrews ., (2007) ., "Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration", Hardcover,Wiley.

Gümrükcü, O ve Z. Can., "Gps Sinyal Yayılımında İyonosferik Etkiler*, TFD 25, Bodrum, 2008.

Hajj , G.A., R. Ibanez-Meier, E.R. Kursinski, and L.J.Romans, "Imaging the Ionosphere with the Global Positioning System", Int.J. Imaging Syst. Technol., 5,174-184, 1994.

Hawarey, M., T. Ayan.,"Uzay Mekiği Tırmanış, deprem ve füze fırlatılışından kaynaklanan TEC Değişimlerinin GPS ile Belirlenmesi"., İTÜ Dergisi/mühendislik., C.3., Sayı:2-3-4-5., pp.45-56., Ekim 2004.

Ho, C. M., A.J. Mannucci, U.J. Lindqwister and B.T. Tsurutani, "Global Ionospheric perturbations Monitored by the Worldwide GPS Network", Geophys. Res.Lett., 23,3219-3222, 1996.

Hochegger, D., B. Nava, S. Radicella and R.Leitinger, " A Family of Ionospheric Models for Different Uses", Phys. Chem. Earth (C), Vol. 25, No. 4, pp. 307-310, 2000.

Houminer, Z., and H. Soicher, "Improved Short-Term Predictions of f_0F_2 Using GPS Time-Delay Measurements", Radio Sci., 31,1099-1108, 1996.

Jakowski N., Schlüter S, and Jungstand A. , "Total electron Content of the Ionosphere during the Geomagnetic Storm on 10 January 1997, http://www.kn.nz.dlr.de/ionos/Storm/storm.html., 1997.

Kahveci, M., "Türkiye koşullarında yapılan GPS gözlemlerinde ortam etkilerinin araştırılması" Doktora Tezi, İTÜ, 1997.

Kahveci, M. ve F.Yıldız., (2001), GPS Global Konum Belirleme Sistemi., Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.

Kolb P. F., "A New Method to Model the Ionosphere Across Local Area", ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division, Long Beach, CA , 2005.

Krankowski, A., L. W. Baran and I. I. Shangimuratov., " Influence of The Northern Ionosphere on Positioning Precision", Physics and Chemistry of the Earth., Vol. 27, Issues 4-5, pp. 391-395, 2002.

Mannucci, A. J., B. D. Wilson, D. N. Yuan, C. H. Ho, U. J. Lindqwister and T. F. Runge " A Global Mapping Techique for GPS-Derived Ionospheric Total Electron Content Measurements" , Radio Science, Vol. 33, No. 3, pp. 565-582, 1998.

Nayir, H., ,F.Arikan., O.Arikan and C.B.Erol., " GPS/TEC Estimation with Ionolab Method " Proceedings of RAST-2007., Recent Advances in Space Research., Harbiye Askeri Müze., Hava Harp Okulu., İstanbul., 14-16, 2007.

Leick, A., (1990), GPS Satellite Surveying, John Wiley& Sons, New York.

Pollack ve Stump., (2004), Elektromanyetik Teori, (Çev., Ş. Türköz, Z. Z. Aydın ve M. Zengin).

Radicella, S. M., "The Middle Atmosphere", College on Theoretical and experimental Radiopropagation Science, 1989.

Rishbett , H ve Garriot , O.K., (1969), "Introduction To Ionospheric Physics", Academic Press, New York

Seeber, G., (2003), Satellite Geodesy, Walter de Grayter, New York.

Tascione, T. F., (1988), Introduction to The Space Enviroment, Orbit Book Company, Florida.

Wilson, B.D., and A.J. Manucci, "Instrumental Biases in Ionospheric Measurements Derived from GPS Data, Proceedings of ION GPS-93, pp.1343-1351, Inst.of Navig., Alexandria,Va., 1993.

Yaşa, Z., (1987), "İyonosfer Yeryüzü Geçidinde Çok Düşük Frekanslı Elektromagnetik Dalgaların Yayılması", Yüksek Lisans Tezi, İ.Ü.

Yazıcı, D., (1996) "İyonosferin İletkenliği ve Manyetik Alanların Neden Olduğu Magneto-Akustik-Gravite Dalgalarının Sönüme Uğraması, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ

Yeniçay, F., (1970), "Plazma Fiziği", İ.Ü. Yayınlar.

İNTERNET KAYNAKLARI

[1] www.ionolab.org.tr
[2] www.aiub.unibe.ch/ionospher
[3] http://cors-tr.iku.edu.tr, Atmosfer Fiziği Seminer Notları, 2006
[4] http://ccmm.gsfc.nasa.gov/modelweb

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	14.11.1979	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1993-1997	Boğaziçi Behçet Kemal Çağlar Lisesi
Ön lisans	1998-2000	Marmara Üniversitesi Sağlık Meslek Yüksek Okulu Diş Protez Bölümü
Lisans	2001-2006	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü

ULUSLAR ARASI BİLDİRİ:

Gümrükçü, O ve Z. Can., "GPS Sinyal Yayılımında İyonosferik Etkiler*, TFD 25, Bodrum, (2008).

BAP Projesi:

Can, Z., "Konum belirlenmesinde önemli bir rol oynayan GPS sinyallerinin iyonosferle etkileşimi (Proje No:27-01-01-06)", devam etmekte olan YTÜ BAP Projesinde proje çalışanı, 2009.